G. WEISS

Manual de Física Biológica

Editorial Pubul

Sgo. Roller 1900
Librería SALVAT
AGUSTINAS 1043
SANTIAGO, CHILE
$ 30,5
N.º 32266
21 pesos

MANUAL DE FÍSICA BIOLÓGICA

Manual

de

Física Biológica

POR

G. WEISS

Ingeniero Jefe de Caminos, Puentes y Calzadas
Decano de la Facultad de Medicina de Estrasburgo
Miembro de la Academia de Medicina

TRADUCCIÓN DE LA QUINTA EDICIÓN FRANCESA

por el

Dr. D. JAIME MUR Y SANCHO

Profesor Auxiliar Numerario
de la Facultad de Medicina de Valencia

584 FIGURAS

BARCELONA
EDITORIAL PUBUL
Enrique Granados, 63
1925

ES PROPIEDAD

Imprenta Clarasó, Villarroel, 17.— Barcelona

PRÓLOGO DE LA QUINTA EDICIÓN

La cuarta edición de mi Manual de Física Biológica se ha agotado en menos de dos años; para esta quinta edición he hecho algunas correcciones evitando todo cambio importante. Esto no obstante, me he visto precisado a desarrollar ciertos puntos, en lo referente a la teoría de la sombra pupilar, los Rayos X y el Radium. Lo he hecho siguiendo el consejo de esclarecidos amigos y estoy particularmente agradecido al señor profesor agregado Strohl, encargado del curso en la Facultad de Medicina de Estrasburgo, por haberme prestado su concurso en la redacción de estas partes.

Estrasburgo, 1.º de Octubre de 1921.

INTRODUCCIÓN

Este libro no es ni un Tratado para la enseñanza de la Física, ni una compilación de documentos; contiene las principales aplicaciones de la Física a la Biología, que deben entrar en el cuadro de los conocimientos de un estudiante al final de su carrera.

He evitado los excesivos cuadros numéricos, limitándome a dar los resultados necesarios para la comprensión de un hecho. No hay ninguna utilidad en aprender una multitud de cifras que no quedan fijas en la memoria.

Los dispositivos experimentales y los aparatos se han descrito sumariamente, habiendo solamente buscado hacer comprender su fundamento. Es en verdad necesario comprender cómo ha podido ser observado un fenómeno o efectuar una determinación; pero, ¿a qué conduce conocer todas las llaves que ha sido preciso girar para esto o todos los tubos que ha habido necesidad de preparar? El estudio de estos detalles no tiene ningún interés general, y su importancia no se pone de manifiesto sino por el manejo de los instrumentos en el laboratorio.

Para leer lo que sigue, basta poseer los principios elementales de la Física. No he hecho más que recordarlos a medida de las necesidades, remitiendo, para las demostraciones, a los tratados generales y a los cursos del bachillerato. Hubiera deseado, no obstante, poder dar mayor desarrollo a la mecánica, ya que los conocimientos que se adquieren en esta rama de la Física tienen frecuentes aplicaciones en casi todos los dominios de la ciencia, pero he debido contenerme para no traspasar los límites de mi programa.

PROEMIO

Sobre la elección de las unidades de medida

Las personas de mi generación se han acostumbrado a no emplear para las medidas más que el sistema métrico, en el que la unidad de longitud es el metro, y la unidad de masa, la masa del gramo. Algunas unidades derivadas usuales proceden de la combinación de múltiplos o submúltiplos del metro y del gramo; así el kilográmetro, unidad de trabajo, deriva del metro y del kilogramo.

Desde la introducción de las medidas en electricidad, se ha tomado el centímetro como base de un nuevo sistema, al que se refieren poco a poco todas las unidades. Desde las clases elementales se adiestra a los niños a hacer uso de ellas. Estamos en un período de transición, por lo que no he querido en este Manual renunciar a las unidades a las que la mayor parte de los lectores está todavía habituado. No obstante, me parece útil, separando este proemio del cuerpo del libro, dar en él la nomenclatura de las nuevas unidades. En caso de necesidad, se podrá recurrir a él para transformar las medidas de un sistema en las de otro.

Sistema C. G. S. (Centímetro, Gramo, Segundo)

UNIDADES FUNDAMENTALES

La unidad de longitud es el centímetro.
La unidad de masa es el gramo.
La unidad de tiempo es el segundo.

Estas tres unidades han podido, sin inconveniente, ser elegidas arbitrariamente. Las demás unidades, llamadas derivadas, se imponen si se quiere evitar introducir en las fórmulas ciertos coeficientes numéricos que complican su empleo. (Véase: *Generalidades, Medidas.*)

La unidad de tiempo tiene el defecto de no descansar en la numeración decimal, lo que tiene algunos inconvenientes en los cálculos. La reforma que realizaría este progreso no ha podido hacerse por diversos motivos; la más importante parece ser la perturbación que ocasionaría en todas las nociones de la hora, ya que todos los actos de nuestra vida privada o pública están ligados íntimamente a una división del tiempo a la que estamos excesivamente adaptados para poder renunciar fácilmente a ella.

PRINCIPALES UNIDADES DERIVADAS

La unidad de superficie es el centímetro cuadrado.

La unidad de volumen es el centímetro cúbico.

La unidad de velocidad es la velocidad de un centímetro por segundo.

La unidad de aceleración es la aceleración de una unidad de velocidad por segundo, lo que equivale a decir que un cuerpo tiene la unidad de aceleración cuando su velocidad aumenta una unidad de velocidad por segundo.

La unidad de fuerza es la *dina*, que da a la unidad de masa (gramo) la unidad de aceleración. La dina, obrando sobre un gramo, hace variar su velocidad en un centímetro por segundo.

La dina equivale, aproximadamente, a 1 miligramo. Un gramo vale, en París, exactamente 981 dinas.

La unidad de trabajo es el *ergio*. Es el trabajo producido por una dina cuando su punto de aplicación se desplaza 1 centímetro en la dirección de la fuerza.

Un kilográmetro equivale, aproximadamente, 10^8 ergios. Exactamente, 1 kilográmetro$=9'81 \times 10^7$ ergios.

Como el ergio es una unidad muy pequeña, poco práctica, se emplea también en un gran número de medidas industriales, el *julio*, que vale 10^7 ergios.

La unidad de potencia mecánica debería ser la potencia capaz de proporcionar 1 ergio por segundo.

Esta unidad es excesivamente pequeña, por lo que se emplea el watio, que corresponde a 1 julio por segundo.

El julio vale, pues, aproximadamente, $^1/_{10}$ de kilográmetro, y 1 watio equivale, aproximadamente, a $^1/_{10}$ de kilográmetro por segundo.

Se emplea con frecuencia, industrialmente, el hectowatio que vale, aproximadamente, 10 kilográmetros por segundo (9'81), y el kilowatio que equivale, aproximadamente, a 100 kilográmetros (98'1) por segundo, es decir, 1 *poncelet*, el *caballo de vapor* equivale a 75 kilográmetros por segundo.

Como todas las expresiones, definiciones o convenciones nuevas, estas innovaciones pueden parecer al lector, todavía no iniciado, que no aportan sino una complicación superflua. En realidad, constituyen un progreso considerable, y aportan a los cálculos de la mecánica y de la física una sencillez que puede compararse a la que se introduce en las medidas y las fórmulas de geometría por la adopción del sistema métrico.

Manual de Física Biológica

GENERALIDADES

I. — Medidas

Importancia de las medidas. — No es en manera alguna necesario, en nuestra época, esforzarnos en demostrar la utilidad de las medidas en las ciencias experimentales. Basta dirigir una mirada hacia el pasado para comprobar que, en cualquiera de las ciencias, sea ésta la astronomía, la física o la química, los progresos realizados están directamente unidos con los resultados obtenidos por las medidas. En estos últimos años hemos podido asistir a la evolución completa que se ha operado en la electricidad, desde el día en que se ha podido hacer en ella una evaluación exacta de las magnitudes sobre las que se operaba.

La práctica de las medidas se introduce cada vez más en Fisiología y en Medicina, ya sea por el termómetro, el calorímetro, el galvanómetro, la balanza u otro procedimiento cualquiera.

Mas, no basta practicar medidas, sino que es preciso que éstas sean buenas. No sólo es inútil, sino que es perjudicial llenar los periódicos de resultados que se desvanecen desde la primera comprobación seria y que exigen grandes pérdidas de tiempo, por parte de un trabajador concienzudo, para volver a la realidad teorías tanto más seductoras, en ocasiones, cuanto más erróneas son.

La ciencia de las medidas es una de las más delicadas, y en su práctica es en donde se manifiesta el buen experimentador. Dada su importancia, voy a entrar en algunos detalles. No basta tener en este asunto nociones aproximadas y vagas.

Es indispensable tener ideas exactas, no sólo para el hombre de laboratorio, sino para todo lector, si quiere poder hacer con conocimiento de causa la crítica científica de un trabajo que estudia.

Practicar una medida es determinar la relación que existe entre cierta dimensión y otra dimensión de la misma especie tomada como unidad.

Si, por ejemplo, se quiere medir una longitud, se la compara con cierta longitud tomada como unidad que, en Francia, es el metro, y se busca cuál es la relación entre esta longitud que se desea medir y el metro. La relación será la medida. Será de 3, 4, 5, etc., según que la relación sea también de 3, 4, 5, etc., es decir, según que contenga 3, 4, 5, etc., veces el metro.

En lugar de servirse del metro se hubiera podido tomar otra longitud como unidad, por ejemplo, el pie inglés; se habrían encontrado, en tal caso, otras medidas. Por esto no basta dar la medida de una magnitud, sino que hay que indicar cuál es la unidad de que se ha servido y se dirá entonces que una longitud tiene 3, 4, etc., metros, o 3, 4, etc., pies, o 3, 4, etc., yardas y así sucesivamente.

Sería de gran interés que todas las medidas de la misma especie se tomasen con la misma unidad; así, para no salir del ejemplo que hemos elegido, todas las medidas de longitud se deberían tomar con el metro. Concíbese, en efecto, que esto facilitaría mucho las comparaciones entre las observaciones de diversos autores, y, a consecuencia del hábito que se tomaría de la unidad, se daría uno más fácilmente cuenta del valor de las magnitudes.

Leo en un libro inglés que un hombre tiene una talla de cinco pies siete pulgadas; no me doy cuenta de si es de grande o de pequeña talla, superior o inferior a la media. Busco en una tabla y encuentro que el pie inglés vale 0.305 m. y la pulgada 0.025 m. Mediante dos multiplicaciones y una adición, obtengo 1.85 m. y únicamente entonces puedo imaginarme la talla de este hombre. La misma dificultad si se me dice que la fachada de una casa es de 10 yardas, o la capacidad de un tonel es de 50 galones. La mayor parte de los pueblos civilizados han adoptado desde luego las unidades del sistema

métrico, y hasta en los países en donde, por razones de amor propio mal entendido, en las que el conjunto de las poblaciones, y los poderes públicos son todavía refractarios, los sabios no emplean más que aquéllas y no cesan de pedir su adopción.

Para medir una especie de magnitud es preciso, pues, ante todo, elegir una unidad, y después comparar las magnitudes que hay que medir con esta unidad.

Vamos a examinar sucesivamente estas dos cuestiones.

Elección de unidades y su empleo. — Hemos dicho que para cada especie de magnitud es preciso tomar como unidad una cierta magnitud de la misma especie adoptada de una vez para siempre. Así, para medir las longitudes, tomaremos por unidad cierta longitud, que será el metro; para medir el tiempo, tomaremos cierto tiempo, el segundo; para medir las masas, tomaremos el gramo, y así sucesivamente.

Vemos inmediatamente que las unidades son de dos especies, según que pueden presentarse materialmente o no; esto tiene una gran importancia desde el punto de vista del método que podremos emplear para efectuar mediciones por medio de estas unidades.

Tomemos la unidad de longitud o la unidad de masa; serán representadas por la longitud de un vástago o la masa de un trozo de metal, por ejemplo. Estas unidades tienen representaciones materiales; las tenemos en la mano cuando queremos utilizarlas.

Pero no ocurre lo mismo con la unidad de velocidad, con la unidad de tiempo, con la unidad de calor y con muchas otras. No es posible representar materialmente una velocidad.

Estamos, por lo tanto, obligados a contentarnos con definir estas unidades.

Diremos, por ejemplo: Un punto posee la unidad de velocidad cuando se desplaza uniformemente un metro por segundo. Diremos también que hemos comunicado la unidad de calor a un cuerpo, cuando este calor sea suficiente para elevar en un grado centígrado la temperatura de un kilogramo de agua. Algunas de estas unidades son susceptibles de una definición muy sencilla; tal ocurre con la unidad de velocidad. Otras, por el contrario, como las unidades eléctricas, necesitan

el profundo conocimiento de las leyes de la Física. Nos ocuparemos más especialmente de las diversas unidades con motivo del estudio particular de cada fenómeno.

Algunos sistemas de unidad, como el sistema inglés, tienen, no sólo el inconveniente de apartarse del sistema más generalmente adoptado, sino el llevar en sí mismo una causa de inferioridad: no son decimales.

En el sistema métrico, cualquiera unidad, y continuaremos tomando, por ejemplo, el metro, tiene por múltiplos y submúltiplos valores decimales, es decir, que valen 10, 100 veces, etc., más o menos que el metro. De ello resulta que cualquier medida, tomada con el metro, puede escribirse con un solo número, siguiendo el método adoptado en Aritmética por todos los pueblos. Tal medida en metros será, por ejemplo, expresada por el número 315,64, que se presta fácilmente a la combinación con otros números análogos, y en general a las operaciones aritméticas. Una sola medida, la del tiempo, es una excepción; lleva en sí segundos, minutos, horas. Sabido es cuánto se complican entonces las operaciones. Tomemos la más sencilla: la adición. Para añadir 2 horas, 27 minutos, 33 segundos a 1 hora, 38 minutos, 44 segundos, hay que realizar una serie de operaciones, únicamente porque la hora, el minuto y el segundo no son decimales unos con respecto a otros.

Las antiguas medidas francesas tenían el mismo inconveniente para todas las especies de magnitud, y la decimalización fué una de las grandes ventajas del sistema métrico.

Actualmente, las medidas inglesas han conservado este carácter de inferioridad. Basta, para convencerse, añadir 5 pies, 7 pulgadas, 8 líneas, a 4 pies, 8 pulgadas, 9 líneas. No se encuentran 10 pies, 4 pulgadas, 5 líneas, sino a cambio de una serie de operaciones, mientras que para añadir 2 m. 32 a 5 metros 89, se encuentra 8 m. 21 mediante una simple adición.

Pero no basta tomar una unidad universalmente adoptada y aplicarle el sistema decimal; solamente un pequeño número de unidades puede ser elegido arbitrariamente, las demás se imponen, como vamos a verlo a continuación.

Las unidades elegidas arbitrariamente son en número de tres: las de longitud, las de masa y las de tiempo. Se las ha

podido elegir arbitrariamente, porque son en todo independientes unas de otras.

La unidad de longitud será el metro, un múltiplo o submúltiplo decimal del metro.

La unidad de masa será la masa del gramo, un múltiplo o un submúltiplo decimal de este gramo.

La unidad de tiempo será el segundo.

Estas tres unidades son las llamadas unidades principales. Las otras serán unidades derivadas; dependen de las precedentes, como veremos más adelante.

Las longitudes se comparan al metro según procedimientos variables, que no podemos describir aquí en totalidad. El método más sencillo consiste en colocar la longitud que se quiere medir junto a una regla dividida y determinar así esta longitud por comparación directa. Pero hay casos en que este medio no es aplicable, o hay que utilizar visores, catetómetros, etc. Cada uno de estos casos debe ser objeto de estudios particulares.

Las masas se comparan con la unidad de masa por medio de una balanza, de un dinamómetro, de un areómetro.

El tiempo que transcurre se determina por el movimiento de una saeta sobre el cuadrante de un reloj de pared o de bolsillo, cuya regularidad está producida por las oscilaciones de un péndulo o de un volante.

Pasemos ahora a las unidades derivadas y a su empleo. Tomaremos como ejemplo la medida de los volúmenes. Puede ocurrir que esta medida se practique de un modo muy sencillo; esto ocurre cuando se quiere determinar el valor de cierta cantidad de líquido contenido en un vaso. Se puede utilizar en tal caso un vaso tomado como unidad, conteniendo, por ejemplo, un litro, y ver cuántas veces se podrá llenar este recipiente unidad con la masa líquida que se quiere evaluar. Pero con frecuencia este método no es aplicable y entonces vemos aparecer la relación entre la unidad derivada y las unidades principales.

Supongamos que hemos de evaluar el volumen de un cuerpo sólido, de un bloque de piedra; no podemos operar como para el líquido; pero la Geometría nos enseña a hacer esta determinación midiendo ciertas dimensiones lineales del bloque.

Por ejemplo, si es un paralelepípedo, se mide la longitud, la anchura y la altura. Se aplica una fórmula, variable según la forma del bloque.

Esta fórmula contiene generalmente coeficientes numéricos que complican la aplicación. Estos coeficientes desaparecen por una prudente elección de la unidad de volumen y las operaciones están entonces simplificadas.

Vamos a hacer esto más claro mediante un ejemplo. Siendo la unidad de longitud el metro, supongamos que se toma como unidad de volumen el pie cúbico y que se pregunta el volumen de un paralelepípedo que tiene 2 m. de largo, 3 m. de ancho y 4 m. de alto.

La Geometría nos enseña que el volumen nos lo dará la fórmula:

$$V = 2 \times 3 \times 4 \times 29{,}41 = 705 \text{ p. c. } 84$$

Hay que multiplicar entre sí las tres dimensiones, luego multiplicar el resultado por 29,41. Este número 29,41 es una constante, por la que hay que multiplicar siempre el producto de las tres dimensiones de un paralelepípedo, cuando estas dimensiones estén expresadas en metros y se desee tener el volumen en pies cúbicos.

Con otra elección para la unidad de volumen, o la unidad de longitud, se tendrá un coeficiente distinto de 29,41. A cada caso corresponde un coeficiente determinado.

Si se toma el metro por unidad de longitud y el metro cúbico por la unidad de volumen, el coeficiente se reduce a 1, la fórmula se convierte en más sencilla, puesto que, en suma, basta obtener el producto de los tres números midiendo las aristas del paralelepípedo. Se tendrá entonces:

$$V = 2 \times 3 \times 4 = 24 \text{ metros cúbicos}$$

Se ve, pues, que las unidades principales pueden elegirse arbitrariamente sin inconveniente, pero no ocurre lo mismo con las unidades derivadas. En todos los sistemas en que esta segunda elección es igualmente arbitraria, resulta una complicación en los cálculos. Unicamente por una prudente elección se ha llegado a la sencillez del sistema métrico, en el que las unidades distintas de las de longitud, de masa y de tiempo, se han impuesto por la necesidad de evitar la introducción de coeficientes inútiles en las fórmulas de medida.

Veremos, no obstante, que las unidades relativas a las medidas del calor no se han elegido de una manera conveniente.

Hay que ser muy circunspectos y muy atentos en la aplicación práctica de las fórmulas; con frecuencia se introducen errores porque no se ha prestado suficiente atención a las unidades con las que se han hecho las medidas de los diversos valores que entran en estas fórmulas. En este sentido hay un principio absoluto que no hay que perder de vista jamás; todas las magnitudes de la misma especie que entran en una fórmula deben estar medidas con la misma unidad. Para puntualizar, no se introducirán en una fórmula unas medidas de longitud en metros y otras en centímetros y en milímetros. Si se adopta el metro, las superficies se expresarán en metros cuadrados, los volúmenes en metros cúbicos. Si se ha tomado el centímetro por unidad de longitud, las superficies se expresarán en centímetros cuadrados, los volúmenes en centímetros cúbicos, etc.

Todos estos detalles parecen evidentes o inútiles de señalar, pero la experiencia muestra pronto que los que no están muy habituados a la aplicación numérica de las fórmulas, cometen en este sentido frecuentes errores y sufren muchas equivocaciones.

II. — Errores

Errores absolutos y errores relativos. — Sea cual fuere el cuidado aportado en la práctica de una medida, no se la obtiene jamás con una precisión absoluta. Las que pueden ser citadas como el modelo más perfecto y que son ejecutadas por los físicos, los astrónomos y los geodésicos, están también sujetas a errores en ocasiones mínimas, pero que es imposible descartar completamente.

Las medidas que se toman en las ciencias biológicas están lejos de requerir una precisión tan grande; hasta puede de-

cirse que sería tan inútil como ilusoria. Si es importante determinar de la manera más rigurosa el momento del paso de una estrella por el meridiano o la longitud de una base de triangulación, y tener en cuenta en los elementos de su cálculo todas las causas de perturbación, sería tan imposible, como desprovisto de interés, intentar operar lo mismo para la duración de la vida de un animal o para la dimensión de uno de sus órganos. Lo propio de un experimentador prudente es, no buscar la precisión mayor a la que se puede llegar en una experiencia particular, sino alcanzar la precisión útil. Aquí no es posible dar ninguna indicación; a cada cual corresponde fijar la aproximación necesaria para el fin que se propone.

Tomemos como ejemplo la duración de la existencia de los animales. Si queremos determinar la extensión de la vida media de una raza de perros en las condiciones normales de existencia, nos bastará notar, para un gran número de individuos, la duración de existencia con un mes de aproximación a lo más, porque, sin causa aparente, las diferencias de una observación a otra pasarán de este error y llegaremos a una media que podrá ser quince años cuatro meses, valor suficientemente aproximado, puesto que tal individuo podrá perfectamente morir seis meses más pronto o más tarde, y hasta más.

Supongamos, no obstante, que deseáramos conocer la duración de supervivencia de perros después de una intoxicación lenta determinada. Nos será preciso mayor precisión, esta supervivencia se medirá por días. Si la intoxicación es muy rápida, será preciso anotar horas; en ciertos casos llegaremos a los minutos y quizá a los segundos.

Vemos, pues, cómo todas estas cosas son variables, y cómo el juicio del observador interviene para la determinación de la precisión que hay que buscar. No obstante la noción de error relativo que más adelante expondremos, puede guiarnos en el valor de la aproximación útil.

He tomado como ejemplo un caso sencillo y que se presta fácilmente a la exposición, pero nos encontraremos ante las mismas dudas siempre que practiquemos una medida en Biología, ya sea la determinación del calor desprendido por un animal, de los gases de la respiración, de la excreción urinaria u otra, de la evaluación de la toxicidad de un producto

químico o de la magnitud de una descarga eléctrica necesaria para excitar un nervio.

Un fenómeno biológico que se produce en condiciones en apariencia idénticas, lleva consigo ciertas variaciones, debidas a perturbaciones sobre las que no tenemos ninguna acción, procedentes de lo que se llaman diferencias individuales de los sujetos sobre los que se opera. En las mediciones que se hagan, se podrá, en general, despreciar los errores del mismo orden que estas diferencias individuales o mejor de un orden un poco inferior. Así, si en una serie de análisis de gases de la respiración correspondientes a las mismas condiciones, se encuentra en un volumen dado de aire, cantidades de anhidrido carbónico que oscilan de 30-36 cm.^{3}, la media será 33, las oscilaciones serán de 3 cm.^{3}, y se tendrá una precisión suficiente haciendo los análisis con una aproximación de 1 cm.^{3}

No obstante, si en las experiencias de Fisiología no es, en general, necesaria una precisión exagerada, es, por el contrario, indispensable estar informado acerca de la naturaleza y la importancia de los errores que se cometen.

Desde este punto de vista hay que distinguir diversas especies de errores:

En primer lugar, tenemos los *errores absolutos* y *los errores relativos.*

Estos últimos son los más interesantes. Sigamos tomando como ejemplo las medidas de longitud; como hemos dicho, cometemos con estas medidas diversos errores. La diferencia entre el valor que encontramos en cada determinación y el que deberíamos encontrar constituye el *error absoluto* de la medida. Por ejemplo: una longitud de 1 m., deberíamos encontrar 1 m.; pero nuestra medida nos dará 0'99; el error absoluto de esta medida será de 0'01 m. *por defecto;* nuestra medida es demasiado corta. En otra medición obtendremos 1'02 m. El error será de 0'02 m. *por exceso;* nuestra medida será demasiado grande.

Tenemos perfectamente la noción de que con semejantes medidas nuestra determinación no será buena. En general, las medidas de longitud se hacen con más precisión.

Supongamos ahora que practicamos medidas de longitud

sobre un camino y que queremos determinar un hectómetro; puede ocurrir que tengamos los mismos errores absolutos 0'01 por defecto, o 0'02 por exceso, pero estos errores nos parecerán muy aceptables; dada la magnitud de la medida, la determinación será buena.

Será muy buena si cometemos los mismos errores absolutos sobre la medida de 1 kilómetro, excelente si operamos sobre miriámetro. Dicho de otro modo: un mismo error absoluto disminuye de importancia tanto más cuanto mayor es la magnitud de la medida. De esta manera se introduce la noción de *error relativo*.

El error relativo es igual al error absoluto dividido por el valor de la magnitud a medir. Así, en el caso que acabamos de examinar, los errores relativos por defecto son, respectivamente: $\frac{0{,}01}{1}$, $\frac{0{,}01}{100}$, etc., o, en fracciones decimales: 0'01, 0'0001, 0'00001, 0'000001. Se ve, pues, que siendo el mismo el error absoluto, los errores relativos se hacen tanto más pequeños cuanto más considerables son las magnitudes que hay que medir.

Debemos hacer una distinción entre las magnitudes de los errores relativos que podemos tolerar, según la naturaleza de los fenómenos que estudiamos.

Si se trata de operaciones de la índole de las que se ejecutan en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas, se procura llevar la precisión hasta el último extremo. Los experimentadores son, en tal caso, dueños de todas las condiciones que pueden influir sobre sus resultados; de esta manera llegan a determinar la longitud de una regla dividida o el peso de un cuerpo con una notable exactitud.

En las experiencias de Fisiología, no es posible alcanzar semejante precisión. Las condiciones en que nos encontramos entonces son demasiado complejas; gran número de ellas escapan a nuestra apreciación, y se introducen, por el hecho de las diferencias entre los animales sobre que operamos, errores sobre los que no tenemos ninguna influencia; por lo tanto, debemos contentarnos con aproximaciones mucho menores.

Es imposible fijar el límite de los errores permitidos en

este género de investigaciones; no obstante, podemos decir aproximadamente que siempre que la materia viva entra en juego, no se puede, en el resultado final, esperar errores relativos de $\frac{1}{100}$; con frecuencia hay que contentarse con $\frac{1}{10}$; $\frac{1}{20}$ ó $\frac{1}{30}$, son resultados satisfactorios en extremo.

Una de las principales dificultades con que tropezamos en las ciencias biológicas, es la imposibilidad en que nos encontramos de hacer la separación de las variables, operación absolutamente indispensable a toda medida de precisión. Vamos a explicar esto, tomando un ejemplo de física pura.

Supongamos que se quiere estudiar la relación que existe entre el volumen de un gas y su presión, es decir, la ley de Mariotte. Sabemos que el volumen de este gas depende de dos variables: la presión, cuyos efectos deseamos estudiar, y la temperatura. Debemos, por lo tanto, en nuestras experiencias, dejar la temperatura absolutamente constante y no hacer variar más que la presión sin lo que nuestras observaciones están plagadas de error. No haciendo variar más que la presión, habríamos hecho lo que se llama *separar* esta variable.

Tomemos ahora un ejemplo en la Biología. Supongamos que se quiere estudiar la ley de consumo del oxígeno de un animal cuando la temperatura varía; debemos hacer determinaciones de oxígeno, variando sólo la temperatura; ésta será la variable separada; aparte de ella, precisará dejar constantes la alimentación, el estado de reposo o de movimiento, etc. Dicho de otro modo: será preciso que el animal se encuentre siempre absolutamente en el mismo estado. Esta condición es la que, por decirlo así, es imposible de realizar en las ciencias biológicas: jamás se encuentran dos animales idénticos para hacer experiencias comparativas, y hasta un mismo animal nunca se encuentra en las mismas condiciones en dos momentos diferentes. No hay más que un medio para librarse de esta dificultad: hay que repetir la experiencia un gran número de veces y tomar un término medio para eliminar, o por lo menos disminuir, los efectos de las causas accidentales sobre las que no podemos actuar.

Método de los medios. Errores accidentales y errores sistemáticos. — Como acabamos de decir, no basta jamás, en las experiencias de Fisiología, hacer una investigación una sola vez, sobre todo en los casos en que pueden introducirse diferencias que escapan a nuestros medios de investigación, por ejemplo, las que dependen de los animales sobre los que experimentamos.

Cuando se han obtenido los resultados procedentes de un cierto número de experiencias, se obtiene el término medio, y este término medio se considera como un resultado más aproximado al verdadero valor que cada uno de los resultados parciales.

He aquí el principio sobre el que se basa este método. Consideremos una longitud, un metro, por ejemplo, y pretendamos determinar esta longitud. Como nuestros procedimientos y nuestros sentidos no son perfectos, cometeremos cierto error en esta determinación, y nos encontraremos con un valor un poco pequeño. En otra determinación de la misma longitud nos encontraremos un valor un poco demasiado grande; y así sucesivamente. La experiencia prueba que, salvo ciertos casos especiales que ahora estudiaremos, las medidas se reparten casi por igual en medidas demasiado grandes y medidas demasiado pequeñas. Sumando todos los resultados obtenidos, los errores se compensan más o menos, y se destruyen tanto más cuanto mayor es el número de resultados que se reunen. La suma está, por lo tanto, más próxima a la que debía ser, es decir, a la que sería si no se hubiese cometido ningún error.

Resulta, pues, que tomando el término medio de todos los resultados obtenidos, se posee un valor tanto más próximo al valor real cuanto mayor es el número de los resultados parciales. Los errores que contienen estos resultados parciales son los que se llama *errores accidentales;* no dependen más que de una imperfección de nuestros sentidos y de nuestros métodos, y son unas veces por defecto y otras por exceso. Obteniendo la diferencia entre el resultado obtenido para el término medio y cada uno de los resultados parciales, se obtienen los errores de estos resultados parciales.

Hay que insistir en el hecho de que este método es tanto

mejor cuanto mayor es el número de observaciones; únicamente en estas condiciones se distribuyen los errores casi por igual y su influencia sobre el término medio desaparece. Esto es fácil de comprender mediante una comparación.

Tomemos una moneda y lancémosla al aire; caerá, por ejemplo, de cara. Podrá ocurrir que dos o tres veces seguidas caiga de cara, y si nos limitamos a estas dos o tres experiencias, se encontrará que la proporción de caída de cara es de 100 por 100.

Repitamos ahora diez veces la experiencia; encontraremos quizás seis caras y cuatro cruces; la proporción de caras será de 60 por 100.

Para cien experienncias, se tendrán cincuenta y cinco caras y cuarenta y cinco cruces; la proporción será de 55 por 100.

Y así sucesivamente, nos aproximaremos cada vez más a la verdad, como lo prueba la experiencia, de una proporción de 50 por 100.

Pero para esto es preciso que no haya una causa que dé a la moneda una tendencia mayor a caer de un lado que de otro. Es preciso que la experiencia no esté contaminada de lo que se llama *error sistemático.*

Vamos a tomar el error sistemático en su forma más sencilla.

Se quieren practicar medidas de longitud, y se utiliza para ello una regla dividida. Admitamos que esta regla haya perdido un centímetro por la parte de su cero; cada vez que leamos una longitud, la cifra leída tendrá un centímetro de más por el solo hecho de este defecto. Este centímetro de exceso será un error sistemático; cada medida estará plagada de este error, aun admitiendo que, aparte de esto, sea ejecutado de una manera perfecta. En el término medio subsistirá este error, sea el que fuere el número de observaciones practicadas.

El error sistemático es el error más grave que se puede cometer en las experiencias. — En el ejemplo que he citado, aparece claramente, y parece casi inútil llamar la atención sobre él, y, sin embargo, es uno de los más generalizados, porque escapa fácilmente al que no tiene muy infiltrados los hábitos de

laboratorio y el más minucioso cuidado de su técnica. Esta es la causa de que las Memorias científicas estén repletas de cifras sin valor, que no resisten a la primera comprobación formal. Para no salir de los errores más groseros, ¿cuántos termómetros no hay en los laboratorios con el cero desplazado? ¿cuántos pesos erróneos? ¿cuántas jeringas mal calibradas y líquidos mal titulados?

Para practicar buenas experiencias, no es siempre necesario, en Fisiología, poseer métodos de gran precisión, sino que es indispensable que no lleven consigo errores sistemáticos, y es preciso conocer siempre el error relativo accidental que puede acarrear. Este error relativo debe ser inferior a los que se introducen a consecuencia de las diferencias individuales entre los diversos animales sobre los que se opera. En estas condiciones, repitiendo la misma experiencia un cierto número de veces, y tomando la cifra media de los resultados, se obtienen buenas medidas. Las diferencias entre los términos medios y cada observación aislada, darán el error de cada una de estas observaciones. Demos, para terminar, un ejemplo de este método.

Supongamos que se quiere determinar la cantidad de oxígeno consumido por un hombre en un día. Recurriendo a un método sobre el que no hay por qué insistir en este lugar, se practicarán dosificaciones en las diferentes horas del día, y se tendrá, por adición, para veinte días sucesivos, una serie de números colocados en la segunda columna del cuadro siguiente:

	Oxígeno absorbido	Diferencias con el término medio
	—	—
1.er día. . . .	744 gramos	+0,4
2.º — . . .	743 —	—0,6
3.er — . . .	741 —	—2,6
4.º — . . .	745 —	+1,4
5.º — . . .	748 —	+4,4
6.º — . . .	751 —	+7,4
7.º — . . .	746 —	—2,4
8.º — . . .	741 —	+2,6
Suma y sigue . .	5959	

	Oxígeno absorbido	Diferencias con el término medio
	—	—
Suma anterior .	5959	
9.º — . . .	738 —	—5,6
10. — . . .	737 —	—6,6
11. — . . .	742 —	—1,6
12. — . . .	748 —	+4,4
13. — . . .	752 —	+8,4
14. — . . .	746 —	+2,4
15. — . . .	741 —	—2,6
16. — . . .	736 —	—7,6
17. — . . .	739 —	—4,6
18 — . . .	744 —	+0,4
19. — . . .	751 —	+7,4
20. — . . .	746 —	+2,4
Total	14.879 gramos	
Término medio.	743,6 »	

Una experiencia de esta índole no tendría valor más que si se supusiera a la persona sometida a la experiencia colocada en lo posible en las mismas condiciones y conservando la misma alimentación. Se llegaría en tal caso al resultado de que este hombre consume, como término medio, 743,6 gramos de oxígeno en veinticuatro horas, con oscilaciones marcadas en la tercera columna del cuadro, no pasando de 8,4 gramos de más ni de 7,6 gramos de menos que la media. Practicando una observación en las mismas condiciones un día cualquiera, se encontraría, casi con seguridad, una cifra intermedia entre 736 y 751 gramos, y lo más frecuente sería que estuviera más próximo a 743,6 gramos.

III. — Representación de los resultados

Los cuadros numéricos y las curvas. — Cuando, a consecuencia de una serie de experiencias o de observaciones, se han obtenido ciertos resultados numéricos, se les reune generalmente en un cuadro, colocando en la primera columna el valor de la variable y en la segunda los valores correspondien-

tes a la magnitud estudiada. Por ejemplo: la primera columna contendrá los diversos valores de la presión ejercida sobre un volumen gaseoso; la segunda los valores correspondientes de los volúmenes, o también la primera columna contendrá las temperaturas de un líquido; la segunda, las tensiones de vapor correspondientes. Tomemos también un ejemplo sacado de la Biología: la primera columna contendrá la indicación de los tiempos (días u horas); la segunda, las temperaturas correspondientes de un enfermo o de un animal.

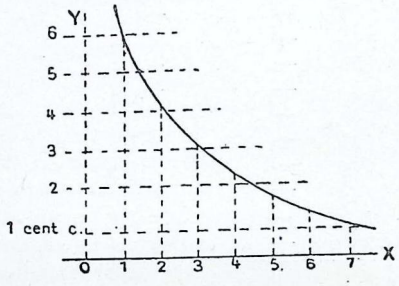


Fig. 1

Este procedimiento es ventajosamente reemplazado por otro consistente en representar el fenómeno por una curva. Se trazan dos ejes rectangulares (fig. 1) uno *ox*, llamado eje de las abscisas, el otro *oy*, denominado eje de las ordenadas. Sobre el eje de las abscisas, a partir de *o*, se colocan los diversos valores de la primera columna, conteniendo la variable, tomando por unidad una longitud arbitraria. Por ejemplo: si se trata de representar la variación del volumen de un gas cuando la presión varía, se representará 1 atmósfera por 1 centímetro, llevado según *ox* a partir de *o*; 2 atmósferas serán representadas por 2 cm. y así sucesivamente. En los puntos así obtenidos 1, 2, 3... se levantan ordenadas, paralelas a *oy*, que tengan una longitud proporcional al volumen ocupado por el gas bajo cada presión, mediante una escala que se elegirá según se quiera. Por ejemplo: 1 cm. representará 1 dm.^{3} o 1 cm.^{3}. Se podrá de este modo trazar en la figura una serie de puntos sirviéndose del cuadro de resultados numéricos. Uniendo todos estos puntos por un trazo continuo se obtiene una curva representativa del fenómeno.

He aquí las ventajas de este sistema de representación:

1.º Todos los resultados del cuadro numérico se encuentran en la curva. Si, por ejemplo, se desea conocer el volumen del gas a 5 atmósferas, bastará medir o leer la altura de la ordenada correspondiente a la cifra 5 del eje de las abscisas; sabiendo a qué volumen corresponde 1 cm. se tendrá el volumen al que corresponde la longitud de la ordenada 5.

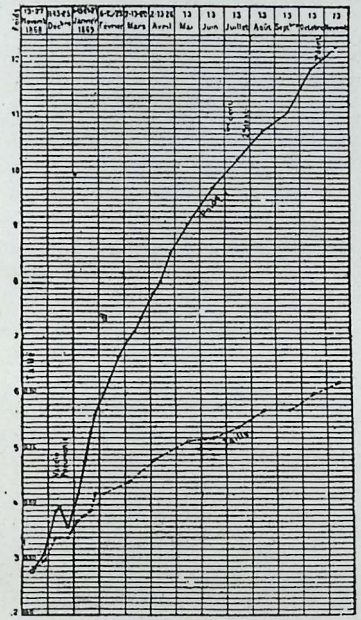


Fig. 2. — Curvas de crecimiento del peso y de la talla de Juan Lorain, durante el primer año.

Por lo demás, es bueno indicar, como lo representa la figura, sobre el eje *oy* los diferentes volúmenes correspondientes a las diversas alturas de ordenadas.

2.º Si se desea conocer el volumen correspondiente a una presión que no se encuentra en el cuadro, por ejemplo a 3, 2, se lee directamente, sin cálculo; basta tomar la ordenada correspondiente a la división 3, 2, que se determina aproximadamente, o hasta con precisión, si se ha tenido cuidado de trazar la curva sobre un papel finamente cuadriculado,

preparado con este fin, que se encuentra en el comercio. Este papel está dividido en centímetros por medio de trazos acentuados, y cada centímetro está subdividido en milímetros por líneas más finas.

3.º Se puede, con facilidad, resolver el problema inverso del primero. Conociendo un volumen, encontrar la presión correspondiente. Basta para ello buscar la ordenada que tenga la longitud deseada, y leer a qué abscisa corresponde.

4.º Por último, es una gran ventaja que, a primera vista, se comprenda la marcha general del fenómeno estudiado.

Consideremos, por ejemplo, la figura 2, que representa gráficamente la variación de talla y de peso de un niño; se ven inmediatamente todos los accidentes que se producen y la rapidez con que el peso y la talla varían; ningún cuadro numérico podría dar esta impresión; necesitaría un gran trabajo, por ejemplo, para buscar si el crecimiento es más rápido en un mes que en otro.

Este sistema de representación se recomienda siempre que se quieren expresar las variaciones de una magnitud correspondientes a las variaciones de otra magnitud. Unicamente él permite seguir la marcha de un fenómeno mezclado en los cuadros de cifras. Basta, para convencerse de ello, comparar las curvas de la figura 2 con un cuadro de cifras representando los mismos fenómenos. Compréndase lo que puede ocurrir cuando estos cuadros se multipliquen. Bowditch ha hecho una serie de estudios sobre el crecimiento y el aumento de peso de los niños sometidos a diferentes condiciones de existencia, y de ellos ha sacado conclusiones muy importantes; pero no ha podido llegar a este resultado sino gracias a la representación por curvas; jamás hubiera podido de otra manera deducir una ley de la multitud de cifras que tenía a su disposición.

PRIMERA PARTE

ACCIONES MOLECULARES

I. — Principios generales de mecánica

El reposo y el movimiento

Un cuerpo puede encontrarse en el estado de reposo o en el estado de movimiento.

Consideremos un cuerpo bastante pequeño para poder ser asimilado a un punto: cuando este cuerpo se desplace en el espacio, describirá una curva que se llama la trayectoria del cuerpo. Si el cuerpo tiene mayores dimensiones, cada uno de sus puntos tendrá su trayectoria especial.

Estas trayectorias pueden afectar las más diversas formas, desde la línea recta hasta la curva más complicada. El estudio de estas formas comprende lo que se llama *Geometría.*

Ahora bien; el conocimiento de la trayectoria de un punto no da más que una idea muy incompleta de su movimiento. Para hacerlo comprender mejor pongamos un ejemplo. Cuando un cuerpo pequeño cae libremente, describe una recta; ¿estamos por este conocimiento completamente informados sobre el movimiento del cuerpo? De ninguna manera; hay que saber, además, en qué punto de su trayectoria se encuentra el cuerpo en los diferentes momentos de su carrera. De la misma manera, si un tren recorre la línea férrea de París-Marsella, el conocimiento del trayecto de la línea no nos basta; hay que tener el horario del tren. Vemos, pues, intervenir un elemento nuevo: el tiempo, pasamos de la Geometría a la Mecánica.

La Mecánica misma comprende muchas partes:

Hay que estudiar el movimiento de los cuerpos sin ocuparse de la causa de este movimiento: este estudio constituye la *Cinemática.*

Los cuerpos materiales se encuentran sometidos a lo que se llaman fuerzas; el estudio de estas fuerzas y de sus efectos constituye la *Estática,* cuando los cuerpos están en reposo; la *Dinámica,* cuando se mueven por la acción de las fuerzas.

Cinemática

Movimiento uniforme. — Consideremos un punto que se desplaza en línea recta. El caso más sencillo que puede presentarse, es que en un momento cualquiera de la observación, los espacios recorridos son iguales en tiempos iguales, es decir, que se necesita siempre el mismo tiempo para recorrer un metro por ejemplo, cualquiera que sea el momento en que observamos el cuerpo. Se dice entonces que el movimiento es uniforme. Así, un tren, lanzado por una vía en línea recta que recorra un kilómetro por minuto, se dice que está animado de un movimiento uniforme.

Se llama velocidad de un punto en movimiento uniforme la longitud del camino recorrido en la unidad de tiempo. Se dice que una bala de fusil tiene una velocidad de 500 metros por segundo, un tren una velocidad de 1 kilómetro por minuto, un coche de 12 kilómetros por hora, etc.

Movimiento variado. — Pero ocurre muchas veces que no sucede así. Un coche marchando por un camino recto puede tener una marcha muy variable; de la misma manera si lanzamos un cuerpo de abajo arriba siguiendo una vertical, aun sin observación precisa, notamos que emplea menos tiempo en franquear 1 metro en la parte baja de su trayectoria que en la alta. En estos casos, el movimiento se llama variado.

La noción de velocidad se complica entonces un poco, y para comprender bien lo que se entiende por velocidad en el movimiento variado, volvamos un instante al movimiento uniforme. La unidad de tiempo generalmente adoptada en la medida de las velocidades es el segundo; en estas condiciones

y para un movimiento uniforme, será necesario medir el espacio recorrido por el cuerpo en un segundo. Prácticamente, es con frecuencia imposible de realizar esta medida durante un segundo, pero una observación de una duración cualquiera prestará los mismos servicios. Supongamos, en efecto, que la observación haya durado diez segundos; bastará dividir la longitud medida por 10 para tener la velocidad por segundo; en general, en cada caso se tendrá la velocidad del movimiento uniforme dividiendo la longitud del camino recorrido por el número de segundos exigidos para recorrerlo. En algunas ocasiones ocurre que la observación dura menos de un segundo; pero esto no cambia en nada la regla que acabamos de dar. Este caso se presenta generalmente para las grandes velocidades, cuando únicamente es accesible una pequeña extensión de la trayectoria; así, cuando se mide la velocidad de los proyectiles a la salida de la boca del cañón, o la velocidad de la onda muscular, o también la velocidad de propagación del influjo nervioso.

Pasemos ahora al movimiento variado. Para fijar las ideas, consideremos un tranvía que recorre una vía ideal de 10 kilómetros en línea recta y emplea una hora en hacer el recorrido. Si el movimiento era uniforme, tendríamos su velocidad dividiendo el camino recorrido por el tiempo; se obtendría así una velocidad de 2,77 m. por segundo. Esta cifra expresa lo que se llama la velocidad media del cuerpo, pero esto no quiere decir en manera alguna que en cualquier punto de la vía el tranvía no recorriera 2,80 m. por segundo: tan pronto recorrería más, tan pronto recorrería menos; hasta pueden suponerse paradas. Pero coloquémonos en un punto del recorrido, midamos una longitud, 100 m., por ejemplo, y contemos el tiempo necesario para que el tranvía lo franquee; deduciremos de esta observación una cierta velocidad media para estos 100 m. Hagamos la misma experiencia con distancias cada vez más pequeñas; llegaremos a considerar la velocidad media en el punto en que nos encontramos, sobre 1 m., 1 dm., 1 cm., etc. Ahora bien; si este espacio recorrido es bastante pequeño, podemos admitir que, atravesándolo, la velocidad del cuerpo no ha variado, y decimos que, por definición, la velocidad del cuerpo en el punto en que

nos encontramos es la velocidad media sacada de una observación de muy corta duración. Esta es la velocidad que tomaría el cuerpo si, a partir del punto de observación, el movimiento se hiciera uniforme.

Por lo tanto, prácticamente, si se quiere conocer la velocidad en un momento dado de un cuerpo en movimiento variado, hay que realizar una observación sobre un recorrido bastante restringido, para que en este espacio se pueda considerar el movimiento como uniforme. Así, cuando un proyectil sale del cañón, toma cierta velocidad, que va disminuyendo; para medir la velocidad inicial, es decir, la velocidad al principio de la trayectoria, se practica esta medida en el recorrido de un metro aproximadamente, durante el que no ha habido todavía disminución.

Movimiento uniformemente variado. — Entre los diversos movimientos variados, existe uno particularmente interesante: es aquel en que esta variación se produce regularmente; en tiempos iguales, la velocidad aumenta o disminuye en cantidades iguales. El ejemplo clásico es el de un cuerpo que cae libremente. La experiencia demuestra que si se observa este cuerpo al cabo de 1 segundo, 2 segundos, 3 segundos, etc., su velocidad aumenta una misma cantidad cada vez que transcurre un nuevo segundo. Así, suponiendo despreciable la resistencia del aire y midiendo la velocidad de un cuerpo en caída libre, al cabo del primer segundo de caída, se encuentra que es de 9,808 m. por segundo; si ahora, en cualquier momento, medimos esta velocidad, y después, un segundo más tarde, la volvemos a medir, podremos apreciar que durante este lapso de tiempo la velocidad del cuerpo ha aumentado 9,808 por segundo. El movimiento, cuya velocidad va así aumentando regularmente, se llama uniformemente acelerado.

Pero puede ocurrir que un cuerpo sometido a la influencia de la gravedad sea lanzado verticalmente de abajo arriba; su velocidad, en lugar de ir creciendo, disminuirá sin cesar hasta llegar a cero. A partir de este momento, el cuerpo cesará de elevarse; podremos encontrar por la experiencia que, en este caso, la variación de la velocidad es también constante. Cada segundo que transcurre, la velocidad disminuye 9,808

metros y nos encontramos con un movimiento uniformemente retardado.

Se representa convencionalmente la velocidad de un punto sobre una trayectoria por una flecha cuya orientación indica la dirección de la velocidad. Resulta que esta flecha debe ser tangente a la trayectoria del cuerpo. Además, se da a la flecha una longitud proporcional a la magnitud de la velocidad. Sobre un dibujo, si cierta longitud de flecha representa una velocidad de 1 m. por segundo, una flecha, dos, tres, diez veces más larga representará una velocidad de 2, 3, 10 m. por segundo.

Composición de los movimientos. — El desplazamiento de un cuerpo, con relación al medio inmóvil en que se encuentra, puede, en ocasiones, no aparecer inmediatamente con su exactitud.

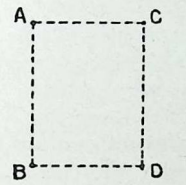


Fig. 3

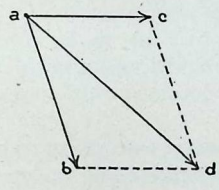


Fig. 4

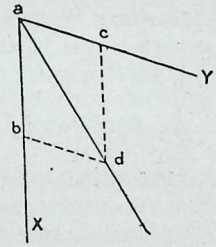


Fig. 5

Supongamos que nos encontremos en un tren en marcha: se deja caer un cuerpo, por efecto de la pesantez, se desplazará de *A* a *B* (fig. 3); pero durante esta caída el punto *A* ha venido a *C*, a consecuencia de la velocidad del tren; se demuestra que en este momento el cuerpo está en *D*. De una manera general, si dos movimientos producen simultáneamente sus efectos sobre un cuerpo, uno de estos movimientos puede estar representado por *ab* (fig. 4), el otro por *ac;* se tiene el efecto resultante completando el paralelogramo, del que *ac* y *ab* son los lados; el cuerpo estará finalmente en *d* sobre la diagonal en la extremidad opuesta de su punto de partida.

Esta regla de composición de los movimientos se encuentra para las velocidades. Si en un momento, una causa cualquiera da a un cuerpo *a* una velocidad *ac* (fig. 4), otra causa la velocidad *ab*, el cuerpo tendrá finalmente la velocidad resultante *ad*.

Inversamente, se puede descomponer un movimiento o una velocidad según dos direcciones, es decir, sabiendo que el cuerpo tiene un desplazamiento o una velocidad *ad*, encontrar dos movimientos o dos velocidades cuya combinación produce el mismo efecto resultante; basta construir un paralelogramo del que *ad* es la diagonal, los dos lados serán los componentes buscados.

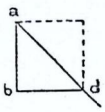


Fig. 6

Ejemplos. Se da *ad* (fig. 5) y dos rectas *ax* y *ay*, según las que se quiere que los componentes sean dirigidos; se trazan por *d* las paralelas *db* y *dc* a *ay* y *ax; ab* y *ac* serán las componentes buscadas.

O bien: se da *ad* (fig. 6) y una de las componentes *ab*. Se une *db; db* es el otro lado del paralelogramo y en consecuencia el otro componente.

Aceleración. — Tomemos el caso de un movimiento uniformemente variado; por ejemplo, el de un cuerpo que cae en caída libre. Hemos visto que a cada segundo corresponde un mismo aumento de velocidad de 9,808 m. Esta cantidad, con que la velocidad crece en la unidad de tiempo, es lo que se llama aceleración del movimiento.

La aceleración puede ser mayor o menor, y la velocidad irá, en consecuencia, aumentando más o menos rápidamente.

Puede ocurrir que en un movimiento variado la velocidad vaya disminuyendo; es lo que ocurre, por ejemplo, cuando un cuerpo pesado es lanzado de abajo a arriba. Entonces la aceleración obra en sentido inverso de la dirección del desplazamiento.

En uno y otro caso, la aceleración dirigida en el sentido del movimiento, o en sentido inverso, pero siendo paralelo a la dirección de este movimiento, no tiene otro efecto que alterar la velocidad del cuerpo en magnitud sin modificar la dirección.

Concíbese fácilmente que la aceleración de un movimiento puede no ser constante, pero que varía en cada momento como se ha visto variar la velocidad.

Puede ocurrir también, y esto es más frecuente, que la aceleración no se limita únicamente a cambiar el valor de la velocidad sino que modifica también la dirección, lo que equivale a decir que a la velocidad del cuerpo en un momento dado, se añade o se cercena una velocidad de dirección diferente.

Composición de aceleraciones. — Las aceleraciones se representan como las velocidades: en magnitud y en dirección, por flechas, y, según la manera como hemos establecido la existencia de estas aceleraciones, se puede comprender que su regla de composición sea la misma que la regla de composición de las velocidades.

La fuerza

Principio de la inercia. — Un cuerpo no puede modificar su estado de reposo o de movimiento sin la intervención de una causa exterior.

La primera parte de este principio se concibe fácilmente: un cuerpo en reposo no se pone en movimiento espontáneamente; es preciso que una causa exterior, obrando sobre él, lo desplace. Así, un peso puesto sobre el suelo allí permanecerá indefinidamente inmóvil si queda abandonado a sí mismo.

La segunda parte exige algunas explicaciones. Cuando un cuerpo está en movimiento, en un instante dado posee cierta velocidad. Si está absolutamente libre y substraído a toda influencia exterior, demuestra la experiencia que esta velocidad no se modifica en nada, ni en magnitud ni en dirección; por consiguiente, este cuerpo conserva una velocidad constante; no tendrá ninguna aceleración; recorrerá una línea recta con movimiento uniforme. Para modificar este estado de movimiento uniforme, del cuerpo, es decir, para modificar su velocidad, es preciso comunicarle cierta aceleración, como hemos visto anteriormente; según los casos, y según esta aceleración, no se producirá más que un sencillo cambio en la

magnitud de la velocidad, o simultáneamente un cambio en la magnitud de esta velocidad y en su dirección. En este último caso, la trayectoria del cuerpo no será una línea recta. Esta aceleración que vemos intervenir no nace de la nada, tiene una causa; esta causa nos es desconocida en su esencia; se le da el nombre de fuerza. Así, pues, cuando la fuerza obra sobre un cuerpo libre le comunica cierta aceleración, lo que pone el cuerpo en movimiento si estaba primitivamente en reposo, y modifica su trayectoria y su velocidad si ya se desplazaba.

Una piedra lanzada en el espacio se desplazaría en línea recta con movimiento uniforme si la fuerza de atracción de la tierra no le comunicara cierta aceleración, y bajo esta influencia la piedra describe una curva.

Acabamos de ver cómo la noción de fuerza se introduce en mecánica: la fuerza es la causa de la aceleración. Pero no estamos en manera alguna informados sobre la naturaleza de la fuerza; jamás nos ha sido posible verla; no la conocemos más que por sus efectos. Así como jamás hemos visto la corriente eléctrica y no conocemos su existencia más que por los efectos que produce: desviación de la brújula, descomposiciones químicas, etc., así tampoco conocemos la fuerza más que por la aceleración que produce.

Sin embargo, para poder estudiar los efectos de las fuerzas es preciso que podamos medirlas, como medimos la electricidad.

Cuando estudiamos las descomposiciones químicas producidas por la corriente eléctrica, tomamos el sistema de medida más sencillo y decimos que una corriente es dos, tres, diez veces más intensa que otra corriente tomada como unidad, cuando en las mismas circunstancias esta primera corriente produce una descomposición que es dos, tres, diez veces más grande que la segunda.

Para evaluar las fuerzas que no conocemos más que por las aceleraciones, operamos lo mismo; cuando veamos a un mismo cuerpo tomar una aceleración dos, tres, diez veces mayor, decimos que la fuerza que obra sobre él es dos, tres, diez veces mayor.

Pero si un mismo cuerpo sometido a una misma fuerza toma siempre la misma aceleración, y este mismo cuerpo sometido a fuerzas diferentes adquiere una aceleración proporcional a la fuerza, como hemos visto en el párrafo precedente, no ocurre lo mismo cuando se opera sobre cuerpos diferentes; vamos, por el contrario, a ver intervenir un nuevo elemento: la masa.

Admitamos que pudiésemos disponer de una fuerza constante y hagámosla ejercer su acción sobre una serie de cuerpos; podrá ocurrir que algunos de estos cuerpos tomen la misma aceleración: diremos que tienen la misma masa; los que tomen aceleraciones diferentes, tendrán masas diferentes. Para simplificar: supongamos que todos estos cuerpos sean de la misma naturaleza, que sean todos de cobre, por ejemplo; apreciaremos que los que toman la misma aceleración tienen volúmenes iguales; que los más pequeños toman la aceleración mayor y que los más grandes la aceleración menor; en una palabra, mediante esta experiencia, podemos probar que, sometidos a una misma fuerza, diversos cuerpos toman una aceleración en razón inversa de la masa. Para dar a todos los cuerpos la misma aceleración, hay que aplicarles fuerzas proporcionales a su masa. Así, todos los cuerpos sometidos a la atracción terrestre, a una misma distancia de la tierra, toman la misma aceleración, porque la fuerza ejercida por la atracción de la tierra es proporcional a la masa de los cuerpos atraídos.

Así, pues, se admite por convención que la fuerza es proporcional a la aceleración, y la experiencia demuestra que es también a la masa del cuerpo que pone en movimiento, dada, desde luego, igualdad de las demás circunstancias.

Unidades de fuerza y de masa. — Antes de pasar adelante, hay que elegir unidades que nos permitan medir las cantidades que queremos estudiar.

Como siempre, estas unidades son magnitudes de la misma especie que las magnitudes que hay que medir. En Francia están en relación con el sistema métrico. Por razones que es inútil exponer aquí, se ha tomado como unidad de masa la de 1 cm^3. de agua destilada. Esta unidad se llama gramo. Se dice por abreviación una fuerza de 1 gr. la fuerza ejercida por la atracción terrestre sobre el gramo.

Con frecuencia se emplean unidades mil veces mayores; se tiene entonces la masa de 1 kilogramo, correspondiente a 1 dm^3. de agua destilada, y la fuerza que la atracción terrestre ejerce sobre esta unidad, se llama, por abreviación, una fuerza de 1 kilogramo.

En las figuras, las fuerzas se representan por flechas en magnitud y en dirección, como las aceleraciones, a las que son proporcionales.

En un gran número de casos, las fuerzas a que está sometido un cuerpo no proceden de una acción a distancia, sino que resultan del contacto con otros cuerpos. Los ejemplos son excesivamente frecuentes y conocidos para que sea necesario insistir sobre este punto.

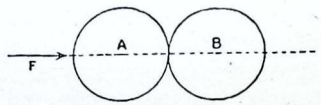


Fig. 7

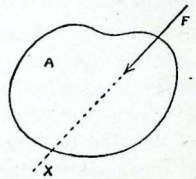


Fig. 8

La fuerza se transmite íntegramente en magnitud y en dirección a través de los cuerpos rígidos. Supongamos, por ejemplo, que tenemos dos esferas A y B, en contacto (fig. 7). Haciendo obrar por cualquier mecanismo sobre la esfera A una fuerza representada por la flecha F, cuya prolongación pasa por el punto de contacto de A y B, obtendremos sobre B el mismo efecto que si la fuerza se aplicara directamente en este punto de contacto, es transmitida íntegramente a través de A. Es, por lo demás, indiferente que la fuerza F sea aplicada en un punto cualquiera del cuerpo A situado en la prolongación de la flecha F representada en línea punteada. Este hecho es general. Cuando una fuerza F, obra sobre un cuerpo rígido A, produce siempre el mismo efecto, sea el que fuere el punto de la dirección FX (fig. 8) al que se aplique la fuerza; se transmite siempre íntegramente en línea recta a través de todo el cuerpo. Entiéndase bien que el cuerpo debe ser considerado como absolutamente rígido y resistente; veremos más adelante lo que ocurre cuando puede deformarse bajo la acción de las fuerzas que la solicitan, ya sea un cuerpo líquido, un cuerpo elástico o un cuerpo blando.

Pero volvamos a la figura precedente: la fuerza, hemos dicho, se ejerce sobre el cuerpo B por intermedio de A; aquí también nos encontramos un principio muy importante.

Principios de la acción y de la reacción. — A toda acción corresponde una reacción igual y de sentido contrario.

Es decir, en el caso particular que nos ocupa, si el cuerpo A ejerce sobre B una fuerza F, inversamente el cuerpo B ejerce sobre A, en el punto de contacto, una fuerza, denominada reacción, precisamente igual a F, y dirigida en sentido contrario. Si apretamos con el dedo contra una pared con una fuerza de 1 kilógramo, la pared a su vez oprime nuestro dedo con esta misma fuerza; si, por ejemplo, hemos puesto entre la pared y el dedo una hoja de papel, esta hoja de papel soporta sobre cada una de sus caras una presión de 1kilogramo, por una parte la acción del dedo, y por otra la reacción del muro.

Esto es tan verdadero cuando el cuerpo está en reposo como cuando está en movimiento.

Acción simultánea de muchas fuerzas. — Ocurre con frecuencia que muchas fuerzas obran simultáneamente sobre un mismo cuerpo. Tomemos, por ejemplo, el caso más sencillo: aquel en que un cuerpo A está sometido a la acción de dos fuerzas F y F' que se encuentran una en la prolongación de la otra (fig. 9). Sabemos que estas dos fuerzas pueden ser consideradas como aplicadas en un mismo punto del cuerpo situado sobre la línea XY; su acción se suma y todo ocurre como si el cuerpo sufriese la acción de una sola fuerza R dirigida según XY e igual a la suma $F + F'$.

F y F' se denominan las dos componentes; R es la resultante.

Así, si sobre una mesa colocamos un peso de 2 kilogramos, y sobre éste otro peso de 3 kilogramos, la mesa sufre de arriba a abajo una presión de 5 kilogramos.

De la misma manera, siendo sensiblemente paralelas la por-

ción larga y la porción corta del biceps y uniéndose al mismo tendón inferior, dan una resultante, transmitida por este tendón al radio, igual a la suma de las tracciones desarrolladas por cada una de las porciones del biceps.

Ocurre con frecuencia que las fuerzas paralelas que actúan sobre un cuerpo no están dirigidas según la misma recta; tal es, por ejemplo, el caso de la figura 10, en el que las dos fuerzas A y B son paralelas, pero dirigidas según rectas diferentes. En este caso, se demuestra que la resultante

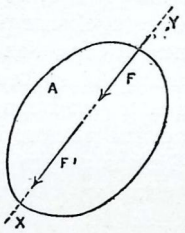


Fig. 9

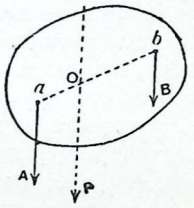


Fig. 10

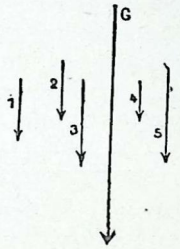


Fig. 11

es también igual a la suma de las dos componentes, es paralela a las mismas y pasa por un punto O tal que $Oa \times aA = Ob \times bB$.

Naturalmente, cuando el número de las fuerzas es igual o superior a dos, se puede, asociándolas, reducirlas a una sola resultante. Esta resultante es igual a la suma de todas las componentes, y les es paralela. Está aplicada en un punto G (fig. 11), que más adelante estudiaremos. Todo ocurre como si el conjunto de estas fuerzas fuera reemplazado por una sola resultante aplicada en G.

Por último, en ciertos casos, las fuerzas, siendo paralelas, no están dirigidas en el mismo sentido; se demuestra que para tener la resultante, hay que sumar todas las fuerzas dirigidas en el sentido directo y restar de esta suma todas las fuerzas dirigidas en sentido contrario.

Existe un caso particularmente importante representado en la figura 12; es aquel en que las fuerzas se reducen a dos, inversas e iguales entre sí. Cuando se busca la resultante, se encuentra evidentemente que es nula. ¿Esto quiere decir que el cuerpo no sufrirá ningún cambio bajo la acción de las fuerzas A y B? En manera alguna, pero el punto G, al que está aplicada la resultante de A y B, permanece inmóvil durante el movimiento del cuerpo; es decir, que, bajo la

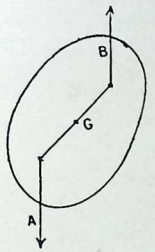


Fig. 12

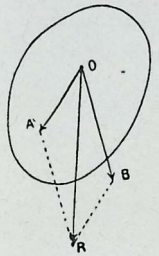


Fig. 13

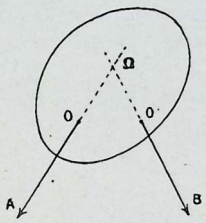


Fig. 14

influencia de las fuerzas A y B, el cuerpo girará alrededor del punto G, fijo en el espacio.

Una asociación de dos fuerzas, como A y B, se denomina *par*.

Cuando dos fuerzas no son paralelas, pero están aplicadas en un mismo punto O de un cuerpo (fig. 13), su regla de composición es la misma que la de las aceleraciones, es decir, que su resultante R es la diagonal de un paralelogramo de las que ellas forman los dos lados.

Cuando las dos fuerzas no están aplicadas en el mismo punto, pero sus prolongaciones se encuentran en Ω (fig. 14), cada una de estas dos fuerzas puede, como ya sabemos, desplazarse en su propia dirección. En particular, podemos suponerlas transportadas a Ω y estaremos en el caso precedente.

Con frecuencia, dos o más fuerzas aplicadas a un mismo cuerpo no se encuentran: este problema resulta muy complicado para ser tratado aquí. Lo único que podemos decir es que, un número cualquiera de fuerzas que obren sobre un cuerpo, pueden siempre reducirse a una fuerza y un par.

Centro de gravedad

Las diversas partículas que componen un cuerpo material sufren, por parte de la tierra, una atracción que se traduce por fuerzas que obran sobre estas partículas. Todas estas fuerzas, paralelas entre sí, tienen una resultante, R, cuya posición depende naturalmente de la forma del cuerpo, pero

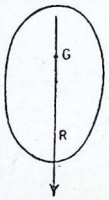


Fig. 15

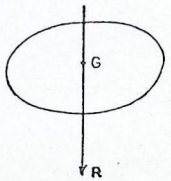


Fig. 16

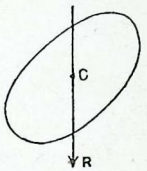


Fig. 17

cuya magnitud es igual a la suma de todos los componentes elementales.

Cuando colocamos los cuerpos en diversas posiciones, como indican las figuras 15, 16 y 17, la magnitud de la resultante no cambia evidentemente, puesto que es siempre la suma de todas las fuerzas elementales independientes de la posición del cuerpo. Pero la orientación de la resultante con relación al cuerpo variará y dependerá de la posición del cuerpo. Pero en todas estas posiciones la resultante pasará por un cierto punto G, fijo en el cuerpo y que se llama su centro de gravedad.

En todas las cuestiones de Mecánica que se presentarán, podremos siempre considerar la acción de la tierra sobre un cuerpo sólido como reduciéndose al peso total aplicado al centro de gravedad.

Estática

Puede ocurrir que los efectos de todas las fuerzas que obran sobre un cuerpo se anulen; se dice entonces que este cuerpo está en equilibrio; permanece inmóvil si está en reposo,

o su velocidad permanece constante en magnitud y dirección, si está en movimiento.

Si se conocen todas las fuerzas que obran sobre un cuerpo, es fácil investigar si están realizadas las condiciones de equilibrio; hay que componer todas estas fuerzas entre sí y ver si la resultante es nula.

Existen dos casos, principalmente interesantes por sus numerosas aplicaciones prácticas:

Primer caso. — El cuerpo sometido a la pesantez y a otras fuerzas, descansa sobre una superficie de apoyo, un pla-

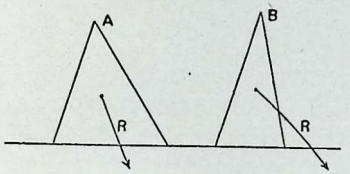


Fig. 18

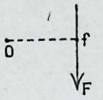


Fig. 19

no horizontal, por ejemplo. Supongamos el rozamiento de la superficie suficiente para evitar el deslizamiento del cuerpo. Tenemos una resultante para las fuerzas que actúan. Reunamos todos los puntos de apoyo entre sí, de tal modo que se forme un polígono convexo, no dejando ningún punto de apoyo exterior a él; está demostrado que habrá equilibrio si la resultante de las fuerzas pasa por dentro (fig. 18, A) de este polígono, llamado *polígono de sustentación*. En caso contrario, el cuerpo basculará (fig. 18, B) alrededor de uno de los lados del polígono y caerá.

Segundo caso. — El cuerpo puede girar alrededor de su eje. Supongamos que este eje se proyecta según el punto o del plano del papel que le es perpendicular. Proyectemos también cada fuerza que obre sobre este plano como lo hemos hecho para F; en fin, bajemos la perpendicular of sobre F; $of \times F$ es lo que se denomina *momento* de la fuerza F con relación a o. Se concibe que ciertos momentos tiendan a hacer girar a los cuerpos en un sentido que llamaremos directo, otros en sentido inverso. Está demostrado que hay equilibrio

cuando la suma de todos los momentos directos es igual a la suma de todos los momentos inversos.

Puede, por último, ocurrir que, en lugar de girar alrededor de un eje el cuerpo gire alrededor de un punto fijo. Habrá equilibrio, cuando exista equilibrio para un eje cualquiera que pase por el punto fijo. Así, se tomará un eje cualquiera que pase por el punto fijo y se verá si hay equilibrio. Si esta misma condición queda establecida para tres ejes que no estén en el mismo plano, está demostrado que el cuerpo está en equilibrio alrededor del punto *o*.

Dinámica

La Dinámica es ciertamente la parte de la Mecánica en la que las personas poco habituadas a esta ciencia cometen más errores, queriendo prever lo que ocurrirá para un cuerpo en movimiento según los conocimientos adquiridos para este cuerpo en reposo. Cuántas veces se oye preguntar cuál podrá ser la fuerza producida por el choque de un cuerpo de determinado peso, animado de una velocidad conocida y cayendo de una altura determinada. Vamos a hacer ver cuánto se puede uno engañar en esta clase de cuestiones, en donde los problemas planteados no tienen con frecuencia ningún sentido.

Tomemos una experiencia de a diario: Un peso está pendiente de un hilo; si este peso es abandonado a sí mismo con suavidad el hilo podrá, si es bastante resistente, no romperse; sostiene este peso en el espacio. Pero ocurrirá con frecuencia que abandonando bruscamente el peso después de haberlo elevado ligeramente para que cese la tensión del hilo, habrá ruptura. Este hecho es bien conocido; no obstante, en un primer momento no se ve la explicación; siendo siempre la misma fuerza la que obra, el peso del cuerpo, el hilo debería conducirse siempre de la misma manera.

He aquí otra experiencia que llama todavía más la atención: Tomad una esfera pesada, atadle dos hilos idénticos, uno superior, que permitirá que se la suspenda en un punto fijo, otro inferior, que colgará libremente. Tomad el extremo inferior con la mano y ejerced de arriba abajo una tracción ligera y gradualmente creciente; llegará un momento en

que habrá ruptura. Evidentemente, es el hilo superior el que se romperá; porque soporta la tracción de la mano más el peso de la esfera, mientras que el hilo inferior no soporta más que la tracción. Pero, en lugar de obrar con suavidad, dad una sacudida brusca; si el peso de la esfera está convenientemente elegido, será el hilo inferior el que se romperá.

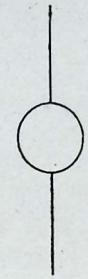


Fig. 20

De la misma índole es también la experiencia que consiste en apoyar un bastoncillo colocado horizontalmente sobre soportes muy frágiles y en romperlo de un golpe bien aplicado al medio, sin accidente para los soportes. Una multitud de fenómenos análogos, extraños a primera vista, se encuentran todos los días, pareciendo en contradicción absoluta con lo que hemos estudiado en la Estática. Esto depende de que, en cuanto los cuerpos no están en reposo, interviene un nuevo elemento: es la inercia de la materia. En Estática, jamás hemos hablado de inercia; esta propiedad de la materia no desempeña allí ningún papel; vamos, por el contrario, a verla ocupar un lugar de primer orden en la Dinámica, y por no tener cuenta de ella es por lo que ciertos resultados de experiencia parecen con frecuencia tan sorprendentes.

Nunca pondremos bastante en guardia a los principiantes contra esta fuente de errores, ni les repetiremos bastante que un resultado adquirido por el estudio de un cuerpo en reposo pierde todo su valor en cuanto este cuerpo se pone en movimiento.

Trabajo mecánico

La noción del trabajo mecánico, no solamente domina toda la Dinámica, sino que también ha trastornado la ciencia contemporánea, desde que se han descubierto sus diversas transformaciones. A pesar de su importancia, algunos experimentadores parecen no haberse percatado de sus elementos; es pues indispensable penetrarse bien de las condiciones en que se produce.

Supongamos que una fuerza obra sobre un cuerpo y que, merced a la influencia de esta fuerza, el cuerpo se desplaza; se dice que hay consumo de trabajo mecánico. Para que haya

consumo de trabajo mecánico son indispensables dos elementos:

1.º Una fuerza que obre sobre un cuerpo material.

2.º Un desplazamiento de este cuerpo material bajo la influencia de la fuerza.

Si una de estas condiciones llegase a desaparecer, no habría trabajo. Principalmente la segunda es la que parece haber sido omitida algunas veces y, no obstante, Poncelet ha insistido mucho sobre este punto, y ha hecho notar que una presión, por enérgica que sea, ejercida contra un muro fijo, no da lugar a ninguna producción de trabajo, ni más ni menos que un cuerpo pesado colocado sobre una mesa.

Evaluación del trabajo. — Consideremos un cuerpo que se desplaza bajo la influencia de una fuerza; las dos condiciones de producción del trabajo se realizan; ¿cómo evaluaremos el trabajo consumido? Es evidente que este trabajo aumenta en proporción a la fuerza, es decir, que si la fuerza se hace dos, tres, diez veces mayor, el trabajo, en las mismas condiciones de desplazamiento del cuerpo, se hace dos, tres, diez veces mayor, ya que se podría considerar cada fracción de fuerza como obrando por su propia cuenta, después obtener el total del trabajo obtenido.

En cuanto al camino recorrido, interviene de la misma manera, porque la fuerza tiene el mismo efecto durante el primer metro, por ejemplo, que durante todos los metros siguientes, y produce siempre el mismo trabajo por cada metro recorrido.

En consecuencia, el trabajo crece proporcionalmente a la fuerza y al camino recorrido; si se ha medido la fuerza y el camino con ayuda de medidas convenientes, el trabajo se obtiene mediante el producto de los números hallados.

En Francia, las fuerzas se evalúan en kilogramos, las longitudes en metros; si se tiene una fuerza de 1 kilogramo produciendo trabajo sobre un trayecto de 1 metro, el trabajo producido debe ser igual a la unidad. Esta unidad se llama kilográmetro.

Supongamos que una fuerza de 25 kilogramos se ejerce durante un recorrido de 4 metros; el trabajo producido será:

$$T = 25 \times 4 = 100 \text{ kilográmetros}$$

En lo que precede, la fuerza obra en la dirección del camino recorrido, el cuerpo se supone libre bajo la influencia de esta fuerza, pero ocurre con mucha frecuencia que no es así, sino que la fuerza es oblicua, con relación a la dirección de la propagación del cuerpo. Los ejemplos son frecuentes: basta mirar un barquichuelo empujado por un canal para ver que la dirección de la cuerda y, por consiguiente, de la fuerza, es oblicua con relación al camino seguido por el barquichuelo, o bien comparar la dirección del viento con el camino seguido por el batel para ver cuán lejos se está del paralelismo.

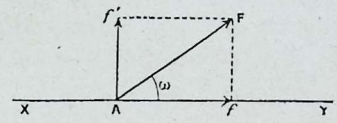


Fig. 21

En estas condiciones, hay que hacer una descomposición de fuerzas en otras dos: una paralela a la dirección del camino recorrido, la segunda perpendicular. Por ejemplo: en la figura, la fuerza F obra sobre el cuerpo A oblicuamente al camino recorrido XY. Se la descompone, según el método conocido, en f, obrando en la dirección de propagación, y f', perpendicularmente a esta dirección; f' no produce ningún trabajo, porque es evidente que si esta fuerza obrara sola, el cuerpo A, obligado a permanecer en XY, no bogaría. Es, pues, únicamente f la que hay que considerar, y cuando el cuerpo A ha recorrido una longitud de camino l sobre XY, el trabajo consumido para ello habrá sido

$$T = l \times f$$

Transformación del trabajo en fuerza viva

Acabamos de ver un cuerpo libre ponerse en movimiento bajo la influencia de una fuerza; hemos dicho que esta fuerza daba lugar a una producción de trabajo, pero existe otro punto muy importante que hay que considerar ahora. El cuerpo estaba en reposo; después de la producción de trabajo, está animado de una velocidad más o menos grande, según su peso, según la cantidad de trabajo suministrado. ¿Cómo están unidos entre sí estos elementos? Tomemos un ejemplo ideal.

que no es posible realizar rigurosamente, pero cuyos defectos pueden suplirse por la imaginación.

Sea un vagón idealmente móvil sobre los rieles, es decir, sin sufrir ninguna resistencia pasiva por parte del aire ni por el rozamiento de sus diferentes órganos. Este vagón está en reposo y vamos a procurar ponerlo en movimiento empujándolo delante de nosotros. Para esto habrá que ejercer un determinado esfuerzo, y, avanzando el vagón, consumiremos trabajo mientras que su velocidad irá aumentando. Habiendo adquirido este vagón velocidad, la conservará aunque cesemos de obrar sobre él; posee lo que se denomina *fuerza viva*.

La experiencia, aún la más grosera, permite apreciar que para comunicar a un vagón una determinada velocidad, es preciso consumir un trabajo tanto más considerable cuanto más pesado sea el vagón, es decir, cuanto mayor sea su masa.

Sólo un estudio, erizado de grandes dificultades, ha permitido a los mecánicos establecer la relación exacta que existe entre el trabajo consumido, la masa del cuerpo puesto en movimiento y la velocidad al final de la operación. Esta relación se expresa por la fórmula:

$$T = \tfrac{1}{2}\, mv^2.$$

El segundo término de esta igualdad representa lo que hemos llamado fuerza viva; esto es, la mitad de la masa del cuerpo multiplicado por el cuadrado de su velocidad. Bajo esta forma de fuerza viva es como el trabajo consumido se almacena en el cuerpo en movimiento, y allí permanece mientras una causa exterior no venga, según el principio de Newton, a modificar este estado de movimiento.

Puede ocurrir que un cuerpo posea ya una determinada velocidad v, y se desee aumentarla hasta llegar a otro valor v'; la fuerza viva pasará entonces de $\frac{1}{2}\, mv^2$ a $\frac{1}{2}\, mv'^2$ y para llegar a este resultado, se habrá consumido una cantidad de trabajo dado por:

$$T = \tfrac{1}{2}\, mv'^2 - \tfrac{1}{2}\, mv^2$$

Examinando con cuidado la fórmula que liga el trabajo con la fuerza viva, se concibe que, hasta en ausencia de toda resistencia, por efecto del solo hecho de la inercia, es necesario

realizar enormes esfuerzos para animar de alguna velocidad los cuerpos que tienen una gran masa; porque, por ejemplo, se separa con más dificultad de la vertical un péndulo pesado que un péndulo ligero y porque estos desplazamientos no pueden producirse bruscamente. Consideremos, en efecto, un tal péndulo en su posición de equilibrio; cuando queramos desplazarlo ligeramente para hacerle oscilar, no tendremos que vencer grandes resistencias procedentes de la atracción terrestre, que se ejerce según la vertical, en tanto que nuestro empuje será horizontal. El péndulo, separándose de la vertical, adquirirá cierta velocidad; si su masa es considerable, tendrá una gran fuerza viva cuya adquisición habrá exigido un gasto de trabajo, y por consiguiente una fuerza tanto mayor cuanto más importante sea la masa del péndulo. Se concibe también que cuanto más rápido se desee el desplazamiento, es decir, una gran velocidad, más considerables deberán ser el trabajo consumido y el esfuerzo realizado.

Transformación de fuerza viva en trabajo

Un vagón, lanzado por una vía horizontal, conservará su fuerza viva después que la fuerza exterior, que ha servido para ponerle en movimiento, haya dejado de obrar. Será inútil intentar detenerlo instantáneamente, resultarían choques, de los que más adelante hablaremos. Para hacerlo volver al reposo, será preciso aplicarle una fuerza en sentido contrario de su movimiento; esta fuerza procederá de un obstáculo colocado delante del vagón y arrastrado por él. El vagón ejercerá contra este obstáculo exactamente la misma fuerza que la que él recibe por su parte, según el principio de igualdad de la acción y de la reacción; por consiguiente, el vagón comunica trabajo al obstáculo, y hace un gasto a expensas de su fuerza viva. Se detendrá cuando haya utilizado toda esta fuerza viva, que se habrá transformado en trabajo mecánico, inversamente a lo que hemos visto precedentemente.

Si la fuerza así opuesta al vagón es pequeña, será preciso para detenerlo un trayecto muy largo; si es grande, este trayecto será pequeño; porque siendo la misma la cantidad de trabajo que ha de producir, es preciso que el producto de

la fuerza ejercida por el vagón contra el obstáculo, multiplicado por el desplazamiento de este obstáculo, tenga el mismo valor. Si una de estas cantidades disminuye, por compensación la otra debe aumentar en la misma proporción. Se concibe, desde luego, que ninguna fuerza, por grande que sea, podrá producir una parada instantánea; si el vagón tropieza con un obstáculo fijo, habrá un choque, y en el punto de contacto una deformación de los dos cuerpos permitirá al vagón, a pesar de la fuerza enorme que se opondrá a su movimiento, hacer un ligero recorrido, suficiente para consumir su fuerza viva bajo la forma de trabajo mecánico.

En todos los casos, observando con cuidado lo que pasa, podemos ver, desde que un cuerpo se pone en movimiento, que el trabajo se almacena bajo la forma de fuerza viva, después, durante el retorno al reposo, se produce la transformación inversa.

Uno de los ejemplos más claros de esta transformación se encuentra en las oscilaciones de un péndulo a uno y otro lado de la vertical que pasa por el punto de suspensión. Tomemos el péndulo *A* (fig. 22) suspendido en el punto *O* y separémosle en *A'* con un ángulo α, después, abandonémosle a sí mismo dejándole oscilar. Bajo la influencia de la pesantez, desciende de *A'* a *A;* durante todo este tiempo hay producción de trabajo mecánico; así vemos la velocidad del péndulo ir aumentando; es nula a partir de *A'*, alcanza su valor máximo en *A*. El trabajo ha producido fuerza viva. Pero sabemos también que, llegado a *A*, posición de equilibrio en donde ninguna fuerza tiende a desplazar el péndulo, este péndulo no se detendrá; continúa su camino con su velocidad adquirida y remonta hasta *A''* a una altura igual a la de *A'*. Durante el movimiento de *A* a *A''*, la atracción terrestre tiende a oponerse al desplazamiento del cuerpo, su velocidad va disminuyendo, su fuerza viva se anula poco a poco. Durante este tiempo, el péndulo ha gastado su fuerza viva. Se observa que en estas oscilaciones sucesivas del péndulo, hay siempre transformación de trabajo en fuerza viva mientras el péndulo se aproxima a la vertical, y transformación inversa mientras se aleja.

Es ahora fácil comprender por qué un hilo que soporta

un peso no se conduce lo mismo, cuando el peso produce una extensión progresiva que cuando es abandonado bruscamente a sí mismo.

Tomemos un hilo sujeto en *A* (fig. 23) a un punto fijo y que soporta en *B* un cuerpo pesado. Este hilo tiene siempre cierta elasticidad, se alargará por la tracción que sufre y el punto *B* vendrá a *B';* en este momento, el peso del cuerpo está equilibrado por la resistencia del hilo a la ruptura. Coloquemos la mano debajo del peso y elevémosle hasta *B,* después, abandonémosle bruscamente a sí mismo; hemos dicho que ocurre con frecuencia que el hilo se rompe. En efecto, pasando de *B* a *B',* la atracción terrestre sobre el cuerpo *B* es superior a la tracción ejercida por el hilo; el cuerpo *B* va, pues, durante este trayecto, a almacenar el trabajo bajo la forma de fuerza viva, llegará a *B'* con cierta velocidad, como el péndulo oscilante llega a la vertical. El cuerpo pesado no se detendrá en la posición de equilibrio *B',* la pasará hasta el punto *B'',* el trayecto *B'B''* da lugar a una transformación de la fuerza viva en trabajo. Se ve, por consiguiente, que el hilo *AB* sufrirá un alargamiento más considerable que cuando el cuerpo *B* es abandonado suavemente a sí mismo, podrá, pues, ocurrir que haya ruptura.

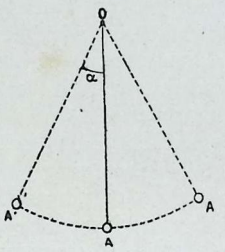


Fig. 22

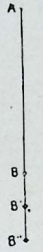


Fig. 23

¿Por qué en la experiencia de la esfera, es el hilo inferior el que se rompe cuando se le da una sacudida brusca? Cualquier fuerza que ejerza su acción sobre la esfera tiende a desplazarla, pero este desplazamiento exige cierto tiempo, la inercia de la esfera no es vencida instantáneamente, y el movimiento se produce con tanta menos rapidez cuanto más débil es la fuerza. Ahora bien; puede ocurrir, si la experiencia está bien conducida, que la sacudida necesaria para romper el hilo no produzca tracción suficiente para arrastrar la esfera con bastante rapidez; quedándose esta esfera atrás, el hilo que la

arrastra se rompe antes de haber producido un desplazamiento apreciable; el hilo superior no será, pues, extendido y resistirá.

Choque

Cuando, en lugar de detener un cuerpo en movimiento de una manera progresiva, haciéndole consumir suavemente el trabajo almacenado bajo la forma de fuerza viva, se le opone bruscamente un obstáculo, se produce un choque.

Hay que considerar dos casos, según que el obstáculo sea fijo o sea movible.

Supongamos, en primer lugar, el obstáculo fijo. En el momento del contacto del cuerpo móvil y del obstáculo, el cuerpo móvil estará sometido a la acción de una fuerza de dirección contraria a su movimiento de propagación; no se detendrá bruscamente, sino que, continuando su camino, resultará una deformación al contacto de los dos cuerpos. Habrá, pues, consumo de trabajo como en el caso de la detención progresiva del vagón; únicamente el camino recorrido será, en general, muy pequeño y, por consiguiente, las fuerzas al contacto de los dos cuerpos muy grandes.

Se producirán entonces diferentes fenómenos. Si los cuerpos en acción son blandos, o por lo menos lo es uno de ellos, su deformación será permanente. Supongamos, por ejemplo, que se da un martillazo sobre un trozo de plomo, el plomo se deforma, y esta deformación persiste.

Si el cuerpo no es blando, se deformará elásticamente, después, llegado a su máximo de deformación, si las fuerzas en acción no han traspasado ciertos límites, el cuerpo recobrará su forma primitiva, restituyéndose el trabajo de nuevo a fuerza viva, pero con una dirección inversa de la velocidad. Por ejemplo: una bola elástica cae de cierta altura sobre un piso rígido; en el momento del contacto, se deformará hasta que toda su fuerza viva se haya transformado en trabajo, después, tendiendo a recobrar su forma primitiva, reaccionará contra el suelo con una fuerza igual a la que ha sido necesaria para deformarla y rebotará a una altura igual a aquella de donde ha caído, si ninguna causa extraña trastorna el fenómeno. En otro caso, tomemos un cuerpo y lancémosle contra un

resorte; en el momento del contacto, el resorte se deformará con consumo de trabajo, después devolverá el proyectil en sentido inverso de su propagación primitiva: se puede decir que el resorte almacena la fuerza viva bajo forma de trabajo para devolverla tras el golpe.

Los ejemplos de choques de esta naturaleza abundan; bastará citar la pelota de los niños o el billar. Pero cuando ocurre que el choque es violento, o que los órganos chocados no están construídos para este uso, los límites de elasticidad son traspasados y se llega a la ruptura.

Compréndese ahora por qué es imposible decir cuál es la fuerza producida por el choque de un cuerpo, aún conociendo su masa y su velocidad; esta fuerza depende de las condiciones de resistencia entre el cuerpo chocado y el cuerpo chocante. Si uno de estos cuerpos al menos, es relativamente fácil de deformar, el camino recorrido por el móvil durante el choque será grande y el esfuerzo ejercido débil. Si este mismo cuerpo móvil encuentra un cuerpo más rígido, el esfuerzo será mayor y el camino recorrido más pequeño. Resulta la siguiente observación, paradójica, a primera vista, que, cuando un cuerpo que choca ha tropezado con un obstáculo, la extensión del estrago apreciado después del choque es tanto mayor cuanto más pequeño es el esfuerzo ejercido al contacto de los dos cuerpos.

En resumen; cuando ocurre un choque, puede decirse que se ha gastado un trabajo de un número dado de kilográmetros; pero del trabajo almacenado, es absolutamente imposible deducir la fuerza que se ha producido en el momento del choque; un problema así planteado, no tiene ningún sentido.

En el caso de ser el cuerpo chocado el movible, la fuerza viva del cuerpo chocante sirve para las deformaciones en el punto del contacto, como en el caso precedente; pero, además, se transmite en parte al cuerpo chocado, que toma cierta velocidad.

Los efectos del choque sobre el cuerpo chocado se dividen, pues, en efectos locales, destructores o no, según la constitución de la materia de los cuerpos, y en efectos de proyección. La distribución entre éstos depende de la masa de los cuerpos en juego.

Veamos ahora lo que pasa cuando la masa del cuerpo cho-

cado varía. Para esto, supongamos, bien entendido que el choque viene siempre de un mismo cuerpo animado de la misma velocidad. El cálculo y la experiencia hacen ver que cuando la masa del cuerpo chocado aumenta, los efectos destructores locales aumentan, es decir, que si el choque recae sobre un cuerpo muy pequeño, este cuerpo será vivamente proyectado en el sentido del choque, pero sin deformación sensible. Si, por el contrario, este cuerpo chocado tiene una gran masa, se desplazará muy poco, tanto menos cuanto más pesado sea; pero en el punto de contacto del choque habrá una deformación tanto mayor. He aquí un ejemplo de este hecho: tomemos un martillo y golpeemos diversos cuerpos; veremos que clavos pequeños penetrarán fácilmente en la madera sin deformarse; que un choque horizontal contra una pequeña bola, la proyecta sin lesionarla. Pero a medida que tomemos clavos o cuerpos más gruesos, veremos que los clavos se hunden con más dificultad empleando el mismo martillo, que su cabeza se deforma más rápidamente y que queriendo proyectar por choque piedras cada vez más gruesas, como se hacía antes con las pequeñas bolas, se desplazan cada vez con mayor dificultad y acaban hasta por quebrarse antes de entrar en movimiento.

Naturalmente, vamos a observar lo inverso si, pasando del cuerpo chocado al cuerpo chocante, hacemos variar la masa de este último.

Cuando la masa sea pequeña, los efectos de proyección serán igualmente pequeños, los efectos del contacto relativamente grandes; si la masa aumenta, los efectos de proyección aumentarán también con relación a los efectos del contacto. Así, para clavar un clavo, da buenos resultados el empleo de un martillo pesado; un martillo ligero deformará la cabeza del clavo antes de clavarlo; pero será ventajoso para remachar. De la misma manera, cuando se quieren clavar estacas con punta por medio del ariete, un ariete ligero deforma las cabezas de las estacas; un ariete pesado permite, por el contrario, clavarlas impunemente, son empujadas delante de él.

En resumen; siempre que se quiera proyectar un cuerpo, será preciso golpearlo con un cuerpo pesado; si se quiere producir en él una deformación local, hay que golpearlo con un cuerpo ligero. Dicho de otro modo: para derribar un muro es necesario un proyectil pesado; para perforarlo, un proyectil ligero y rápido.

Hemos visto anteriormente que cuando ocurren choques entre cuerpos imperfectamente elásticos, se producían deformaciones permanentes, absorbiendo el trabajo sin transformarlo en fuerza viva; por consiguiente, siempre que cuerpos yuxtapuestos deban servir para transmitir el trabajo, hay que evitar estos choques. Supongamos, por ejemplo, un tiro que arrastra un coche; la tracción no es jamás continua, si los choques que resultan dan lugar a deformaciones permanentes, una parte del trabajo proporcionado por el tiro es convertido en pura pérdida. Si, por el contrario, las ataduras son elásticas, bajo la influencia de una tracción brusca se alargarán, almacenarán trabajo, que devolverán bajo la forma de fuerza viva por una tracción suave sobre el vehículo. Estos hechos, sometidos a la experiencia por Marey, han recibido una confirmación brillante; en toda transmisión de trabajo, es preciso evitar en absoluto los choques bruscos. La importancia de este hecho será todavía mejor comprendida después de la lectura del párrafo dedicado a la elasticidad de los cuerpos.

Roce

Estudiando la transformación del trabajo en fuerza viva, hemos visto que todo el trabajo consumido debería encontrarse íntegramente bajo forma de fuerza viva. Esta ley parece no cumplirse con frecuencia. Acabamos de ver que el choque entre cuerpos blandos da lugar a una desaparición de fuerza viva sin que sea posible almacenar el trabajo correspondiente, como ocurre en el choque entre cuerpos elásticos, y utilizarlo ulteriormente.

De la misma manera, cuando una fuerza desplaza un cuerpo sometido a ciertas resistencias, ocurre que todo el trabajo consumido no se vuelve a encontrar en fuerza viva equivalente. Esto es lo que ocurre, por ejemplo, en los casos de roce.

Tomemos el caso más sencillo. Sea una fuerza horizontal que cambia de su lugar un cuerpo colocado sobre una mesa. Si el cuerpo estuviera absolutamente libre, tomaría una velocidad y una fuerza viva creciente y, sin embargo, no ocurre así. A consecuencia del roce, la velocidad se limita a un valor en relación con la magnitud de la fuerza y permanece constante aunque la fuerza continúe obrando. Hay, por lo tanto, pérdida de cierta cantidad de trabajo. Veremos en qué se convierte este trabajo a propósito de lo que se denomina equivalencia mecánica del calor.

¿De qué elementos depende esta resistencia de roce? La experiencia ha hecho ver que varía con la naturaleza de las superficies de contacto, y con la magnitud de la fuerza que aplica una contra otra las dos superficies frotantes. Esta fuerza se denomina reacción normal. Tomemos dos cuerpos de naturaleza determinada, apliquémosles el uno contra el otro y realicemos un deslizamiento; la fuerza necesaria para producir este deslizamiento será proporcional a la reacción normal N entre los dos cuerpos, *sea la que fuere la extensión de las superficies en contacto*. Para cada especie de cuerpos será necesario, para tener la resistencia al deslizamiento, multiplicar N por determinado número α dado por la experiencia y llamado coeficiente de rozamiento.

Por ejemplo: el coeficiente de rozamiento de la madera sobre la madera es 0,36; si dos trozos de madera son aplicados uno contra otro por superficies planas con una fuerza de 10 kilogramos, el esfuerzo necesario para hacerlos deslizar uno sobre otro será $10 \times 0{,}36 = 3{,}6$ kilogramos. ¿Qué va a ocurrir cuando una fuerza sea aplicada a un cuerpo, no ya absolutamente libre, sino sujeto a deslizarse sobre otro cuerpo fijo? Será preciso, evidentemente, restar de la fuerza operante la fuerza resistente pasiva, debida al roce. Ocurrirán diversos casos. Sea f el valor del rozamiento, si la fuerza operante no alcanza a f, el cuerpo permanecerá en reposo. Si tiene un valor F superior a f, el cuerpo tomará un movimiento uniformemente acelerado bajo la acción de una resultante F-f. Si, en un momento dado F se hace igual a f, el movimiento del cuerpo será uniforme a partir de este momento, la fuerza F no comunicará al cuerpo ninguna aceleración, todo el trabajo

que produzca será absorbido, a medida que se engendra, por el rozamiento cuya fuerza está dirigida en sentido contrario a F.

Hay que añadir que el coeficiente del rozamiento no depende solamente de la naturaleza de los cuerpos, y cuando, antes, he dicho que los coeficientes de rozamiento de la madera sobre la madera era de 0,36, esto quería decir que era supuesto tal en las condiciones de la experiencia. Es evidente, en efecto, que el estado de las superficies tiene una importancia capital: dos trozos de hierro acabados de salir de la fundición no se deslizarán el uno sobre el otro como lo harán después de pulidos. Además, es bien sabido que, introduciendo entre los dos cuerpos que rozan un tercer cuerpo llamado lubrificante, se modifican completamente las condiciones de deslizamiento. Los números consignados en las tablas de coeficientes, no se aplican más que al caso de la experiencia por medio de la que han sido determinados, y no pueden dar más que una aproximación para los otros casos, con la condición de colocarse en lo posible en las condiciones de la primera determinación.

No es sólo el rozamiento de deslizamiento el que se encuentra como resistencia pasiva; tenemos, además, otras causas muy importantes, entre las que se encuentran el rozamiento de rodadura y la resistencia de los flúidos.

Cuando un cuerpo redondo, cilindro, esfera, etc., rueda sobre un plano, por ejemplo, a primera vista no se ve de dónde puede venir una resistencia pasiva; es, no obstante, de experiencia corriente que, una bola lanzada sobre el plano más perfecto acaba por detenerse, más o menos pronto, según la naturaleza de las superficies.

Reflexionando sobre este hecho, es evidente que, a consecuencia del peso del cuerpo que rueda, se produce en la superficie del plano una pequeña depresión momentánea. Ningún cuerpo sólido es absolutamente rígido, y la esfera que comprime el plano en un punto, se escava, por decirlo así, un pequeño hueco en cuyo fondo reposa.

Si la bola llega a rodar, se encuentra sin cesar delante de sí un pequeño talud que está obligada a subir aplastándolo; por consiguiente, produce trabajo consumiendo su fuerza viva; acaba por pararse, si está libre. Si está sometido a la

acción de una fuerza actuante, esta fuerza debe consumir sin cesar trabajo absorbido a medida que avanza por el rozamiento de rodadura, para sostener el movimiento.

Es imposible dar para el rozamiento de rodadura leyes generales como las que hemos dado para el rozamiento de deslizamiento. No es solamente la naturaleza de las superficies la que interviene en la rodadura, sino también su forma. A pesar de las numerosas experiencias hechas en este sentido, es preciso, en cada caso particular, determinar las fuerzas pasivas debidas a la rodadura.

Máquinas

Existe cierto número de dispositivos conocidos con el nombre de máquinas. Estas máquinas están destinadas a transformar el trabajo mecánico. Se demuestra, en efecto, que en todas las transformaciones que puede sufrir el trabajo de estos dispositivos, su valor permanece constante, abstracción hecha de las resistencias pasivas, como los rozamientos. Podrá ocurrir que con ayuda de débiles esfuerzos se produzcan fuerzas enormes, o que el pequeño cambio de lugar de un órgano determine un movimiento de una amplitud considerable; pero, de todos modos, evaluando el trabajo mecánico suministrado a la máquina y el que rinde, se encontrará siempre el mismo valor. La lectura de lo que sigue aclarará esta proposición.

El número de máquinas usadas en mecánica aplicada es en extremo considerable, pero la mayor parte de ellas no tienen ningún interés para la mecánica animal. Nos contentaremos con describir aquellas que puedan tener aplicación en el estudio del cuerpo del hombre y de los animales. Estas máquinas simples son las poleas, la palanca y la cuña.

Polea. — En las tracciones por medio de cuerdas ocurre con frecuencia que la fuerza no se puede ejercer en la dirección que hay que hacer recorrer al cuerpo; así ocurre, por ejemplo, cuando se quiere elevar un peso a una altura mayor que aquella en que uno se encuentra. Se repliega entonces la cuerda alrededor de un punto fijo y es fácil concebir cómo se transforma el movimiento.

Adoptando este procedimiento sencillo, resulta, en el sitio de la vuelta, un rozamiento considerable y un desgaste de la cuerda. Se evitan estos inconvenientes por medio de la polea. Está demostrado, no obstante, que el rozamiento no está así más que disminuído, porque subsiste el rozamiento del eje y una resistencia especial que se denomina rigidez de la cuerda. Se aprecia, en efecto, por la experiencia que, queriendo le-

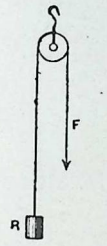


Fig. 24

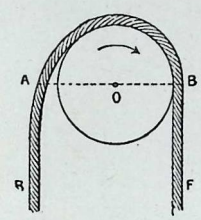


Fig. 25

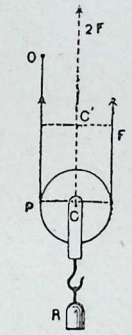


Fig. 26

vantar el mismo peso R con ayuda de la misma polea, es necesario emplear fuerzas diferentes según la cuerda empleada. Un examen, aun grosero, hace ver que F es tanto mayor cuanto más rígida es la cuerda; por eso las cuerdas nuevas exigen más fuerza que las viejas. Esto depende de que, a consecuencia de su rigidez, las cuerdas no se aplican exactamente sobre la polea; al principio del contacto, la distancia AO (fig. 25) es mayor que BO, y como en la rotación de la polea, las fuerzas F y R intervienen por el momento con relación al punto O, F debe ser tanto más grande cuanto mayor es AO, es decir, cuanto más rígida es la cuerda.

Además de estos rozamientos, que se pueden disminuir mucho engrasando bien el eje y tomando una cuerda flexible, la fuerza motriz se transmite íntegramente; el efecto sobre la cuerda resistente es sensiblemente el mismo que si la tracción se hiciese directamente.

Pero la polea puede emplearse de diferente modo; en efec-

to, invirtámosla y hagamos fijo uno de los extremos O de la cuerda (fig. 26); la tracción F se hace de abajo arriba, y el peso que hay que elevar, R, está colgando de la polea.

Abstracción hecha de los roces, el trozo de cuerda PO está sometido a una fuerza F, como hemos dicho anterior-

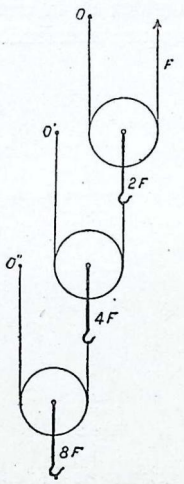


Fig. 27

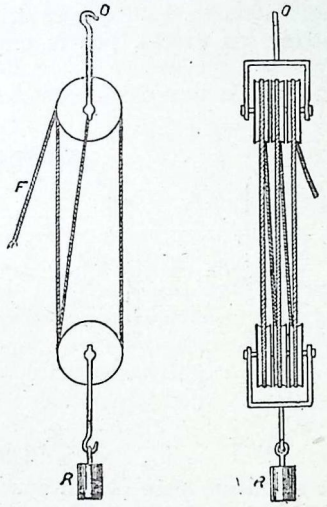


Fig. 28

mente. Sabemos que la resultante de estas dos fuerzas F les es paralela e igual a $2F$; esta fuerza $2F$ es la que equilibra el peso R.

Por consiguiente, con ayuda de esta disposición se puede elevar un peso sensiblemente doble que la fuerza motriz. No se puede ver allí ni pérdida ni ganancia de trabajo; el trabajo suministrado por F debe transmitirse íntegramente a R; por consiguiente, como R tiene un valor doble que F, el camino recorrido por R debe ser la mitad del recorrido por F. Es fácil de ver en la figura que, para elevar el centro C de la polea de C a C', hay que hacer recorrer a la fuerza un camino de $2CC'$. Esto se expresa diciendo que lo que se gana en fuerza se pierde en camino recorrido.

Si se dispone de una fuerza considerable y se desea, al

contrario del caso precedente, ganar camino, se invierte el aparato aplicando la fuerza motriz F a la polea y suspendiendo R al cabo de cuerda libre.

Puédese también no limitarse a una sola polea móvil, sino servirse de la primera para ejercer una tracción sobre el cabo libre de una segunda polea, y así sucesivamente; cada polea tendrá por efecto doblar la fuerza, disminuyendo en la misma proporción el camino recorrido.

Así, la figura 27 representa una asociación de tres poleas; esta disposición basta para desarrollar una fuerza ocho veces mayor que la fuerza motriz. Concíbese cuán considerables son las fuerzas que se pueden obtener así.

Esta combinación es un poco molesta; existe otra en la que sólo hay un punto fijo, todas las poleas están montadas sobre dos ejes, pero no permite multiplicar la fuerza tan rápidamente como por el método precedente.

Tomemos, por ejemplo, el caso de la figura 28; hay tres poleas en el eje superior y tres en el inferior. La cuerda está sujeta al gancho fijo O, de allí va a pasar por la primera polea inferior, después por la primera superior, la segunda inferior y la segunda superior, etc.; finalmente, el extremo libre parte de la tercera polea superior. Supongamos que sobre este extremo libre se ejerce una tracción F; esta tracción se transmite a cada cuerda; como hay seis, tantas como poleas, la resultante de todas estas fuerzas dirigidas de abajo arriba es $6F$. Por consiguiente, se puede, mediante este procedimiento, multiplicar la fuerza por el número de poleas empleado. Esta combinación es conocida con el nombre de motón o polipastos.

Hasta ahora hemos supuesto que el cabo motor y el resistente eran paralelos para la polea fija; nada varía cuando esto no ocurre; la transmisión de fuerza se realiza siempre integralmente. En el caso de la polea móvil, ocurre lo mismo desde el punto de vista de la transmisión de la fuerza del extremo motor al extremo fijo, pero la resultante de estas dos fuerzas, y, por consiguiente, el peso que es posible elevar, no es igual a su suma; mirando la figura 29, se ve que no se trata de una composición de fuerzas paralelas, sino de fuerzas concurrentes en un punto. Basta, para encontrar la resultante, transportar las dos fuerzas F a un mismo punto, por ejemplo, sobre el

eje de la polea, y de construir el paralelogramo de las fuerzas según el método conocido; se ve entonces que la resultante no es jamás igual al doble de F, y que lo es tanto menos cuanto más oblicuos son los cabos.

Esta disposición se emplea con frecuencia en sentido inverso cuando se trata de ejercer, por medio de una cuerda tensa, un esfuerzo muy considerable. Sea una cuerda tensa

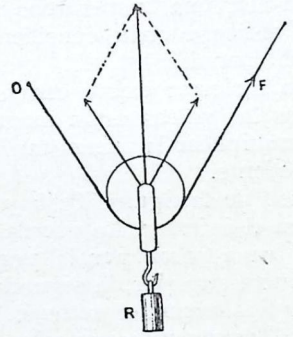


Fig. 29

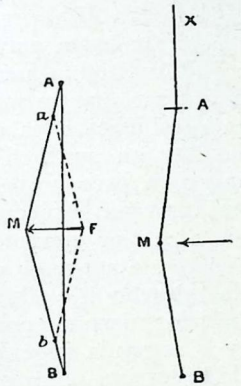


Fig. 30

entre dos puntos A y B (fig. 30); aun sin emplear la polea, ejerzamos sobre la cuerda, en las inmediaciones de su medio M, un esfuerzo F perpendicular a la cuerda, esta cuerda va a tenderse más y, para ver cuál es la tracción que sufrirá así, basta descomponer F en dos fuerzas dirigidas según los dos cabos, es decir, trazar por la extremidad de F dos paralelas a los dos cabos. Se tienen así las dos componentes aM, bM, y basta mirar la figura para ver que son tanto más grandes cuanto menos desplazada está la cuerda, es decir, cuanto más tensa estaba ya. He aquí cómo se aplica en la práctica este principio: Se hace pasar la cuerda que se quiere tender por un anillo A, y, ejerciendo una tracción tan considerable como sea posible, se la sujeta en B. Basta en seguida ejercer en M un esfuerzo transversal para producir una tracción muy considerable sobre AX.

Palanca. — La palanca se compone esencialmente de una pieza rígida, que supondremos rectilínea, por ejemplo, de un bastón o de una barra de hierro. Este vástago se apoya por uno de sus puntos sobre un soporte fijo A llamado *apoyo*. En otro punto, R, se encuentra la *resistencia* que hay que vencer. Por último, en P se ejerce la fuerza operante, que se denomina *potencia*.

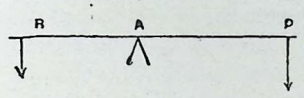


Fig. 31

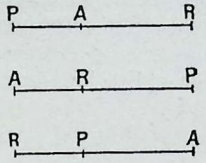


Fig. 32

Se ve inmediatamente que en el caso de la figura la fuerza P desplazará el punto R de abajo arriba si el punto A está fijo.

Se ha establecido una clasificación en las palancas según las posiciones respectivas de los tres puntos A, P, R, y se han distinguido palancas de primero, de segundo y de tercer género.

En la palanca de primer género, el punto de apoyo se encuentra entre la potencia y resistencia. En el de segundo género, la resistencia se encuentra en el punto intermedio y en el tercer género este punto está ocupado por la potencia (figura 32). Desde el punto de vista mecánico, esta distinción no tiene, en realidad, ningún interés. Lo que importa en cada caso es saber qué resistencia se puede vencer con ayuda de una potencia dada, P. Esto equivale a buscar qué resistencia equilibra a la potencia, o en qué condiciones estas dos fuerzas tienen el mismo momento con relación a un punto fijo.

Llamemos p la distancia de la potencia al punto fijo, r a la distancia de la resistencia, expresemos que los dos momentos son iguales, tendremos:

$$Pp = Rr,$$

o bien:

$$\frac{P}{R} = \frac{r}{p}$$

es decir, que las fuerzas están en razón inversa de su distancia al punto fijo. Se expresa esto diciendo que cuanto más largo es el brazo de la palanca, menos grande es la fuerza correspondiente; si se duplica un brazo de palanca, se puede reducir a la mitad la fuerza y obtener el mismo efecto. Pero, naturalmente, cuando se trata de desplazar el punto de aplicación de la resistencia en determinada cantidad, por ejemplo, elevar un peso a cierta altura, cuanto menor es la fuerza que se emplea, mayor es el desplazamiento que hay que hacer sufrir al punto de aplicación de esta potencia.

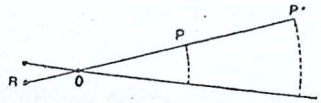


Fig. 33

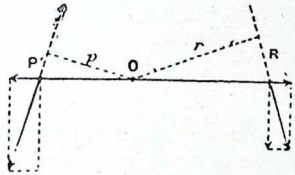


Fig. 34

Así, en el caso de la figura 33, hemos representado dos posiciones de una palanca. Para elevar el peso R, se podrá emplear la fuerza P o una fuerza la mitad menor P'; pero, para obtener el mismo desplazamiento de R, P' deberá recorrer un camino doble que P. Es el mismo principio de transmisión integral del trabajo el que se aplica; para producir el mismo trabajo en R, el producto de P por el camino que recorre debe siempre ser el mismo.

En general, como hemos supuesto en las figuras, las palancas son rectilíneas y las fuerzas perpendiculares a la palanca; pero estas dos condiciones pueden encontrarse cambiadas.

Puede ocurrir, ante todo, que las fuerzas tengan una dirección cualquiera con relación a la palanca (fig. 34). El equilibrio se obtiene también tomando los momentos de las dos fuerzas con relación al punto de apoyo fijo, es decir, no contando las longitudes p y r sobre la palanca, sino tomando para estos valores las perpendiculares bajadas desde O sobre las fuerzas. También se puede convertir este caso en el precedente descomponiendo cada fuerza en otras dos, una dirigida según

la palanca, que no producirá ninguna rotación, porque pasará por el eje; otra, perpendicular a la palanca, que es la única que se tomará en consideración.

Lo mismo se hará con cualquier clase de palanca (fig. 35); se anotará que los elementos Rr y Pp de las dos fuerzas con relación al punto O son iguales, tomando por p y r las perpendiculares bajadas desde el punto fijo a las fuerzas R y P. O bien, lo que quizá sea más cómodo en ciertos casos, se descompondrán las fuerzas R y P en otras dos, dirigidas, una, según el brazo de la palanca correspondiente, y la otra, perpendicularmente a este brazo de palanca.

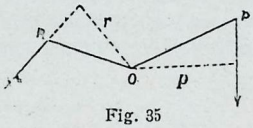


Fig. 35

Cuña. — La cuña es un cuerpo sólido terminado por dos planos inclinados AB y AC (fig. 36), que se introduce a la fuerza entre dos cuerpos resistentes R y R', para separar uno de otro.

En el punto de contacto de la cuña con los dos cuerpos R y R', esta cuña sufre de parte de estos cuerpos reacciones f y f' normales a las superficies AB y AC. La resultante de f y f' debe equilibrar a F. Tendremos, en consecuencia, el valor de f y de f', tomando una longitud, OF, paralela e igual a F (fig. 37), después trazando dos líneas OX y OY, paralelas a f y f' de la figura precedente. Basta en seguida dirigir por la extremidad F de OF dos líneas Ff y Ff', completando el cuadrilátero, como resulta de la ley de composición y de descomposición de fuerzas, para tener el valor de las reacciones f y f' de los cuerpos R y R' contra la cuña. Es evidente que estas reacciones son iguales a las acciones que la cuña ejerce sobre los cuerpos R y R' para separarlos uno de otro.

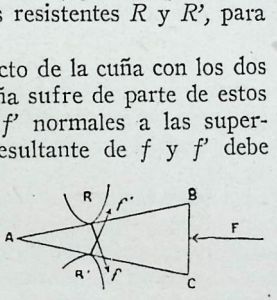


Fig. 36

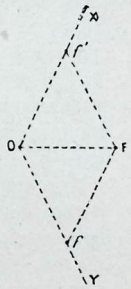


Fig. 37

Se ve inmediatamente que, tomando una misma fuerza F,

f y f' son tanto más grandes cuanto más abierto es el ángulo fOf', es decir, que el ángulo ABC de la cuña es más pequeño.

Con un ángulo BAC pequeño, se puede llegar a desarrollar esfuerzos enormes; pero aquí también se pierde en camino recorrido lo que se gana en fuerza. Basta, en efecto, mirar la figura, para ver que con una cuña de pequeño ángulo será preciso, para obtener la misma separación de R y R', hacer avanzar la cuña tanto más cuanto menor sea este ángulo A.

II. — Densidades

Densidad de los sólidos y líquidos. — La densidad de un sólido o de un líquido es la relación entre el peso de cierto volumen de este sólido o de este líquido y el peso del mismo volumen de agua. Dicho de otro modo: la densidad de un sólido o de un líquido indica cuántas veces este sólido o este líquido pesa más que el mismo volumen de agua. Si se quiere saber, pues, el peso de un cuerpo, se ve cuánto pesa el mismo volumen de agua y se multiplica este peso por la densidad del cuerpo.

Por otra parte, si se quiere tener la densidad de un cuerpo, se averigua su peso, lo que es fácil, y se determina el peso del mismo volumen de agua. Dividiendo el uno por el otro, se tiene la densidad.

Los tratados de Física general indican cómo se realizan estas operaciones. Cuando se ha pesado un cuerpo sólido (primera operación), para averiguar el peso de un volumen igual de agua (segunda operación), se sumerge el cuerpo en el agua y se busca cuál es su pérdida de peso aparente mientras está sumergido. El principio de Arquímedes nos enseña que esta pérdida de peso es igual al peso del volumen de agua desalojado por el cuerpo.

Para los líquidos se mide determinado volumen del líquido sometido a la experiencia, por medio de un vaso graduado y se pesa este volumen. Después se repite la misma operación con el agua.

Existen aparatos denominados densímetros o areómetros que permiten determinar rápidamente la densidad de un líquido por una simple lectura. He aquí cómo están dispuestos

los que se utilizan generalmente en Medicina. Consisten en un flotador de vidrio de la forma representada en la fig. 38, lastrado en su parte inferior de modo que al flotar en los líquidos, tome la posición vertical. Estos areómetros se sumergen hasta un nivel determinado del vástago, variable según la densidad del líquido sobre que se opera. En efecto, el peso del instrumento es constante; debe, pues, sumergirse hasta que el líquido por él desplazado sea igual a su propio peso, es decir, que debe hundirse tanto más cuanto menos denso es el líquido. Basta entonces hacer sobre el tallo una graduación correspondiente a las diversas densidades para poder, cuando se haga una experiencia, conocer esta densidad mediante una simple lectura.

Fig. 38

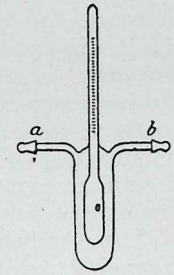


Fig. 39

Para poseer instrumentos sensibles, el tallo no debe tener gran diámetro, con el fin de que sea necesaria una variación de nivel muy grande para producir una variación dada de volumen de inmersión. Cuanto menor diámetro tenga el tallo de un areómetro, tanto más sensible será el aparato. De aquí resulta que, para no tener areómetros con el vástago muy largo, es preciso disponer de una serie de aparatos dispuestos de tal modo que cada uno de ellos no sea aplicable más que para una variación muy limitada de la densidad. Lo mismo ocurre con los termómetros; para tener los grados bastante separados, se está obligado a limitar la escala de temperatura en la que un termómetro puede ser empleado.

Se fabrican instrumentos basados en este principio y destinados a las medidas de densidades próximas a las de la orina normal; llevan el nombre de pesaorinas; de la misma manera se hacen pesaleches, para las densidades aproximadas de la leche, etc.

La densidad de la orina normal, es aproximadamente de 1.018. Los pesaorinas están graduados, generalmente, de 1.001 a 1.040, porque entre estos límites varía la densidad de la orina.

En ciertos casos especiales, por ejemplo, para estudiar las mezclas de alcohol y de agua, en lugar de practicar sobre el tallo una graduación que dé la densidad, se hace la graduación en riqueza alcohólica; se puede entonces leer directamente la titulación de un licor en alcohol. Para esto es preciso, claro está, que no contenga más que alcohol y agua, porque únicamente en este caso a una misma densidad corresponde un mismo valor en la solución; la presencia de cualquier materia extraña falsearía completamente las indicaciones del instrumento. En este caso se tiene un pesaalcohol o alcohómetro. De la misma manera se pueden construir pesaácidos, que dan la riqueza de un líquido en tal o cual ácido.

Los areómetros de Baumé, Cartier, etc., son instrumentos de la misma índole, que no se diferencian unos de otros más que por la graduación, como se diferencian los termómetros centígrado, Réaumur, etc. Tablas especiales dan la correspondencia de estos diversos instrumentos.

Como los líquidos se dilatan bajo la influencia de la temperatura, es necesario tener en cuenta esta influencia en las mediciones delicadas. Puede, en ese caso, utilizarse con ventaja un *picnómetro*. Este es un reservorio de cristal, provisto de dos tubos tapados por un sombrerete esmerilado y que contiene la bola de un termómetro (fig. 39). Se llena el aparato del líquido que se desea estudiar, introduciendo en él uno de los tubos, *a*, por ejemplo, y aspirando por *b*. Se pesa el todo y se lee la temperatura. Una tabla especial, arreglada de una vez para siempre, da la densidad del líquido correspondiente a los diversos pesos del instrumento para las diferentes temperaturas.

Advertencia sobre las densidades. — Si, para tomar la densidad de un sólido o de un líquido se opera sobre 1 cm.^{3} de cuerpo, el peso del mismo volumen de agua será 1 gr., la densidad del cuerpo estará, pues, expresada por la misma cifra que el peso en gramos del centímetro cúbico del cuerpo. Así, si la densidad del cuerpo es 7, 8, esto querrá decir que el centímetro cúbico de cuerpo pesa 7 gr., 8 dgr. El mismo razonamiento puede hacerse sobre los decímetros cúbicos: el cuerpo pesará entonces 7 kg. 8 por dcm.^{3}, y así sucesivamente.

Este resultado tan sencillo se ha conseguido gracias a la elección de las unidades francesas y del cuerpo con relación al cual se toma la densidad. Veremos que para los gases no ocurre lo mismo.

III. — Elasticidad

Todos los cuerpos de la naturaleza, sea cual fuere su rigidez, pueden ser deformados mediante la acción de fuerzas exteriores. Según los casos, estas fuerzas deberán ser más o menos poderosas; un esfuerzo insignificante es suficiente para doblar una lámina de caucho, en tanto que, para obtener el mismo resultado en una barra de acero, es necesario desplegar una fuerza considerable.

Los cuerpos no difieren entre sí únicamente por su mayor o menor resistencia a la deformación, sino también por la facultad que tienen de recobrar su forma primitiva cuando la fuerza exterior ha cesado de obrar. Una lámina de plomo se dobla mediante un pequeño esfuerzo, y la flexión así obtenida será persistente. La cera de modelar presenta el mismo fenómeno en un grado mayor; es uno de los ejemplos más perfectos de lo que se denomina un *cuerpo blando,* es decir, de un cuerpo en que toda deformación es permanente. Si se repite la misma experiencia en un trozo de caucho, o en una pieza de acero convenientemente templado, se aprecia que estos cuerpos recobran completamente su forma primitiva cuando las fuerzas exteriores cesan de obrar; se dice entonces que son *perfectamente elásticos.*

En realidad, como veremos más adelante, no existen ni cuerpos perfectamente blandos ni cuerpos perfectamente elásticos y, si encontramos en la naturaleza un cuerpo que se aproxime a este estado ideal, no es más que excepcionalmente. Puede verse, en efecto, que, aun en la cera blanda, cuando las deformaciones son pequeñas, existe un vestigio de elasticidad, una barra de cera ligeramente doblada, tiene tendencia a enderezarse. Por el contrario, un cuerpo como el caucho, dotado en apariencia de una elasticidad perfecta, es susceptible de conservar pequeñas deformaciones permanentes.

En la mayor parte de los cuerpos de la naturaleza, estos dos fenómenos, tendencia a recobrar la forma primitiva y persistencia de una deformación permanente, se muestran simultáneamente, predominando el uno o el otro, según las condiciones de la experiencia.

Tomemos una barra de cobre: no doblándola más que muy ligeramente, se enderezará perfectamente; pero si, por un esfuerzo enérgico la curvamos en gran manera, permanecerá deformada como lo haría una barra de plomo. Lo mismo sucede con todos los cuerpos: dentro de ciertos límites de deformación, son perfectamente elásticos, pero cuando esta deformación se hace demasiado grande, se convierte en más o menos permanente. Se dice entonces que se ha rebasado el límite de elasticidad.

Hasta aquí no hemos considerado más que el cambio de forma de los sólidos, porque son los únicos cuerpos que tienen una forma propia; pero los líquidos y los gases pueden también manifestar su elasticidad cuando se intenta modificar su volumen.

Tomemos primero los gases, y, para puntualizar, supongamos que hemos encerrado un determinado volumen de aire en un cuerpo de bomba perfectamente cerrado por un pistón; sabemos que el aire tomará la forma interior del cuerpo de bomba, en el que se esparcirá uniformemente; si bajamos el pistón, el volumen de aire se reducirá; pero, en virtud de su elasticidad, recobrará su valor primitivo en cuanto la fuerza cese de obrar.

La misma experiencia puede hacerse con un líquido; bastará para esto llenar completamente un cuerpo de bomba de agua no dejando ninguna burbuja de aire.

Se patentiza así que los líquidos y los gases tienen, cuando se quiere reducir su volumen, una elasticidad perfecta, no se les puede hacer sufrir una deformación permanente, el volumen recobra siempre el mismo valor cuando la presión vuelve a ser la misma de antes.

Entre la compresión de los gases y de los líquidos existe siempre una gran diferencia. Los primeros siguen, como se sabe, la ley de Mariotte: sin esfuerzo exagerado se puede disminuir considerablemente su volumen. No ocurre lo mismo

con los líquidos, para los que las reducciones de volumen, aún ligeras, exigen fuerzas de compresión enormes.

Para los sólidos, se puede también, desde el punto de vista experimental, procurar reducir su volumen. Como para los líquidos, es necesario desplegar grandes esfuerzos, y se nota que, después de la experiencia, subsiste una reducción de volumen permanente más o menos acentuada. En la práctica, la elasticidad de los sólidos interviene principalmente de un modo interesante en las modificaciones de forma, sin cambio de volumen, que pueden sufrir por tracción, torsión, flexión o cualquier otro cambio de forma.

Consideremos, ante todo, el caso de una tracción ejercida sobre una barra prismática o cilíndrica. Esta barra, colocada verticalmente, estará sólidamente sujeta en su extremidad superior; la alargaremos, por ejemplo, suspendiendo pesos en su extremidad inferior.

Cuando la barra cuelgue libremente, tendrá una longitud L y una sección S. Si el peso tensor es P, la experiencia demuestra que el alargamiento lo dará la fórmula $l = \frac{LP}{ES}$, lo que es fácil traducir al lenguaje ordinario. Significa que el alargamiento de una barra sometida a la tracción es proporcional al peso tensor P. La longitud de la barra interviene de la misma manera, lo que se concibe fácilmente; sufriendo evidentemente la misma acción, cada una de las unidades de longitud de la barra, el alargamiento total será tanto mayor cuantas más unidades de longitud contenga la barra. La superficie de sección desempeña un papel inverso; en igualdad de condiciones, la barra se alargará tanto menos cuanto mayor sea la superficie de sección. Por último, vemos intervenir un factor E, que se denomina *coeficiente de elasticidad* y que depende de la naturaleza del cuerpo sometido a la experiencia. Para un mismo peso tensor, una misma longitud y una misma sección, el alargamiento será tanto menor cuanto mayor sea el coeficiente de elasticidad. Resulta, por lo tanto, que los cuerpos que tienen un gran coeficiente de elasticidad exigen fuerzas muy considerables para ser deformados: es lo que sucede con el acero. Los cuerpos de coeficiente de elasticidad

pequeño, como el caucho, ceden, por el contrario, al menor esfuerzo.

La fórmula de alargamiento elástico de una barra puede escribirse $E = \frac{LP}{lS}$. Si se supone el alargamiento l igual a la longitud L de la barra queda $E = \frac{P}{S}$. Esto significa que el coeficiente de elasticidad es igual al peso, por unidad de sección, que sería necesario para doblar la longitud de la barra, abstracción hecha de la ruptura que se produce generalmente antes que se alcance este resultado.

El empleo de la palabra elasticidad, crea con frecuencia una confusión, efecto del diferente sentido que se le ha atribuído en el lenguaje corriente y en el lenguaje científico. Cuando se habla de un cuerpo que tiene una gran elasticidad, la imagen del caucho se nos presenta inmediatamente al espíritu; ahora bien, según lo que anteriormente hemos dicho, el caucho tiene en realidad un coeficiente de elasticidad muy pequeño.

Otro elemento viene todavía a aumentar la confusión: es la *fuerza elástica,* que, a pesar de la analogía de nombre, nada tiene de común con las propiedades de los cuerpos elásticos que ya hemos indicado. Cuando ejercemos sobre un cuerpo una tracción P, si no hay rotura, cualquiera que sea la deformación, el cuerpo ejerce sobre el peso tensor una reacción que, según el principio de Newton, es igual y de sentido contrario a la tracción. Así, si a una barra de cualquier longitud y sección, suspendemos un peso de 1 kg., esta barra, cualquiera que sea su alargamiento, sostendrá 1 kg, y se dirá que ejerce una fuerza elástica de 1 kg. Se ve, pues, que no hay ninguna relación entre lo que se denomina coeficiente de elasticidad de un cuerpo y la fuerza elástica que despliega. El coeficiente de elasticidad de un cuerpo depende únicamente de la materia de que está constituído; es un factor que no cambiará, sean las que fueren las tracciones o deformaciones que se le produzcan. La fuerza elástica, por el contrario, cambia a cada instante con las condiciones de la experiencia, y es siempre igual y de sentido contrario a la fuerza que produce la deformación. Tomemos, por ejemplo, una

varilla de acero sujeta en uno de sus extremos colgando libremente; enganchemos sucesivamente en el extremo inferior los pesos de 1, 2, 3 kg., etc., la varilla ejercerá de abajo arriba tracciones de 1, 2, 3 kg.; la fuerza elástica que desplegará variará con cada nuevo peso tensor, y, no obstante, el coeficiente de elasticidad no ha cambiado. Inversamente, tomemos dos varillas; una de acero, otra de caucho y hagámosles soportar a cada una un peso de 1 kg.; estas dos varillas pondrán en acción la misma fuerza elástica y, no obstante, están muy lejos de tener el mismo coeficiente de elasticidad.

Importancia de la elasticidad de los cuerpos en las acciones mecánicas. — Cuando un cuerpo se deforma bajo la acción de fuerzas exteriores, estas fuerzas consumen trabajo, porque hay desplazamiento del punto de aplicación de las fuerzas. Si el cuerpo puede volver por sí mismo a su forma primitiva, restituirá el trabajo que había almacenado. Por ejemplo: separemos un resorte de la posición de equilibrio, será preciso para ello desarrollar cierta fuerza. Durante todo el tiempo que el dedo empujará el resorte para armarlo, habrá consumido trabajo que se puede evaluar multiplicando el valor de la fuerza por el valor del camino recorrido. Una vez llegado al límite de la carrera, dejemos al resorte que vuelva lentamente a la posición de equilibrio primitivo, ¿qué va a pasar? El resorte ejercerá sobre nuestro dedo, en cada una de sus posiciones, el mismo esfuerzo que durante el primer tiempo de la operación, empujará el dedo delante de sí y, siendo el mismo el camino recorrido, devolverá el mismo trabajo que ha sido consumido para armarlo.

Resulta, pues, que, en un primer período, el dedo suministra trabajo al resorte, en el segundo período, el resorte devuelve el trabajo repeliendo el dedo hasta la posición de partida. Se dice que en el momento en que el resorte estaba armado, encerraba, en estado potencial, el trabajo que ha podido consumir después.

Toda la mecánica de los cuerpos elásticos se encuentra en estas tres fases. Se demuestra que, si el cuerpo fuera idealmente elástico, no habría ninguna pérdida en estas transformaciones sucesivas, el trabajo otorgado sería absolutamente

igual al trabajo absorbido; si, por el contrario, subsisten deformaciones permanentes, siempre hay pérdida de trabajo. De esto es fácil darse cuenta.

Examinemos, en primer lugar, el caso de un cuerpo que sea perfectamente elástico; en la práctica, un resorte bien templado cumple suficientemente este fin. Con el dedo, vamos a hacerle pasar lentamente de la posición *A* a la posición *B* (fig. 40), después le dejaremos volver, igualmente con lentitud, de *B* a *A* moderando en todo momento su marcha con el dedo. Sin entrar en el análisis detallado de lo que ocurre, es fácil comprender que estas dos operaciones son exactamente inversas. En cada posición del resorte, la fuerza que se ejerce entre el dedo y él es la misma, sea el que fuere el sentido del desplazamiento; los caminos recorridos en los dos casos son también los mismos; por lo tanto, el trabajo suministrado por el dedo animando el resorte es el mismo que es devuelto por el resorte empujando el dedo.

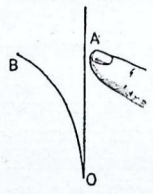


Fig. 40

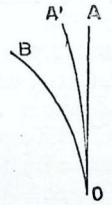


Fig. 41

Si tuviéramos que habérnoslas con un cuerpo completamente blando, sería preciso consumir determinado trabajo para deformarlo de la posición *A* a la posición *B*, no teniendo el cuerpo ninguna tendencia a volver de *B* a *A*, no devolvería ningún trabajo: todo el trabajo gastado sería perdido.

Supongamos ahora un cuerpo que tenga propiedades intermedias, no siendo completamente elástico ni completamente blando; ¿qué ocurrirá? Sabemos que después de la experiencia debe quedar una deformación permanente, por ejemplo, una lámina que se ha hecho pasar de la posición *A* a la posición *B*, no volverá sino hasta *A'*. La separación entre *A* y *A'* será la deformación permanente (fig. 41). El trabajo necesario para hacer pasar el resorte de la posición *A* a la posición *B*, es evidentemente superior al que será devuelto por este mismo resorte pasando de la posición *B* a la posición *A'*.

Vemos, pues, que hay pérdida de trabajo siempre que se produce una deformación permanente: esto puede ocurrir cuando los cuerpos son más o menos blandos, pero se produce también cuando son excesivamente rígidos, porque entonces, a la menor flexión, hay rotura. Resulta que, en todo dispositivo mecánico susceptible de recibir choques, es preciso que estos choques se realicen entre cuerpos elásticos, so pena de deformaciones permanentes o de roturas, y, por consiguiente, de usura rápida y deterioro; de aquí la utilidad de los muelles. No hay necesidad de insistir sobre la ventaja de la elasticidad desde el punto de vista de la conservación de los cuerpos; lo que acabamos de decir y la observación diaria hacen comprender con bastante claridad que únicamente los cuerpos que poseen cierto grado de elasticidad son de conservación fácil, los cuerpos blandos se deforman, los cuerpos rígidos se quiebran. He aquí un principio del que no se exagerará nunca bastante el alcance y del que hay que percatarse bien: *La elasticidad es la salvaguardia de los cuerpos sólidos.*

La elasticidad de los cuerpos desempeña también un papel capital en el ahorro del trabajo, y aunque la comprensión de este hecho resulte de las explicaciones que hemos dado, nos parece útil referir dos experiencias muy ingeniosas de Marey, que permiten comprender bien la ventaja que hay de substituir por piezas elásticas las piezas rígidas en los dispositivos experimentales en donde pueden producirse choques.

Cuando un hombre o un animal arrastra un cuerpo por el suelo mediante un lazo, es raro que la tracción ejercida sobre este lazo sea absolutamente continua. Generalmente, los movimientos de la marcha acarrean una serie de sacudidas más o menos rítmicas, y resultan choques sobre los puntos de sujeción, como hemos dicho antes.

Marey, interponiendo un dinamómetro registrador en el trayecto del lazo que sirve para arrastrar un cuerpo por el suelo, apreció que, para obtener el mismo desplazamiento, el trabajo empleado variaba mucho según la naturaleza de este lazo. Cuando el lazo tenía una elasticidad conveniente, se podía realizar una economía de 26 por 100 de lo consumido cuando era completamente rígido.

A continuación, Marey demostró experimentalmente que

cada choque da lugar a una pérdida. Se ha servido para esto de una pequeña balanza, cuyo fiel, merced a un mecanismo especial, era susceptible de inclinarse solamente en un sentido determinado (fig. 42). Esta cruz podía así soportar, sin inclinarse, un peso de 50 gr., por ejemplo, suspendido a una de sus extremidades. En el otro extremo de la misma cruz había atado un hilo bastante largo que llevaba un peso de 10 gramos. Este peso no podía, por su sola pesantez, hacer inclinar la balanza. Elevándolo a cierta altura y dejándolo caer, resultaba un choque a cada caída. La experiencia prueba que, por más que se repita este choque, la balanza no se inclina mientras el peso de 50 gr. está suspendido por intermedio de un lazo rígido. Si, por el contrario, el sostén tiene lugar por medio de un resorte de espiral o un hilo de caucho, se ve a cada caída del peso pequeño aumentar la inclinación de la balanza; al mismo tiempo, se nota la desaparición de los choques que en el primer caso conmovían todo el aparato.

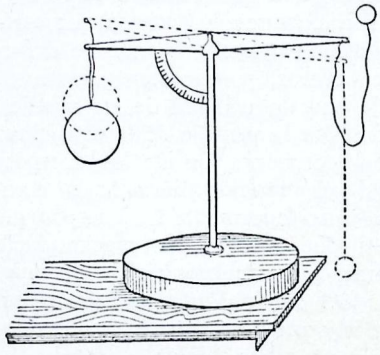


Fig. 42

He aquí ahora una experiencia hidráulica de gran trascendencia en el estudio de la circulación:

Se toma un frasco de Mariotte cuya agua se derrama a través de dos tubos unidos al frasco por una rama común, como lo representa la figura 43. Uno de estos tubos es de paredes rígidas, el otro es un tubo de caucho de paredes elásticas. Si el derrame es continuo, se puede reglar el orificio de los dos tubos de manera que tengan el mismo gasto. Hecho este arreglo, produzcamos, por medio de una palanca que permite aplastar el origen de los tubos, una serie de interrupciones en las dos corrientes; resultarán de ello chorros con sacudidas. Pero estas oscilaciones serán bastante menores en el tubo

elástico que en el tubo rígido, y el gasto del primero será superior al del segundo.

Es fácil de comprender lo que sucede. En el tubo rígido, durante la interrupción de la corriente, el líquido está inmóvil, en el momento en que se levanta la palanca, el líquido del vaso debe, para derramarse, poner en movimiento toda la columna que se encuentra delante de él en el tubo; resulta un verdadero choque. En el tubo elástico, en el momento en que el agua del vaso se precipita para derramarse, la pared del tubo se distiende, el volumen de este tubo aumenta para recibir el líquido que le llega bruscamente. Durante la interrupción, la corriente está fatal y completamente cortada en el tubo rígido; pero en el otro, las paredes, volviendo sobre sí mismas, hacen presión sobre el líquido para hacer continuar el derrame por el orificio, hasta el momento en que, bajo una nueva oleada, se dilatarán para recibir un nuevo volumen de agua que viene del vaso.

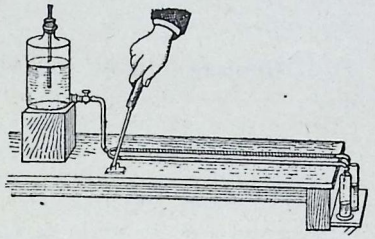


Fig. 43

Esta explicación hace comprender el funcionamiento del globo interpuesto en el trayecto del aparato de Richardson adaptado a los pulverizadores o al termocauterio.

Estas experiencias, y un gran número de otras observaciones, demuestran el papel importante que desempeña la elasticidad de los cuerpos, tanto desde el punto de vista de su buena conservación, como del ahorro del trabajo, en los casos en que fuerzas intermitentes son susceptibles de producir choques.

El estudio de la elasticidad de los cuerpos toma un lugar muy importante en las aplicaciones de la Mecánica. Diversos autores, entre los que hemos de citar en primer lugar a Wertheim, han practicado numerosas investigaciones sobre este asunto. Los resultados numéricos de estos trabajos, se encuentran, con gran profusión de detalles, en los tratados

de resistencia de materiales o en tablas especiales. Su poco interés para las aplicaciones biológicas, nos permite remitir a estas obras, en el caso excepcional en que se tenga necesidad de uno de estos resultados. Lo esencial aquí es hacer comprender bien, de un modo general, el papel importante que desempeña la elasticidad de los cuerpos en las acciones mecánicas.

IV. — Resistencia de los sólidos a la ruptura

Hemos visto que los sólidos perfectamente elásticos pueden sufrir deformaciones considerables bajo la acción de las fuerzas exteriores, y después de desaparecer estas fuerzas volver a su forma primitiva; que los cuerpos blandos quedan deformados de un modo permanente, y que otros cuerpos, en fin, cuando se pasa de cierta deformación o de determinado esfuerzo, se rompen.

Puede haber rotura por tracción, por compresión, por flexión, por torsión, por cizallamiento o por muchos de estos procedimientos combinados entre sí.

Cuando se estira un cuerpo cilíndrico, la resistencia a la rotura no depende sino de la sección transversal del cuerpo y de cierto coeficiente variable con la naturaleza del cuerpo. Cuanto mayor es la sección transversal, más considerable es la resistencia, estas dos cantidades varían proporcionalmente y, lo que se llama *coeficiente de resistencia del cuerpo* es la resistencia por centímetro o por milímetro cuadrado de este cuerpo.

He aquí, a título de indicación, las cifras medias encontradas por Wertheim, como dando en kilogramos la resistencia por milímetro cuadrado a la ruptura por tracción, para diversos tejidos del organismo:

Músculos	0,038
Arterias	0,14
Venas	0,18
Nervios	1,35
Tendones	6,25
Huesos	7,99

Estas cifras aproximadas varían considerablemente con el agua de los tejidos, en particular con la desecación y la temperatura.

Si, en lugar de estirar un sólido, un prisma, por ejemplo, se le comprime en la dirección de su eje, llega también un momento en que la ruptura tiene lugar. La resistencia en este caso es también proporcional a la superficie de sección. Para los tejidos del organismo, no puede hacerse la experiencia más que para los huesos; más adelante daremos las cifras que puedan tener algún interés, pero hay un punto importante que es preciso no perder de vista. La resistencia de un prisma por compresión no depende más que de su sección transversal con la condición que no intervenga la flexión. Ocurre a menudo, cuando se comprime una varilla demasiado larga con relación a su sección transversal, que se produce de repente una flexión; no hay entonces más que un simple aplastamiento.

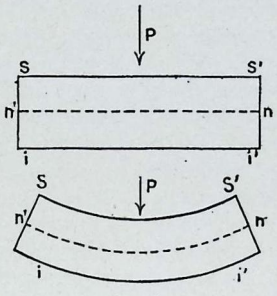


Fig. 44

He aquí porqué en todas las piezas que deben resistir a una compresión, es preciso tomar precauciones contra la posibilidad de una flexión, ya evitando las piezas excesivamente largas, ya sujetándolas por diversos puntos de su trayecto, contra los desplazamientos laterales; ya, por último, dándoles una forma de sección conveniente.

Esta forma conveniente es la de toda pieza que debe resistir a la flexión. Consideremos una pieza alargada, prismática, por ejemplo (fig. 44), descansando por sus extremidades sobre apoyos y soportando sobre su parte media un peso *P*. Esta pieza va a flaquear, formando cada una de sus fibras una curva de concavidad superior. En esta nueva curva la fibra *ii'*, se encontrará alargada, la fibra superior *ss'* se encontrará acortada, y determinada fibra intermedia *nn'*, tendrá la misma longitud que en estado de reposo. Esta fibra *nn'*, llamada fibra neutra, no habrá sufrido ni un esfuerzo de tracción ni

de compresión; la fibra *ii'*, y todas las fibras inferiores a *nn'* sufrirán la acción de la tracción, tanto más cuanto más alejadas estén de *nn'*. Las fibras colocadas por encima de *nn'* serán, por el contrario, tanto más comprimidas cuanto más alejadas estén de *nn'*. Llega un momento en que *ii'* no puede alargarse ni *ss'* acortarse más sin romperse; la ruptura comienza por un punto alejado de *nn'* y se propaga entonces a través de todo el prisma. Se concibe que sea preciso, en lo posible, aliviar las partes más alejadas de *nn'*, es decir, llevar a estos puntos la mayor cantidad posible de materia de que se disponga. Por esta razón, a toda pieza prismática que deba soportar un peso en su trayecto entre dos apoyos, se le da una figura análoga a la de la figura 45. Se ha alejado la materia de la fibra neutra formando dos suelas: una, que trabaja a la tracción, es la inferior; la otra, a la compresión, es la superior. Se ha empleado el menor material posible para reunir estas dos suelas.

Cuando una pieza debe resistir a la flexión en diversas direcciones, es preciso realizar en todas direcciones la misma condición que precedentemente. Esto conduce evidentemente a dar a la pieza la forma de un tubo hueco, encontrándose entonces la fibra neutra en el centro. Empleando la misma cantidad de materia para hacer una barra, se tendría la misma resistencia a la tracción que en el tubo, puesto que la resistencia no depende más que de la superficie de sección; pero la materia estaría muy próxima a la fibra neutra. Semejante barra resiste mal a la flexión y, por consiguiente, según hemos dicho más arriba, a la compresión.

En la resistencia a la torsión vamos a encontrar algo análogo. Consideremos una pila de piezas de moneda; cuando tomamos con toda una mano la parte inferior y la parte superior con la otra, y ejercemos una torsión, las diferentes piezas de moneda giran unas sobre otras, rozando. Si hacemos la misma operación con una varilla cilíndrica, los diversos elementos discoidales de la varilla tenderán a girar unos sobre otros, como los precedentes. Consideremos uno de estos elementos discoidales visto de frente, sujeto al elemento siguiente por la cohesión de la materia; es evidente que, tendiendo el desplazamiento máximo a hacerse en los puntos lejanos del

centro *O*, el esfuerzo de ruptura es tanto mayor cuanto más se aleja de *O*. Es preciso, pues, llevar la mayor cantidad de materia disponible lejos de *O*, puesto que la que se encuentra cerca de *O* no sufre esfuerzo, por decirlo así, ni contribuye a la resistencia de la pieza a la torsión. Vemos, pues, que somos conducidos de nuevo a la forma tubular y la resistencia

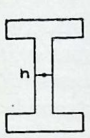


Fig. 45

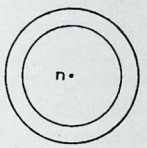


Fig 46

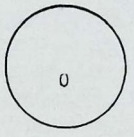


Fig. 47

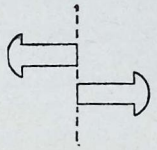


Fig 48

será tanto mayor cuanto más considerable sea el diámetro del tubo.

Por último, hemos de considerar el cizallamiento. Este género de ruptura se produce cuando dos secciones de una pieza tienden a resbalar una sobre otra, buscando toda la parte superior de la pieza desplazarse sobre la parte inferior. El tipo de la pieza que trabaja en el cizallamiento es el remache de las tijeras, que tiende a romperse, como indica la figura 48. Cada parte de la superficie de ruptura se conduce de la misma manera; la resistencia al cizallamiento es proporcional a esta superficie.

Es imposible de prever todas las combinaciones que resultan de las diferentes especies de rupturas; en cada caso será preciso hacer un estudio particular y dar a la pieza una forma apropiada. No obstante, con frecuencia, según el uso a que se destine la pieza, hay un género de ruptura predominante y es el que servirá de guía.

V. — **Huesos**

Como es sabido, los huesos, tanto del hombre como de los animales, se dividen en:

a. Huesos largos.

b. Huesos anchos y planos.
c. Huesos cortos e irregulares.

Los primeros se encuentran en los miembros, se componen de una parte alargada, cilíndrica o prismática triangular, llamada diáfisis, terminada en sus extremidades por las epífisis. Esta forma se explica fácilmente: la parte media del hueso tiene un calibre reducido porque está rodeado por la masa muscular de los miembros a la que es necesaria un gran espacio; en estas condiciones, por lo demás, la diáfisis tiene una gran resistencia, más que suficiente para soportar los esfuerzos solicitados por la contracción de los músculos. En las extremidades de los huesos, las epífisis pueden desarrollarse, porque a su nivel, los músculos han sido substituídos casi completamente por los tendones de dimensiones mucho menores. Este desarrollo de las epífisis es ventajoso, pues por ellas se articulan los huesos con los vecinos. Es conveniente que esta unión tenga lugar por superficies extensas, porque en ello radica una buena condición de solidez y de resistencia a los choques que pueden transmitirse a través de las articulaciones. Además, la acción mecánica de los músculos está también favorecida de esta manera al principio de la flexión de un hueso sobre el vecino o al final de la extensión, como veremos a propósito de las articulaciones.

Los huesos planos y anchos son generalmente convexos por un lado y cóncavos por el otro, sirven, en efecto, de pared a ciertas cavidades, como los huesos del cráneo o los de la pelvis, o bien están, como el omoplato, obligados a moldearse sobre una superficie convexa. Este último hueso es muy delgado y podría por este hecho sufrir fácilmente flexiones, pero está ventajosamente reforzado por una cresta ósea formada por un plano perpendicular al plano principal del hueso, denominada espina del omoplato.

Los bordes de los huesos planos, que serían muy frágiles si fueran delgados, son más o menos gruesos, formando así un rodete sobre el que los músculos pueden tomar una inserción sólida. En cuanto a los cortos, tienen las más variadas formas. Se encuentran generalmente en donde los movimientos son muy variados, por ejemplo, en el carpo, en el tarso, en la columna vertebral. Llevan cada uno con frecuencia muchas superficies articulares y numerosas elevaciones, depresiones o rugosidades, que constituyen buenos puntos de inserción para los tendones que en ellas se terminan.

Cualquiera que sea la variedad de huesos que examinemos, los encontramos compuestos de dos substancias muy diferentes: la substancia compacta y la substancia esponjosa. Cortemos un hueso largo al través por medio de la diáfisis; apreciaremos que esta diáfisis es muy dura, difícil de romper, de un tejido apretado sin huecos en su interior; es la substancia compacta. Practiquemos ahora una operación análoga en una de las epífisis de este mismo hueso; encontraremos también la substancia compacta, pero no formará más que una cáscara delgada, por debajo de la cual aparecerá un tejido compuesto de trabéculas óseas, rodeando lagunas más o menos importantes y que tiene algunas veces una gran analogía de apariencia con ciertas piedras pómez; es el tejido esponjoso. Los huesos cortos están constituídos como las epífisis.

En cuanto a los huesos planos, están constituídos por dos láminas de tejido compacto, adosadas y separadas por una capa de tejido esponjoso.

El hueso es uno de los tejidos más densos de la economía, no le cede desde este punto de vista más que a los dientes. Esta densidad ha sido determinada por diversos autores. Wertheim, que se ha ocupado mucho de este género de cuestiones, ha encontrado 1,934, Rauber 1,877, Aeby 1,936. Tomando prácticamente la cifra 2, fácil de recordar, no se cometerá error apreciable. Esta densidad se refiere a un fragmento cortado en la porción compacta de un hueso largo; hay que hacer notar que, operando sobre un hueso entero o sobre tejido esponjoso, se está expuesto a grandes errores. Las piezas sobre las que se operaría así, contienen, en efecto, cavidades en las que no penetra el agua sino incompletamente, lo que falsea completamente las medidas.

Las dos propiedades físicas más importantes del tejido óseo son su elasticidad y su resistencia a la ruptura.

Bajo la influencia de fuerzas exteriores, el hueso puede deformarse y volver a tomar inmediatamente su forma primitiva. Estas deformaciones posibles son muy ligeras. Tienen una gran importancia porque sabido es que los cuerpos son

tanto más susceptibles de romperse bajo la influencia de un choque cuanto menos deformables son, a pesar de su tenacidad. No citaré más que de paso la propiedad que se encuentra algunas veces en los huesos de sujetos muy jóvenes, de poder sufrir una deformación permanente muy considerable, sin ruptura aparente, es lo que se denomina fracturas en madera verde.

Las cifras citadas por los diversos autores relativas a la elasticidad de los huesos, son bastante concordantes. Según Wertheim, el coeficiente de elasticidad de los huesos frescos sería de 1,819 a 2,719 kg. por milímetro cuadrado; según Rauber, 1,871 a 2,560 kg., lo que viene a ser lo mismo. Estas cifras se refieren a la temperatura del cuerpo humano; por debajo de esta temperatura se encuentran cifras más altas; la desecación obra en el mismo sentido que el frío, pero de una manera más enérgica. El coeficiente de elasticidad de los huesos es poco más o menos doble que el de la madera de abeto estirada en la dirección de sus fibras. Hay que recordar que es preciso no confundir el coeficiente de elasticidad y la resistencia a la ruptura, por tracción, por ejemplo.

Esta segunda propiedad vamos a examinarla ahora. Aquí también vemos que el descenso de temperatura y la desecación producen un aumento de los coeficientes de resistencia. Este hecho, ya señalado por Wertheim, ha sido observado también por Rauber. En la diáfisis de los huesos frescos a la temperatura del cuerpo humano, Rauber ha encontrado, para la resistencia a la ruptura por tracción:

Adulto. . .	9,25 kg. a 12,41 kg	por mm. cuadrado
Viejo. . . .	6,37 kg. a 7,75 kg.	—

Como se ve, se produce una disminución importante de la resistencia con la edad; este fenómeno no ha sido observado para el coeficiente de elasticidad. No parece que no exista para la resistencia a la compresión; en este caso, las cifras encontradas por Rauber están comprendidas entre 12, 56 kg. y 16, 8 kg. por milímetro cuadrado sin influencia bien marcada por la edad.

El mismo autor ha hecho algunas experiencias sobre el tejido esponjoso, pero tienen mucho menos interés, porque

se concibe que, según la importancia de las cavidades y según la dirección de las fuerzas, se encuentran resultados extremadamente variables. Para dar una ligera idea de la disminución de resistencia que se observa pasando de la substancia compacta a la esponjosa, diré únicamente que, para esta última, las cifras encontradas por Rauber en las vértebras y la cabeza del fémur son 0'84 a 8'96 kg. por milímetro cuadrado.

La substancia compacta del hueso resiste a la ruptura como la madera de abeto sometida a la tracción en el sentido de sus fibras, pero es dos veces más resistente si se opera por compresión. En este caso, recordaré una recomendación importante; es la de no olvidar la influencia considerable de la longitud de las piezas de prueba sobre la ruptura por compresión. He aquí, por lo demás, un ejemplo tomado de Rauber. Un cubo de 3 milímetros de lado tallado de la substancia compacta de un fémur se aplastó bajo una carga de 150 kgs., mientras que un prisma de la misma sección, pero de 45 milímetros de altura, no puede soportar, sin romperse, más de 108 kg. Es conveniente, para tener resultados concordantes, no tomar jamás bloques de prueba cuya dimensión vertical sea superior a tres veces la dimensión horizontal.

Es sabido que este fenómeno no se produce para la tracción, en donde la resistencia no depende más que de la sección.

Las determinaciones del coeficiente de elasticidad y del coeficiente de resistencia no nos permite determinar el límite de ruptura para un hueso entero, un fémur o un cráneo, por ejemplo; semejante problema conduciría a cálculos inextricables.

Messerer se ha propuesto llenar esta laguna y ha hecho un gran número de experiencias de ruptura de los diversos huesos del cuerpo humano en diferentes condiciones, eligiendo siempre sujetos que hayan sucumbido a consecuencia de enfermedades cortas. Utilizó para esto máquinas dedicadas a los ensayos industriales y, no pudiendo operar a la temperatura del cuerpo humano, evitó por lo menos la desecación, y se mantuvo entre 20° y 25°.

He aquí los principales resultados a que llegó. Tomemos ante todo el cráneo. Cuando se comprime, comienza por pro-

ducirse una disminución en la longitud del diámetro correspondiente a la compresión, al mismo tiempo hay un ligero aumento en las dimensiones de los otros diámetros, después se produce una fractura de la base del cráneo, por una línea sinuosa, siguiendo la dirección de la compresión, si se opera según el diámetro anteroposterior o transverso. Si se actúa, por el contrario, en el sentido vertical por el intermedio de las vértebras vecinas, hay un hundimiento de la base con fractura de uno o de los dos peñascos.

En la compresión lateral se observa, como mayor variación, una disminución de 8,8 mm., con un aumento en el sentido sagital de 0,54 mm. y en el sentido vertical de 0,6 mm.

En la compresión sagital hubo una disminución de 5,4 mm. en esta dirección, con un aumento de 0,36 mm. verticalmente y de 0,7 mm. en el diámetro transversal.

En el primer caso, la ruptura tuvo lugar con 520 kg., en el segundo con 650 kg., y en la compresión vertical con 270 kilogramos, sin variación de los otros diámetros.

En los casos de compresión con un objeto romo, se producen hundimientos muy localizados, y los esfuerzos necesarios para ello no son en manera alguna proporcionales al espesor de los huesos, a consecuencia de la presencia del diploe.

El maxilar inferior, en la compresión lateral, se rompe cerca del mentón con 60 kg., tras una aproximación de las ramas de 10 milímetros aproximadamente cerca de los cóndilos.

Cuando la presión se produce de delante a atrás sobre el mentón, las dos ramas se separan por el contrario aproximadamente 13 mm.; además, la ruptura tiene lugar en las inmediaciones de los cóndilos con una carga de 190 kg.

La resistencia de las vértebras va aumentando de arriba abajo y es variable en extremo de una persona a otra: 22-93 kilogramos por centímetro cuadrado. Disminuye con la edad.

Las costillas son en extremo deformables; en un sujeto se pudo colocar el esternón sobre la columna vertebral sin provocar fractura.

Para la pelvis, una compresión media de 250 kg. de delante a atrás, produce, en general, una ruptura de los dos pubis.

La compresión lateral sobre la cresta ilíaca con 180 kg. abrió una sínfisis sacroilíaca.

Por último, una compresión transversal de 290 kg. da lugar a una rotura vertical de las partes anteriores y del sacro.

Los huesos largos no se rompieron sino con esfuerzos mucho más considerables, y no mencionaré más que algunos ejemplos:

Ruptura a la tracción del húmero (mujer).	800 kg.
— — del fémur (mujer). .	1.550 —
Compresión del húmero (mujer)	600 —
— diáfisis del fémur (mujer) . .	750 —
Cuello del fémur (mujer).	506 —

Sosteniendo los huesos sobre dos apoyos en los dos tercios de la longitud y cargándolos en medio, la ruptura se produjo con un número de kilogramos muy variable; así tenemos:

Húmero.	174-276 hg.
Fémur.	263-400 —

Hay que hacer notar, por otra parte, que un hueso resiste de muy diferente manera, según cómo esté colocado sobre los apoyos; así, una tibia colocada de modo que presentaba su cresta hacia arriba, resistió hasta 326 kg.; otra idéntica, comprimida lateralmente, se rompió a los 226 kg. En este género de rotura hay con frecuencia una doble fractura, un fragmento en cuña, con la base dirigida del lado de la compresión, destacándose en el punto en donde esta compresión se ejerce; algunas veces, una de las fisuras se prolonga en el cuerpo del hueso hasta cerca de la epífisis.

Si un hueso largo, en lugar de estar colocado sobre dos soportes está apoyado sobre un plano resistente, la compresión produce un aplastamiento de la diáfisis con hendiduras y fisuras que se prolongan hasta muy lejos; pero para esto se necesitan acciones enormes.

Por último, en los casos de torsión, se produce una fractura en espiral. Esta espiral sigue el sentido de la torsión; es decir, que rodando el lado móvil del hueso, de izquierda a derecha, como si se quisiese introducir un tornillo en la madera, se hace una raya de fractura que tiene la dirección del filete del tornillo, pero mucho más alargado.

Es necesario para esto una fuerza que, obrando en el extremo de un brazo de palanca de 16 centímetros, sería:

Para el húmero de.	40 kg.
— el rádio	12 —
— el cúbito.	8 —
— el fémur.	89 —
— la tibia	48 —
— el peroné.	6 —

Para terminar, es preciso que hagamos notar que los huesos están construídos de manera que tengan el máximo de resistencia para el mínimo de substancia empleada. Se comprende esto perfectamente para la diáfisis de los huesos largos; hemos visto, en efecto, que, a peso igual, un tubo hueco resiste mejor a la flexión que un vástago macizo de la misma naturaleza, y la ruptura por flexión es la que siempre hay que temer más en los cuerpos de forma alargada. Durante mucho tiempo se había creído que la substancia esponjosa tenía una disposición indiferente, pero Hermann Meyer hizo ver que, si afectaba una forma diferente en cada hueso, sus trabéculas eran siempre semejantes en un hueso determinado de diferentes individuos. Llamó sobre todo la atención sobre la regularidad de estas trabéculas en la cabeza del fémur. El matemático Culmann, asistente por casualidad a esta demostración, reconoció y demostró que las laminillas óseas de la parte superior del fémur estaban orientadas según las direcciones que el cálculo hacía prever, para dar al hueso el máximo de resistencia con el menor peso. Desde esta época, diversos trabajos, los de Wolf entre otros, aportaron una brillante confirmación a la teoría de Culmann.

VI. — Arquitectura de los músculos

Un músculo se compone de fibras musculares yuxtapuestas, insertadas en sus dos extremidades, y cuyo acortamiento produce la variación de forma del músculo. Los músculos del hombre y de los animales ofrecen los más variados aspectos y tienen que cumplir las más diferentes funciones. Así, vemos que los músculos glúteos del caballo, destinados a

desarrollar esfuerzos muy considerables, tienen una masa enorme, mientras que otros músculos de la cara del hombre no tienen que producir ninguna fuerza y son de dimensiones extremadamente reducidas. Ciertos músculos son largos y delgados, como el sartorio; otros, gruesos y cortos, como el deltoides o los glúteos. Unos son de fibras paralelas, como el bíceps; otros, las tienen dispuestas en abanico, como el trapecio o el temporal.

En el momento en que un músculo se contrae, sus diferentes fibras obran por su elasticidad y se conducen de un modo análogo a hilos de caucho que fueran estirados y tuvieran que volver a su posición de equilibrio.

Cada una de dichas fibras tira, pues, sobre su punto de inserción con una fuerza expresada por la fórmula que dimos a propósito del alargamiento elástico de una varilla.

$$F = ES\frac{l}{L},$$

L es la longitud que tendría la fibra contraída encogida, l la cantidad en que se ha alargado a consecuencia de la fijeza de sus inserciones, S la sección de cada fibra, F la fuerza ejercida por ella y, en consecuencia, también la tracción ejercida sobre ella. E es el coeficiente de elasticidad de la fibra muscular.

Vamos a sacar una primera conclusión de esta fórmula. Si consideramos fibras musculares que tengan la misma sección S y el mismo coeficiente de elasticidad E, para que estas fibras tomen la misma parte en la fuerza desarrollada por el músculo en la constitución del cual entran, deberán producir la misma fuerza F; por consiguiente, para todas $\frac{l}{L}$ deberá tener el mismo valor, es decir, que el desplazamiento de su extremidad motriz deberá siempre ser una misma fracción de su longitud.

De lo dicho se infiere que cuando una fibra muscular produzca un gran desplazamiento, será preciso que sea larga; si no tiene que producir más que un débil desplazamiento, para producir todo su efecto deberá ser corta.

Consideremos ahora un músculo en su conjunto. Si $\frac{l}{L}$

tiene el mismo valor para todos los músculos, siendo E sensiblemente constante, la fórmula hace ver que S deberá ser tanto más considerable cuanto mayor sea F, es decir, que es preciso un músculo tanto más grueso cuanto más considerable sea el esfuerzo que deberá desarrollar.

Borelli había ya demostrado la ley de las longitudes y hecho notar que un músculo puede levantar un peso a una altura tanto mayor cuanto más largas son las fibras.

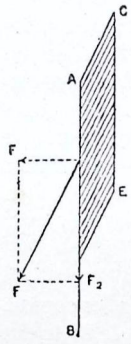


Fig. 49

Si queremos comprobar estas leyes en el hombre, apreciamos que cuando un músculo tiene que producir un gran desplazamiento, está compuesto de fibras largas; el sartorio es uno de los mejores ejemplos. Por el contrario, en los músculos de corta excursión, como los flexores de los dedos, el tibial anterior, el peroneo lateral largo, y otros muchos, las fibras deben ser cortas; ahora bien; como estos músculos se insertan a gran distancia del hueso móvil sobre el que deben obrar, están provistos de tendones muy largos. Además, estos músculos tienen igualmente que desarrollar esfuerzos bastante considerables; deberían tener, por lo tanto, una gran sección transversal; pero como falta sitio para alojar un músculo demasiado grueso, por medio de un artificio pueden colocarse un gran número de fibras unas junto a otras y concurrir a un esfuerzo común. Las fibras musculares se insertan en la parte superior, en una longitud bastante considerable CE, en un hueso fijo o en una aponeurosis tendinosa (fig. 49). Después, estas fibras van a caer oblicuamente y sensiblemente paralelas entre sí sobre un tendón AB, que se termina en el hueso móvil en B.

Si cada fibra, en su contracción, produce una fuerza f y hay n fibras, la fuerza total ejercida por el conjunto de las fibras es $F = nf$. Esta fuerza no está dirigida en el sentido del tendón; pero sabemos que puede descomponerse en otras dos: una fuerza F_1 normal a la dirección del tendón y que por consiguiente no tendrá ningún efecto sobre la articulación, y una fuerza F_2 a la que se reducirá toda la acción útil del músculo.

Las fibras musculares pueden, por otra parte, insertarse a los dos lados del tendón AB, o solamente a un lado, de donde resultará un músculo penniforme y semipenniforme. Muchos músculos del organismo no son penniformes más que en apariencia, es decir, que las cortas fibras musculares terminan a cada lado por un pequeño tendón y están colocados el uno al lado del otro sensiblemente, como las fibras de los músculos penniformes verdaderos; no obstante, lo que diferencia los primeros de los últimos es que su tracción no se

Fig. 50

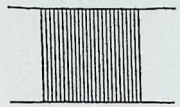


Fig. 51

Fig. 52

realiza oblicuamente sobre el tendón inferior, sino más bien en su dirección; por esto tienen un efecto más eficaz. Merecen, pues, el nombre de músculos seudopenniformes.

En el caso en que los dos huesos que se han de mover el uno con relación al otro son vecinos y en que no falta el espacio lateral, las fibras van directamente de uno a otro hueso, como lo representa la figura 51. Es lo que ocurre, por ejemplo, con el masetero destinado a elevar la mandíbula inferior. Sin embargo, este músculo, que tiene necesidad de una gran potencia, pero cuyas excursiones son limitadas, no tiene todavía la dimensión transversal que le es necesaria; por el contrario, a consecuencia del pequeño acortamiento que sufren sus fibras con motivo de los movimientos de la mandíbula, ganaría con ser reducido en su longitud. Entonces entra en juego un nuevo artificio. Cada fibra muscular no tiene más que, aproximadamente, el tercio de la longitud total que separa los dos puntos de inserción; estas fibras están agrupadas en pequeños vientres prolongados por un tendón. Los pequeños músculos, así constituídos, están yuxtapuestos, pero sus vientres musculares no se corresponden a la misma altura.

Para no dar demasiado espesor al músculo total, se disponen aproximadamente como lo indica la figura 52. De ello resulta que el músculo masetero tiene una longitud de fibras musculares tres veces menor que su longitud aparente y una sección eficaz tres veces más considerable.

Otro músculo de la economía presenta esta misma disposición en mayores proporciones. Es el isquiocoxígeo. No teniendo el cóxis más que una movilidad insignificante, la longitud de las fibras de este músculo debe reducirse mucho; también ofrece la misma estructura que el masetero, pero cada

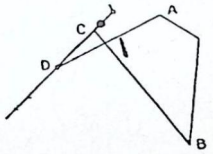


Fig. 53

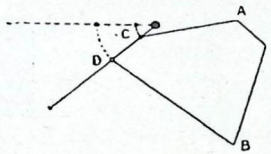


Fig. 54

pequeño vientre muscular no es de mayor dimensión que un grano de trigo, según nos ha dicho el profesor Farabeuf.

El pectoral mayor nos ofrece también una disposición notable, que tiene por fin conservar a cada una de las fibras que lo constituyen un mismo alargamiento relativo. Estas fibras se insertan por un lado en la clavícula y en el esternón, y por otro en el húmero. En su trayecto, estas fibras se cruzan, como indica la figura 53. Es fácil de ver que sin esta disposición (fig. 54), en el momento de los movimientos del húmero, las fibras *AC* no sufrirían más que una variación de longitud insignificante, mientras que las fibras inferiores estarían considerablemente estiradas. Aquí también, la arquitectura del músculo es racional.

Estudiando los músculos de los diversos animales, encontramos a cada paso hechos que demuestran la relación que existe entre la estructura del órgano y su función. Así vemos los músculos del muslo tomar un desarrollo enorme en los animales saltadores, en los canguros, por ejemplo. En las aves, son los músculos pectorales, destinados al vuelo, los que llaman sobre todo nuestra atención, y de aquí resultará una gran enseñanza si comparamos entre sí los músculos de diversas especies. Ciertas aves tienen las alas muy grandes, no realizan más que movimientos de poca amplitud, a consecuencia de la considerable resistencia que opone el aire a la superficie de estas alas. Otras aves tienen las alas pequeñas y se ven obli-

Fig. 55. — Músculos del muslo en el hombre. Los músculos *sartorios* (arriba) y *recto interno* (abajo) se han marcado más en negro para que se los pueda fácilmente reconocer. — El recto interno está, en su extremidad inferior, provisto de un largo tendón; su parte carnosa es corta, lo que está en armonía con la extensión limitada del movimiento de este músculo, cuya inserción está muy próxima a la rodilla. — Músculo sartorio provisto de un corto tendón en su inserción inferior.

gadas, para poderse elevar, a realizar movimientos muy extensos con el fin de compensar la pequeña superficie sobre la que toman su punto de apoyo. En la primera categoría entran las aves de gran vuelo: el águila y el rabihorcado; como se puede prever, según lo que ya sabemos, estas aves tienen pectorales cortos, pero muy gruesos. Las segundas, como la uria y el pin-

güino, tienen pectorales largos y delgados. Hechos análogos se encuentran en los mamíferos; son particularmente demostrativos en los músculos flexores de la pierna sobre el muslo. El bíceps femoral, el recto interno y el semitendinoso, tienen en los

Fig. 56. — Músculo del muslo del Macaco, músculo recto interno casi enteramente formado por fibras musculares; las inserciones de este músculo, bastante alejadas de la rodilla, le dan una gran extensión de movimiento como flexor de la pierna sobre el muslo. — Músculo sartorio provisto de muy poco tendón.

diferentes mamíferos un punto de inserción muy variable. En el hombre, estos músculos se insertan muy cerca de la articulación de la rodilla; por consiguiente, la amplitud de su desplazamiento será muy pequeña, y estos músculos tendrán fibras musculares cortas, prolongadas por un tendón bastante largo. En los monos, estos mismos músculos se insertan más o menos bajos, y a medida que se ve alejarse esta inserción de la rodilla, la fibra muscular aumenta de longitud a expensas del tendón, puesto que la excursión del punto de inserción

inferior se hace cada vez más considerable. En los cuadrúpedos, en los que el bíceps se inserta sobre casi toda la longitud del peroné, el tendón ha desaparecido por completo.

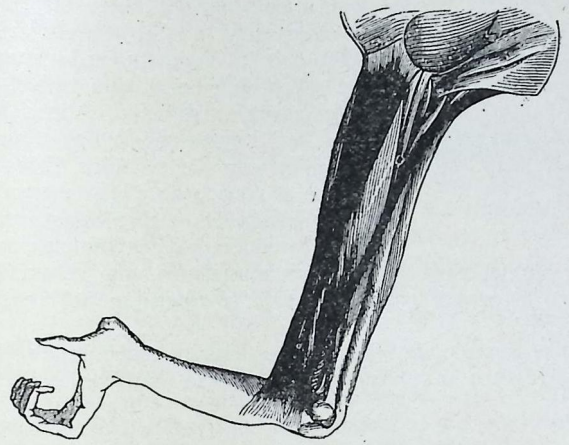


Fig. 57. — Músculo del muslo en el Coaita. — Recto interno insertándose lejos de la rodilla, casi enteramente desprovisto de tendón. — El sartorio teniendo su inserción superior muy lejana de la articulación coxofemoral, tiene movimientos muy extensos; posee por lo tanto fibras musculares de gran longitud y nada de tendón.

Sería de gran importancia comparar en un mismo individuo, en el hombre en particular, los diversos músculos del organismo, y comprobar que cada uno de ellos tiene una longitud de fibra en armonía con su función. Para poder realizar este estudio de una manera absolutamente exacta, sería preciso que los diversos músculos tuviesen todos el mismo coeficiente de elasticidad E y que cada fibra o cada músculo de la misma sección desarrollase la misma fuerza F; ahora bien; esto no es cierto cuando se pasa de un músculo a otro, pero está permitido el admitirlo para las diversas fibras de un mismo músculo; se puede entonces investigar si en este mismo músculo todas las fibras tienen unas respecto de otras la longitud que más les conviene. Este estudio ha sido hecho

por diferentes autores, y la comprobación ha sido muy satisfactoria.

W. Roux, ha hecho observaciones muy interesantes sobre los músculos de fibras paralelas. Estos músculos deben tener sus fibras todas iguales entre sí, porque tienen todas ellas las mismas variaciones de longitud en el momento de la contracción, y se puede admitir que todas ellas tienen la misma constitución. Ahora bien; Roux ha hecho notar que la línea que separa las fibras musculares de las fibras tendinosas no es recta, sino que presenta una serie de sinuosidades, y que estas sinuosidades se reproducen tan exactamente en las dos extremidades de las fibras musculares, que estas fibras tienen la misma longitud en toda la extensión del músculo (fig. 58).

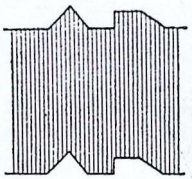


Fig. 58

Un músculo de fibras no paralelas no debe tener fibras iguales entre sí. Consideremos un caso sencillo: el de un

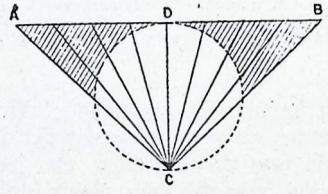


Fig. 59

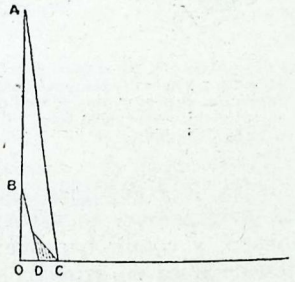


Fig. 60

músculo triangular, es decir de un músculo en el que todas las fibras que salen de un mismo punto C van a insertarse sobre una longitud AB. Cuando este músculo se contrae, el punto C se desplaza sobre la línea CD y las diversas fibras no se acortan en la misma cantidad. La fibra CD es la que sufre el mayor acortamiento y los extremos CA y CB el menor; por lo tanto, la fibra CD debe ser la más larga, y las fibras extremas

las más cortas. Estudiando la cuestión con cuidado, se encuentra que la longitud de las fibras musculares debe estar limitada por un círculo descrito sobre DC como diámetro; la parte exterior del círculo llena de trazos debe ser del tendón. Es evidente que si, como ocurre la mayor parte de las veces, hay un tendón en C, es preciso prolongar otro tanto cada fibra muscular por la parte opuesta. Esto puede comprobarse mediante medidas convenientemente practicadas sobre diferentes músculos.

El braquial anterior del mono ofrece también un ejemplo de comprobación de los más demostrativos. Este músculo tiene fibras casi paralelas entre sí, pero no se encogen todas la misma cantidad por la contracción. En el momento de la flexión del brazo, las fibras AC, las más alejadas del codo, sufren la variación de longitud más grande; las fibras más aproximadas, BD, tienen la menor excursión. Por otra parte, las fibras AC son las más largas, y AD las más cortas; pero si se investiga cuál debe ser la longitud relativa exacta de estas diversas fibras para los desplazamientos que tienen, se encuentra que las más aproximadas serían demasiado largas si tomasen todo el espacio BD. Así se ve aparecer una porción tendinosa, sombreada en la figura, que regulariza el músculo.

VII. — **Articulaciones**

Para que el contacto de dos huesos que se articulan entre sí no sea excesivamente frágil, es necesario que este contacto tenga lugar por superficies bastante extensas. En los aparatos construídos por el hombre, se ve algunas veces que la rotación tiene lugar alrededor de una punta o de un eje, pero esto exige el empleo de materiales muy duros que no existen en el cuerpo del hombre ni en el de los animales.

Si dos huesos se articulan tocándose por una superficie bastante extensa, cuando se mueven habrá deslizamiento de una de estas superficies sobre la otra. Estas superficies deben, por lo tanto, responder a ciertas condiciones, porque dos superficies cualesquiera no pueden deslizarse una sobre otra conservando un contacto de cierta extensión.

Veamos, ante todo, cuáles son las superficies que gozan en rigor de esta última propiedad.

En rigor, no son más que en número de tres: el plano, el cilindro de base circular y la esfera.

Supongamos que las dos superficies por las que dos huesos se ponen en contacto sean dos planos. Estos dos planos, podrán deslizarse uno sobre otro en todas direcciones conservando siempre un contacto perfecto. Si uno de los dos huesos se supone fijo, el otro se desplazará, conservando siempre una cierta línea perpendicular al plano articular.

Si uno de los huesos se termina por una esfera denominada cabeza articular, el otro hueso llevará una cavidad esférica del mismo radio, que será la cavidad articular. Cuando la cabeza articular esté en su cavidad, suponiendo fijo uno de los huesos, el otro será movible alrededor del centro de la esfera. Podrá girar angularmente en todas las direcciones alrededor de este centro, como si estuviera terminado por una punta muy dura que se apoyara en el centro de la esfera.

Entiéndase bien que ni la cabeza articular ni la cavidad articular constituyen una esfera completa; es fácil de comprender que la porción de esfera correspondiente a la cavidad debe ser menor que la que corresponde a la cabeza; sin esto no habría ningún movimiento posible. Los bordes de la cabeza articular están generalmente limitados por crestas rugosas cuyo contacto con el borde de la cavidad limitan el movimiento.

En tercer lugar, podemos tener una articulación basada sobre el cilindro. Supongamos un cilindro circular macizo articulándose con otro cilindro en hueco que se moldea exactamente sobre el primero; uno de los huesos podrá girar alrededor del otro como si estuviera sujeto a un eje rígido. Pero los movimientos no se limitarán a una simple rotación; podrá haber al mismo tiempo deslizamientos en el sentido paralelo al eje del cilindro; estos deslizamientos serán más o menos importantes, y para que sean determinados, será preciso que haya sobre uno de los huesos una cresta saliente que corresponda en el otro hueso a una ranura. Se produce allí una disposición análoga a la de la espira de un tornillo saliente por una parte y en hueco en la tuerca. De esta manera, la articulación en

cuestión permite a uno de los huesos tomar con relación al otro lo que se llama un movimiento helicoidal.

Si las superficies articulares fueran absolutamente rígidas y duras, no habría más que las articulaciones en plano, cilindro y esfera, para las que podría haber un contacto constante de cierta extensión entre los dos huesos durante su movimiento. De semejantes superficies se dice que son superficies congruentes. Pero, gracias a la elasticidad de los cartílagos que recubren las partes articulares, dos superficies pueden articularse entre sí de manera satisfactoria sin responder rigurosamente a las condiciones que acabamos de indicar.

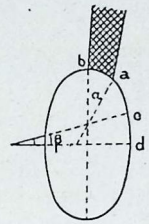


Fig. 61

Por ejemplo, en una articulación cilíndrica, el cilindro podrá ser, no circular, sino de radio variable. Es fácil comprender lo que resultará. Supongamos que la figura 61 representa el corte de una cabeza articu'ar de este género, estando la cavidad articular en la parte sombreada; se ve inmediatamente que cuando la cavidad articular se encuentra en la región *ab*, de gran curvadura, para cierto desplazamiento *ab* habrá un desplazamiento angular del hueso igual a α. Cuando el mismo desplazamiento se produzca hacia *cd*, no habrá más que un desplazamiento angular β. De la misma manera, la articular esférica puede transformarse en una articulación elipsoidal. La cabeza articular no puede en tal caso girar en la cavidad alrededor del eje del hueso que lleva la cabeza articular, pero los movimientos angulares son posibles, y encontramos que, según la dirección en que se realizan estos movimientos, para un mismo desplazamiento de la articulación estos movimientos angulares serán tanto más pronunciados cuanto mayor sea la curva según la que se realiza el movimiento.

La misma aproximación se encuentra en otro género de articulación denominado en silla de montar y en la que, en dos direcciones perpendiculares entre sí, las curvaduras están en sentido contrario.

Acción de los músculos. — Cuando se trata de articulaciones en las que un hueso se desplaza con relación a otro por simple

deslizamiento, los músculos que ponen estos huesos en movimiento deben dar una resultante en la dirección del movimiento, que es la única que será eficaz. Es preciso, pues, proyectar todas las fuerzas actuantes en la dirección del movimiento y hacer la suma de las resultantes así obtenidas.

Cuando se trata de una rotación, no es lo mismo. Tomemos el caso sencillo de una articulación cilíndrica. Supongamos que XY sea la dirección de dos huesos largos articulados juntos, O es el eje del cilindro. Cuando un músculo que se inserta en A sobre el hueso que lleva la cavidad articular, y sobre el otro hueso, más lejos de esta articulación, se contrae, ejerce cierta fuerza F en la dirección AF. Para que haga funcionar la articulación por una rotación alrededor de O es preciso que produzca cierto momento, con relación a O, y cuanto mayor sea este momento, más considerable será el efecto del músculo. Sabemos que este momento se obtiene multiplicando la fuerza F por la longitud de la perpendicular bajada desde O sobre AF, tiene, pues, por valor: $F \times OB$. Vemos que en igualdad de condiciones, la fuerza F será tanto más eficaz cuanto mayor sea la perpendicular OB; he aquí porqué es ventajoso que las epífisis sean gruesas. Si tuvieran un calibre tan reducido como la diáfisis, cuando los huesos estuvieran en la vecindad de la extensión, el momento de las fuerzas sería muy reducido. Una vez comenzada la flexión, ya no es lo mismo. Es fácil de ver que el momento en que la fuerza es más eficaz es aquel en que la línea AF es perpendicular a OA.

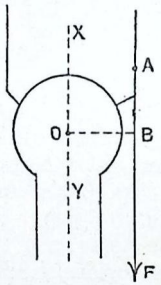


Fig. 62

Los músculos se insertan siempre en las inmediaciones de la articulación que deben mover. Esto no tiene ninguna influencia mientras los huesos están en la extensión, pero es una causa de inferioridad cuando la articulación está flexionada. Así, tomemos el bíceps: la distancia de su inserción a la articulación del codo es aproximadamente $\frac{1}{6}$ de la distancia del codo a la mano; de aquí resulta que, si este bíceps obrara sólo para levantar un peso, sería preciso que desarrollara una fuerza igual a seis veces el valor de este peso. Algunas veces, músculos bastante delgados producen efectos que nos parecen desproporcionados por su apariencia; se observa entonces que las inserciones se alejan de las articulaciones. Es lo que ocurre con ciertos músculos de los monos, por ejemplo.

En los casos de una articulación esférica, para tener el efecto producido por un músculo, se toma también el momento de la fuerza con relación al centro de rotación, el movimiento se realiza en un plano que pasa por este centro y la fuerza.

VIII. — Principios generales del método gráfico

Hemos visto precedentemente el interés que tiene el representar la ley de un fenómeno por una curva. Frecuentemente, durante un estudio, se comienza por hacer cierto número de observaciones y de medidas, que se reunen en un cuadro numérico; por ejemplo, se aprecia en distintas épocas el peso o la talla de un niño, para limitarnos a este caso sencillo. Después se traduce este cuadro numérico en una curva, que será tanto mejor cuanto más numerosos sean los puntos determinados.

El método gráfico tiene por fin investigar y poner en práctica artificios experimentales con ayuda de los que el fenómeno observado trace automáticamente, y de una manera continua, su curva representativa.

Supongamos, por ejemplo, que se quiera trazar automáticamente la curva representativa de la ley de la caída de los cuerpos; se podrá proveer de un lápiz un cuerpo que caiga libremente bajo la acción de la pesantez. Si el lápiz se apoya sobre una hoja de papel vertical, a cada momento su punta marcará en él un punto que dará la posición del cuerpo en el espacio.

Supongamos ahora que durante la caída se desplaza el papel de derecha a izquierda con un movimiento uniforme: el lápiz no trazará una vertical oY (fig. 63), porque el cuerpo se encontrará sobre ordenadas diferentes según el tiempo transcurrido; al cabo de un segundo, estará sobre Aa, al cabo de dos segundos sobre Bb, de tres segundos sobre Cc, etc. Al mismo tiempo, habrá caído de A a A^1, de B a B^1, de C a C^1, etc. Así se habrá trazado automáticamente una curva que represen-

tará la ley de la caída del cuerpo. En lugar de desplazar el papel plano, es más sencillo arrollarlo alrededor de un cilindro que gira con movimiento uniforme alrededor de un eje vertical. En tal caso, se presentará sucesivamente al lápiz cada una de las generatrices del cilindro; terminada la operación, bastará cortar el papel y extenderlo sobre un plano para llegar al mismo resultado que precedentemente.

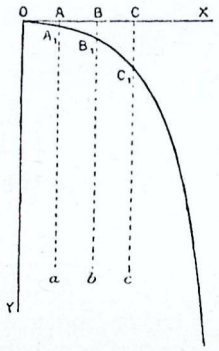


Fig. 63

El dispositivo que acabamos de indicar rápidamente, es conocido con el nombre de máquina de Morin. Encierra en principio todo el método gráfico, y encontrará su aplicación siempre que se quiera registrar el desp'azamiento de un punto en función del tiempo.

Es preciso, cuando se quiere registrar la curva de un fenómeno, dar a un lápiz o estilete inscriptor un desplazamiento igual o proporcional a cada instante de la magnitud del fenómeno. El papel sobre el que se hará el trazado, deberá moverse en plano o estar arrollado sobre un cilindro perpendicularmente al desplazamiento del lápiz.

El movimiento del papel debe ser uniforme. Si así no fuera, sería preciso conocer exactamente la ley de este movimiento y hacer sobre la curva correcciones laboriosas.

El modo de obtener más fácilmente el desplazamiento buscado es arrollar el papel sobre un cilindro que gira uniformemente alrededor de su eje. Según los casos, habrá interés en dar a este cilindro una rotación más o menos rápida. Si el fenómeno que se desea registrar se produce en un tiempo muy largo, el papel deberá desplazarse lentamente; por el contrario, su movimiento deberá ser tanto más rápido cuanto menos tiempo emplee en producirse el fenómeno.

La rotación de los cilindros con movimiento lento está generalmente reglada por un aparato de relojería. Es necesario que estos cilindros puedan girar ya alrededor de un eje horizontal, ya alrededor de un eje vertical; las figuras 64 y 65 representan un mismo cilindro susceptible de recibir estas dos

orientaciones, gracias a una disposición del pie. El movimiento de relojería se encuentra en el interior mismo del cilindro.

En realidad, la rotación de un cilindro mediante un aparato de relojería no se verifica de una manera uniforme; hay una ligera progresión a cada oscilación del escape. Por ejemplo, si el escape se verifica a cada segundo, a cada segundo el cilindro realiza una ligera rotación, después permanece en reposo hasta el segundo siguiente y así sucesivamente. Cuando el cilindro gira muy lentamente, cada progresión es imperceptible, y cada rotación puede ser prácticamente considerada como uniforme.

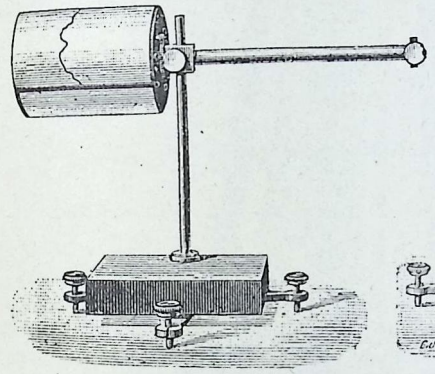


Fig. 64

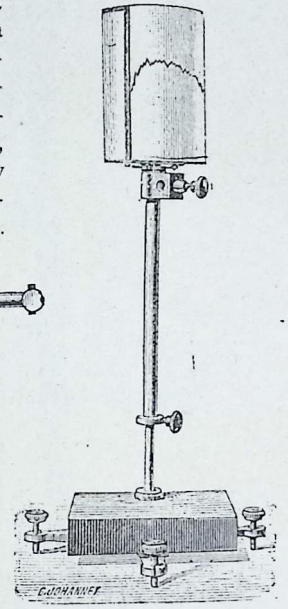


Fig. 65

No ocurre lo mismo cuando se necesita una velocidad mayor. En este caso, el movimiento del cilindro es producido por un resorte, o por un peso, y su uniformidad se asegura con ayuda de un regulador.

En la máquina de Morin (fig. 66), hay un simple regulador de aletas y la fuerza motriz se obtiene mediante un peso. El movimiento, acelerado al principio, se hace uniforme efecto de la resistencia que el aire opone al movimiento de las aletas.

Se encuentra en el comercio pequeños cilindros con resor-

te llamados polígrafos, dotados de aletas reguladoras basadas en el mismo principio. Inclinando más o menos estas aletas con

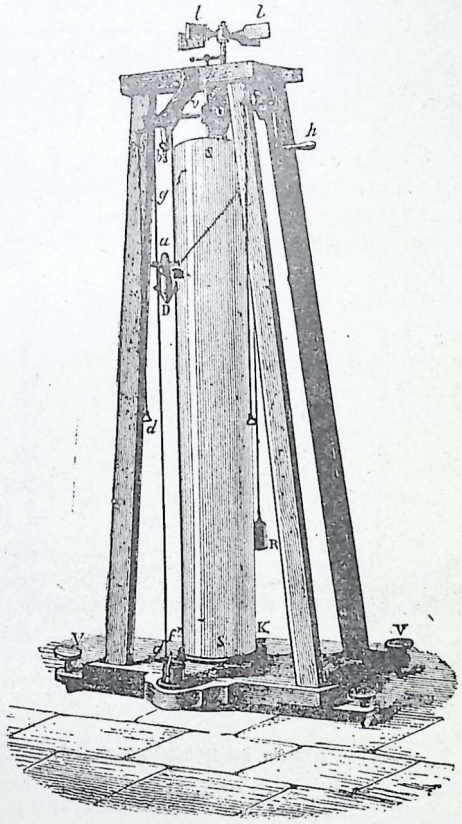


Fig. 66.— Máquina Poncelet y Morin que traduce por una curva las leyes de la caída de los cuerpos

relación al eje de rotación, la resistencia del aire varía y se obtienen rotaciones más o menos rápidas del cilindro.

Un regulador más perfecto es el de Foucault; los cilindros

registradores generalmente empleados en los laboratorios franceses están dotados de este aparato.

En el extranjero se utilizan otros reguladores análogos.

Pueden también emplearse ventajosamente cilindros movidos por la electricidad. Si el motor está dotado de un buen regulador, se tiene un movimiento muy uniforme y fácilmente regulable.

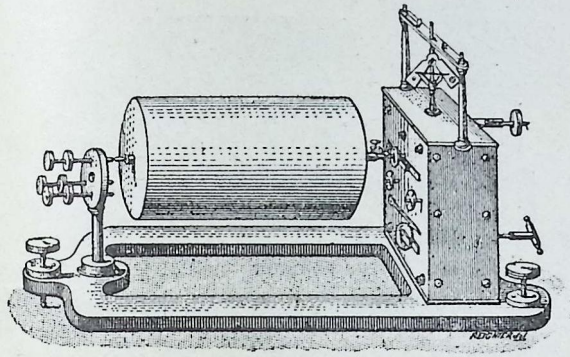


Fig. 67. — Movimiento de relojería con regulador de Foucault

Cuando se toma un trazado sobre un cilindro registrador, después de una rotación, se vuelve al punto de partida; de aquí podría resultar una superposición y una confusión entre las diferentes líneas. Un medio de evitar esta superposición de los trazados consiste en montar la punta destinada a inscribir sobre el papel, sobre un soporte que se desplaza paralelamente al eje del cilindro (fig. 68). En estas condiciones, el eje de las abscisas no está arrollado según un gran círculo del cilindro, sino que describe a su alrededor una hélice. Cuando se desarrolla la hoja de papel, el eje de las ordenadas y el de las abscisas no son rigurosamente perpendiculares entre sí (fig 69), su ángulo se separa tanto más del ángulo recto cuanto más rápidamente se desplaza, siguiendo el eje del cilindro, el carretón que lleva el aparato inscriptor.

En muchos casos no hay que tener en cuenta esta inclinación. En las experiencias de alguna precisión (fig. 69) se evi-

ta todo error contando el valor de las ordenadas paralelamente a una recta obtenida desplazando con la mano el carretón que lleva el gramil, estando el cilindro parado. Esta recta

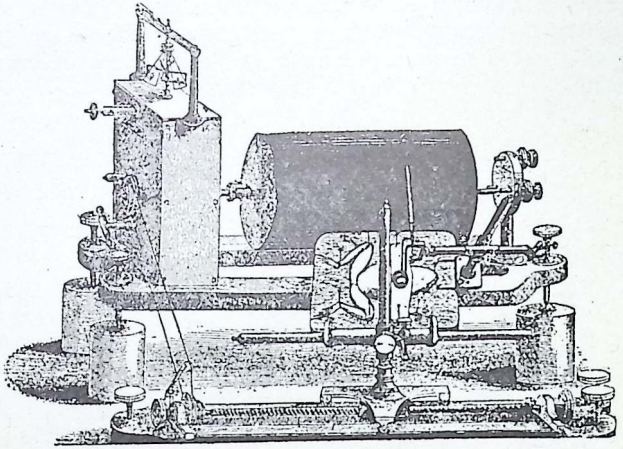


Fig. 68

es una de las generatrices del cilindro registrador y da, en consecuencia, la dirección del desplazamiento que se registra.

Otro procedimiento para evitar la superposición de los trazados consiste en emplear en las operaciones de larga duración una banda de papel de gran longitud. Esta banda de papel, en lugar de estar arrollada sobre un solo cilindro que necesitaría tener gran diámetro, pasa sobre dos cilindros paralelos y alejados uno de otro (fig. 70). Estos aparatos están generalmente movidos por un peso; la uniformidad del movimiento está asegurada por un regulador de aletas que giran en el aire o en un líquido.

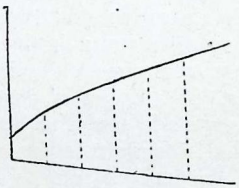


Fig. 69

Otras veces una banda de papel se desarrolla de un primer cilindro almacén para ir a arrollarse sobre un segundo cilindro receptor; pero el empleo de este procedimiento está limitado, porque los trazos pueden borrarse cuando las diferentes espiras de papel se recubren unas a otras. Es preferible entonces hacer pasar una banda de papel por un simple laminador, como lo representa la figura 71.

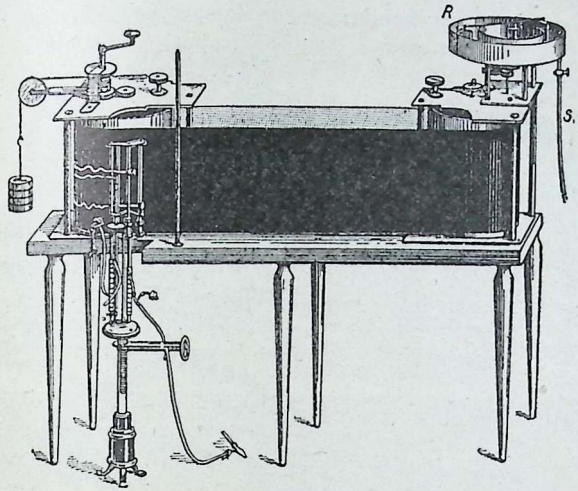


Fig. 70. — Registrador de pesas

Hay casos en que la superficie destinada a recibir el trazo debe estar animado de una gran velocidad; esto ocurre siempre que el fenómeno a registrar se realiza en un espacio de tiempo extremadamente corto. No se puede entonces emplear el cilindro giratorio, porque habría fatalmente superposiciones de curvas que harían muy difícil la lectura de los trazos. Hay que volver entonces al plano que se desplaza, sea en caída libre bajo la influencia de la pesantez, sea por una tracción mecánica. La experiencia no puede en este caso ser de larga duración, lo que no tiene inconveniente, puesto que se encamina precisamente a un fenómeno que se realiza en breve tiempo.

En los aparatos en que el fenómeno que se ha de registrar desarrolla una fuerza muy considerable, se pueden efectuar los

trazos, ya por medio de un lápiz, ya todavía mejor por medio de una pluma. Este es el procedimiento que se emplea, por ejemplo, en un gran número de instrumentos de meteorología o de aparatos industriales, pero, cuando se trata de fuerzas pequeñas, cuando la menor resistencia puede alterar la forma del trazado, hay que evitar todo frotamiento del gramil. Esto es lo que ocurre generalmente en las experiencias de fisio-

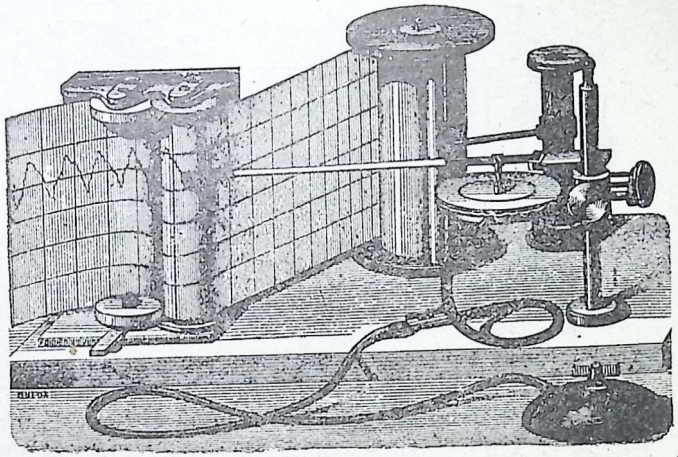


Fig. 71. — Polígrafo de banda de papel continuo

logía. Se emplea entonces un papel perfectamente satinado y recubierto de una ligera capa de negro de humo, sobre la que el menor rozamiento de una palanca muy flexible dejará una huella.

Para ahumar el papel, se le adhiere primero con cuidado al cilindro registrador, después, animando el cilindro de una velocidad aproximada de una o dos vueltas por segundo, se hace pasar por bajo del cilindro una llama humosa. Es poco de temer que el papel se queme, porque está aplicado sobre una superficie metálica que le roba todo el calor comunicado por la llama.

El ahumado puede conseguirse por medio de un trozo de alcanfor; la operación se realiza con rapidez, porque el alcanfor, en su combustión, produce una cantidad enorme de humo; pero este desprendimiento es muy desagradable en las habitaciones; además, la capa de humo depositada sobre el cilindro no es muy fina, de tal modo que, por perfecta que sea la punta del gramil, los trazados obtenidos están faltos de delicadeza.

Se obtienen buenos resultados con lo que se llama *rat de cave*, que es muy fácil de adquirir en todas las droguerías; pero el ahumado más perfecto se realiza con una lamparilla de aceite análoga a las de farol de carruaje. No dejando la mecha muy larga, se obtiene sobre el papel satinado una capa de negro de humo de las más finas, y la operación puede ejecutarse sin inconveniente en una habitación.

Una vez terminados los trazados sobre el papel satinado, se le corta según una generatriz del cilindro y se le hace pasar por un líquido fijador. Se obtienen excelentes fijadores disolviendo benjuí o goma laca en alcohol, a saturación, añadiendo después 1-2 gr. de trementina de Venecia por litro. El líquido se vierte ya en una cubeta de fotografía, ya, y es lo mejor, en una canal semicilíndrica, se pasa por él la hoja que se desea fijar, sosteniéndola por sus dos extremos, y después se la hace secar, dejando evaporar libremente el líquido. El trazado así fijado se conserva indefinidamente y no hay peligro de que se borre.

Amplificación y disminución de los desplazamientos

En la máquina de Morin, los desplazamientos del cuerpo cuyo movimiento se estudia, se inscriben en tamaño natural sobre el cilindro registrador; pero ocurre con frecuencia que los desplazamientos que se desea registrar tienen amplitudes muy pequeñas; las sinuosidades de la curva inscrita sobre el papel serían muy pequeñas para que fueran bien manifiestas y estudiadas sin gran error; es preciso, durante la inscripción del fenómeno, amplificar el trazado. Para esto (fig. 72), se une el punto que se desplaza a una palanca móvil en O, siendo A el punto de inserción. La extremidad B de la palanca se desplazará sobre la superficie ahumada y, en consecuencia, se tendrá una curva de ordenadas tanto más grandes cuanto más largo sea OB, y más

corto OA; las ordenadas han sido amplificadas en la relación $\frac{OB}{OA}$. Así, si OA tiene 1 cm. y OB tiene 10, las ordenadas de la curva serán diez veces mayores que si se hubiese registrado directamente el desplazamiento del punto A igual al desplazamiento del punto móvil.

Es muy importante hacer esta pequeña palanca lo más ligera posible. La experiencia y la teoría hacen ver que una palanca que tenga una inercia sensible deforma la curva. Es preciso, pues, disminuir esta inercia en tanto lo permitan las condiciones de rigidez del aparato. Muchos instrumentos proporcionan indicaciones erróneas a consecuencia de la inercia de las piezas en movimiento. Las palancas pueden hacerse de una brizna de paja, pero pueden obtenerse mejores con un fragmento de bambú hendido en lámina delgada y reducida por medio de la lima al espesor de una hoja de papel un poco fuerte. En el extremo se fija un pequeño estilo de oropel o de pluma de ave muy flexible, que se pega a la palanca con un poco de cera blanda o de cualquier cola.

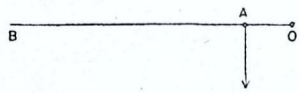


Fig. 72

Ocurre también que en lugar de tener que amplificar un movimiento, hay que reducirlo. Es lo que sucede, por ejemplo, siempre que la amplitud del movimiento sobrepasa las dimensiones del cilindro registrador. Se puede también, en estos casos, utilizar una palanca; solamente en lugar de insertar el punto móvil en las inmediaciones del eje de rotación, se le fija a la extremidad de esta palanca y el estilo que se encuentra en contacto del cilindro se coloca tanto más cerca del eje de rotación cuanto más se quiere reducir la amplitud del movimiento.

Cronografía

En todas las representaciones por curvas, es indispensable graduar los ejes de coordenadas. Particularmente, cuando se toma un trazado por un procedimiento gráfico cualquiera,

es preciso indicar sobre el eje de las abscisas a qué duración corresponde una longitud determinada. Si el cilindro empleado gira de un modo absolutamente uniforme, basta conocer la duración de esta rotación y la circunferencia del cilindro para poder indicar, sobre el eje de las abscisas, cuál es la longitud correspondiente a un segundo, por ejemplo; pero, como nunca se está cierto de la perfecta uniformidad de rotación de un cilindro, es interesante comprobarla; además, es

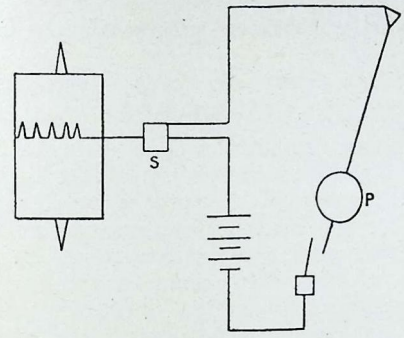


Fig. 73

ventajoso, para facilitar las lecturas y las medidas, colocar sobre el eje de las abscisas las divisiones correspondientes a las unidades de tiempo elegidas. Según la rapidez del fenómeno estudiado y, por consiguiente, según la rotación del cilindro, se emplearán procedimientos diferentes.

Para los fenómenos muy lentos, en que la división del eje de las abscisas debe hacerse en días, horas, minutos o hasta segundos, se pueden utilizar relojes ordinarios que den esta fracción de tiempo.

Supongamos, por ejemplo, que se desea dividir el eje de las abscisas en segundos. Se establecerá, cada segundo, un contacto por medio de un péndulo P de longitud conveniente; este contacto hace funcionar una señal eléctrica S que hará un punteado sobre el cilindro giratorio (fig. 73). Es evidente que el mismo principio se aplica al punteado de los minutos o de las

horas; solamente, en lugar de producir el contacto con la ayuda de un péndulo, se hará mediante las saetas de un reloj o por cualquier otro artificio.

Un metrónomo análogo al que utilizan los músicos puede ser también muy útil; basta disponer contactos sobre el instrumento, de manera que transmita sus indicaciones a la señal eléctrica encargada de puntear el tiempo sobre el cilindro.

Cuando la unidad de tiempo elegida es inferior a un segundo, lo que ocurre con frecuencia en fisiología, cuando, por ejemplo, es preciso dividir el eje de las abscisas en $\frac{1}{10}$ o en $\frac{1}{100}$ de segundo, y algunas veces en fracciones más pequeñas, no puede ser cuestión de utilizar el péndulo para producir los contactos. Se hace uso entonces de un diapasón. Este diapasón deberá hacerse vibrar eléctricamente. Para ello, entre sus dos ramas se encuentra una bobina de hilo conductor que contiene un hierro dulce que puede formar electroimán. Un hilo de platino toca exteriormente una de las ramas del diapasón y cierra el circuito de una pila cuya corriente puede atravesar el electroimán. En el momento en que la corriente pasa, el electroimán atrae las dos ramas del diapasón y se rompe el contacto con el hilo de platino exterior; el diapasón tiende a volver a su posición, que rebasa vibrando; este movimiento restablece el contacto y, por consiguiente, la atracción recomienza y así sucesivamente.

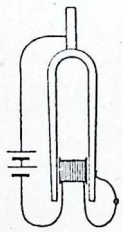


Fig. 74

De esta manera se producen tantas interrupciones en la corriente como vibraciones da el diapasón; por lo tanto, si se coloca en el circuito de la pila una señal eléctrica podrá puntear sobre el cilindro registrador las vibraciones del diapasón como puntea las oscilaciones del péndulo.

Para que este dispositivo pueda funcionar, es preciso que las indicaciones de la señal eléctrica destinada a puntear sobre el cilindro registrador sean muy rápidas.

En rigor se podría, y en ciertos casos se hace, dotar la extremidad del diapasón de un pequeño estilete muy flexible, y aproximarlo al cilindro de manera que trace en él directamente sus oscilaciones; pero a menudo las inmediaciones del cilindro deben permanecer tan libres como sea posible para las necesidades de la experiencia, y es entonces difícil colocar convenientemente el diapasón. Además, este diapasón podría hacer trepidar el soporte que lo sostiene y, por consiguiente, deformar la curva del fenómeno registrado; es, pues, conveniente transmitir sus indicaciones a una señal independiente menos molesta.

Señales eléctricas

Las señales que se utilizan en fisiología han sido construídas sobre las indicaciones de Marcelo Desprez y pueden, cuando se utilizan convenientemente, dar de 700 a 800 indicaciones por segundo, lo que rebasa con mucho las necesidades de la práctica.

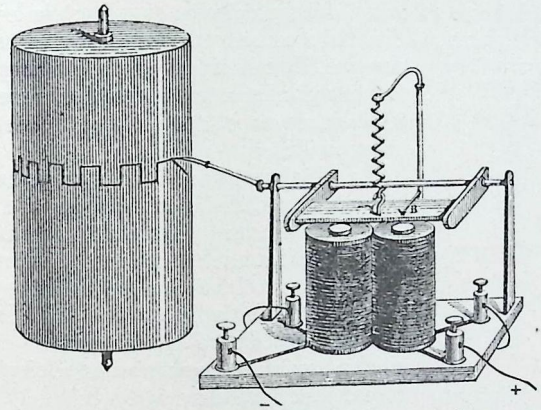


Fig. 75. — Figura teórica de la señal eléctrica de Desprez

Estas señales se componen de un electroimán muy pequeño que puede atraer un pequeño hierro dulce muy ligero, cuando pasa por la bobina una corriente. Este hierro dulce es móvil alrededor de un eje que lleva un pequeño estilete. Las oscilaciones de este estilete es lo que se registra sobre el cilindro

giratorio. Cuando la corriente cesa de pasar por la señal, es preciso que el hierro dulce se aleje del electroimán, y esto se consigue mediante un resorte que se pone convenientemente

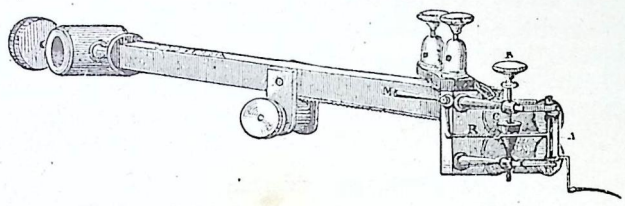


Fig. 76. — Señal electromagnética de Marcelo Desprez

tenso. Hay que tener cuidado de no dejar que el contacto en hierro dulce se adhiera al hierro del electroimán; sin esto, no se separa sino con dificultad a consecuencia del magnetismo remanente. Este accidente se evita con facilidad interponiendo entre las dos superficies una hoja de papel de seda que se pega con un poco de cera blanda.

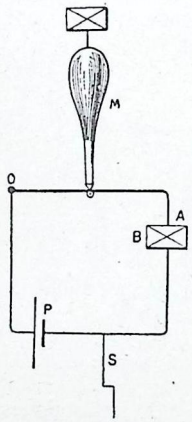


Fig. 77

La señal de Marcelo Desprez, está, en general, destinada a inscribir sobre el cilindro registrador el momento en que ocurre un fenómeno. Para esto se intercala en un mismo circuito la señal, una pila y un aparato, variable según las circunstancias, que cerrará o romperá el circuito en el momento en que ocurra el fenómeno que se desea estudiar.

Supongamos, por ejemplo, que se quiera conocer el instante en que un músculo comienza a contraerse. Se une el músculo a una palanca metálica movible alrededor de *O* y que descansa en *A* sobre un contacto *B* (fig. 77). La señal *S* será atravesada por la corriente de la pila *P*, y armada. En cuanto el músculo comience a contraerse, el contacto se romperá en *A*, la corriente cesará de pasar a través de la señal, que se desarmará, y hará una señal sobre la línea que trazó sobre el cilindro registrador.

Tambores de Marey

En muchas ocasiones es posible unir el punto móvil cuyos desplazamientos se desean registrar a la palanca o al gramil destinado a inscribir estos desplazamientos sobre el cilindro registrador; se tiene entonces una inscripción directa, es el procedimiento más sencillo, el mejor y más recomendable desde todos los puntos de vista, cuando las circunstancias lo permiten; pero con frecuencia, si el dispositivo general de una experiencia es complicado, es difícil o hasta imposible acumular en las inmediaciones del cilindro registrador los diversos aparatos de que se tiene necesidad. Otras veces el cuerpo sobre el que se quiere registrar un fenómeno es movible y no puede ser seguido en todos sus movimientos por el aparato registrador; es lo que ocurre, por ejemplo, en el estudio de la marcha y de la locomoción de los animales. Las señales eléctricas nos permiten ya transmitir a distancia todas las indicaciones relativas al tiempo, pero no son de ninguna utilidad en lo que concierne a la representación por una curva del desplazamiento de un punto. El aparato que permite transmitir un movimiento a distancia se compone de un manipulador y de un receptor. Vamos, ante todo, a describir el receptor. Consiste esencialmente en una pequeña cubeta o pequeño tambor metálico de forma muy aplastada y representada en corte por *AB* (fig. 78). El fondo de esta cubeta está perforado por un agujero *C*, en comunicación con un tubo metálico *CE*. La parte superior de la cubeta está recubierta por una membrana de caucho *MN*, en medio de la que descansa un pequeño disco metálico muy ligero, *D*. Este disco está articulado en *H*, con una palanca móvil sobre un punto fijo, *O*. Se comprende fácilmente que si se comprime el aire por el tubo *EC*, la membrana de caucho se hinchará y la palanca *OH* se levantará; su extremidad *I* inscribirá sobre el cilindro registrador todos estos desplazamientos y, por consiguiente, todas las compresiones de aire que se producen.

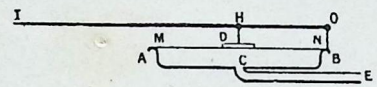


Fig. 78

Este receptor está unido a otro tambor del mismo género mediante un tubo de caucho fijado en *E*. Este segundo tambor no difiere del primero más que por su palanca, que es muy rígida y sólida, mientras que la del receptor es principalmente ligera (fig. 79).

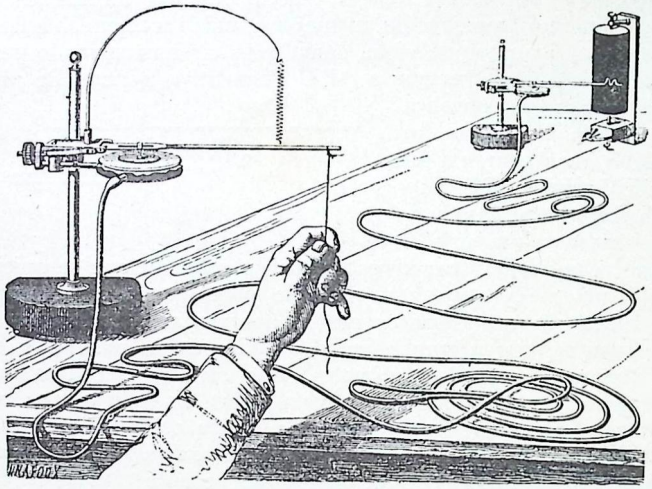


Fig. 79. — Tambores de palancas conjugadas para la transmisión de los movimientos a distancia

Es fácil comprender, fijándose en la figura 79, que a cada descenso de la palanca del manipulador, se produce en este tambor una onda de compresión que se transmite por el tubo de caucho al receptor, cuya palanca se elevará. Las diversas excursiones del manipulador serán así transmitidas, y bastará colocar la palanca del receptor contigua al cilindro giratorio, para registrar en él la curva que represente el movimiento de la extremidad de la palanca del manipulador.

En lugar de emplear como manipulador un tambor de Marey, se utilizan algunas veces diversos aparatos que sugieren las necesidades de cada experiencia; pero todos estos instrumentos, de los que se verán ejemplos, en el curso de este

libro, están basados en el mismo principio y tienen como efecto producir en el receptor una serie de compresiones del aire en él contenido.

Los tambores de Marey han sufrido diversas modificaciones de detalle, que tienen por fin hacerlos reglables, y facilitar su colocación sobre los soportes del carretón automóvil.

Cuando se acaba de instalar una transmisión de movimientos con ayuda de señales de aire, ocurre con frecuencia, a con-

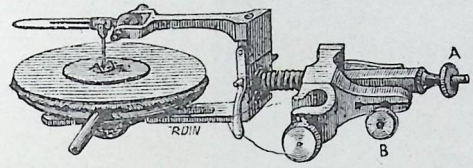


Fig. 80. — Tambor de palanca receptor

secuencia de los movimientos dados a los aparatos, que la presión del gas en el interior de los mismos se ha hecho superior o inferior a la presión atmosférica. Para obtener la igualdad de presión en el interior y en el exterior, lo que es una condición de buen funcionamiento, según demuestra la experiencia, basta abrir una pequeña válvula que se encuentra en el tubo de unión del manipulador y del receptor y que establece una comunicación entre el interior del aparato y la atmósfera. Una vez cerrada la válvula, el aparato está en condiciones de funcionar.

Comprobación y corrección de los tambores de Marey. — Los movimientos no se transmiten instantáneamente del tambor manipulador al receptor; existe cierto retardo mayor o menor, según la longitud y el diámetro del tubo de caucho que une los dos tambores. Es muy sencillo medir la velocidad de propagación de una onda aérea en el tubo de caucho que une estas dos señales. Para ello, se toma un tubo tan largo como sea posible, a los extremos del que se colocan dos tambores cuyos estilos están en contacto de un cilindro registrador. Se da un choque en un punto del tubo de caucho; resultan dos ondas que parten de este punto y provocan una indicación de las señales. Si el choque se ha dado a igual distancia de los dos tambores, las dos

indicaciones se producen al mismo tiempo; sino, el aparato más alejado se retrasa con relación al más próximo.

Si, en este último caso, se ha tenido cuidado, como indica la figura, de inscribir al mismo tiempo la curva de un diapasón que da 100 vibraciones por segundo, se conoce el retardo de una de las señales. Basta medir la diferencia de camino recorrido por las dos ondas para deducir la velocidad de propagación de una onda de compresión en el tubo que se utiliza; este dato puede, en ciertos casos, tener su utilidad.

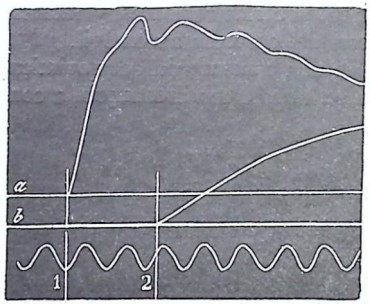


Fig. 81. — Retardo de las señales de aire

Se emplean generalmente tubos de caucho de 4 mm. de diámetro interior; la velocidad de propagación de una onda es entonces aproximadamente de 280 m. por segundo; en cada caso particular será fácil de calcular el retardo de las señales.

Cuando se utilizan simultáneamente dos o más tambores, hay interés en uniformar sus retardos, es decir, emplear para cada uno de ellos tubos de caucho de la misma longitud y, claro está, del mismo diámetro interior.

IX. — **Miografía**

Para estudiar la contracción muscular por los procedimientos del método gráfico, basta unir la extremidad de un músculo previamente libertado de su inserción, a una pequeña palanca que inscribe sus desplazamientos sobre un cilindro giratorio. El miógrafo directo es el aparato más sencillo que se puede imaginar. Se compone esencialmente de una palanca movible alrededor de un eje *O*. El músculo sobre el que se opera está fijado en *A* por una de sus extremidades. La otra extremidad *B* está unida a la palanca en *C*. Cuando el

músculo se contrae, la palanca miográfica se desplaza en el sentido de la flecha *F;* el peso *P* colocado próximo al eje *O* tiene por fin hacer volver la palanca a su posición inicial cuando el músculo se relaja. La punta *D* de la palanca inscribe sus desplazamientos sobre un cilindro ahumado y la amplitud de las ordenadas de la curva es tanto mayor, para un mismo acortamiento del músculo, cuanto mayor es la longitud de la palanca *OD* y cuanto más próximo al eje de rotación *O* está el punto de unión *C* del músculo a la palanca.

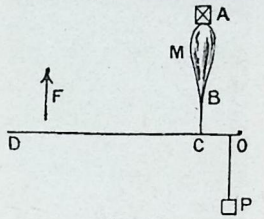


Fig 82

Este es el principio de todos los miógrafos. El primer aparato de este género es debido a Helmholtz (fig. 83). Se compone esencialmente de un marco movible alrededor de un eje,

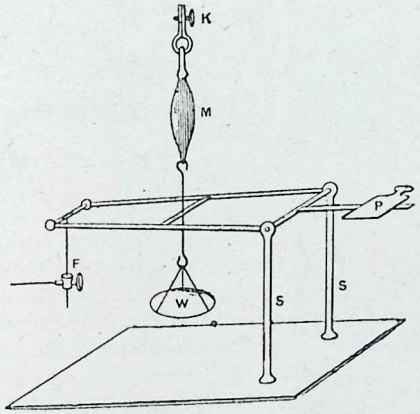


Fig. 83

al que se ata el músculo que se desea estudiar por medio de un hilo; la extensión del músculo es producida por un pequeño peso.

El miógrafo de Helmholtz tenía, entre otros inconvenientes, el de ser pesado; su inercia deformaba la curva de contrac-

ción. Así, diversos fisiólogos lo han modificado. El mejor modelo actualmente en uso es el de Marey (fig. 84). Está especialmente destinado a tomar los trazados de la contracción muscular de la rana; por lo demás, sobre este animal es sobre el que se han hecho la mayor parte de los trabajos rela-

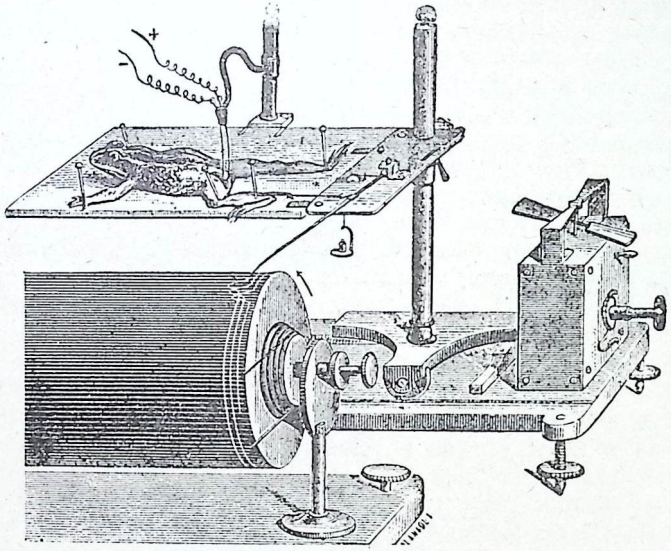


Fig. 84. — Miógrafo simple

tivos al músculo. La rana sometida a la experiencia está fijada por medio de alfileres a una lámina de corcho sostenida por un soporte metálico. El músculo gastrocnemio, separado de su inserción inferior, está unido, mediante un hilo, a la palanca miográfica. Haciendo variar la distancia de este punto de unión al punto de rotación de la palanca, se modifica la amplitud de los trazados. Con este fin, el hilo que viene del músculo está sujeto a un pequeño cursor movible a lo largo de la palanca. Para ejercer sobre este músculo una tensión conveniente y conducir la palanca al cero en el momento de su relajación, se utiliza, ya un resorte, ya un peso tensor. El peso tensor es generalmente preferible porque el músculo debe vencer así una resistencia constante y las condiciones de la experiencia son más fáciles de determinar; con un resorte, la tracción antagonista va creciendo con el aumento del acortamiento muscular y de la flexión del resorte. En el caso de la fig. 84 se ven también dos electrodos que sirven para provocar la contracción por excitación del nervio ciático.

Es preciso, claro está, en estas experiencias, evitar los movimientos voluntarios del animal, que darían un trazado absolutamente irregular. Los dos procedimientos más empleados consisten en utilizar el curare si la excitación debe recaer directamente sobre el músculo, o en destruir la médula del animal si se quiere conservar la excitabilidad de los nervios. Esta operación se hace fácilmente con una aguja que se introduce en el conducto raquídeo, inmediatamente detrás de la cabeza.

Los resultados que se obtienen en el trazado miográfico están influídos por el estado de la circulación. El trazado 85 permite ver la diferencia que hay entre las contracciones que se producen en una pata de rana privada de su circulación, y las de otra pata conservada en estado normal. Es preciso, pues, tener cuidado, en las experiencias, de no lesionar un vaso grueso del muslo, lo que ocurre con frecuencia cuando se quiere desprender el ciático.

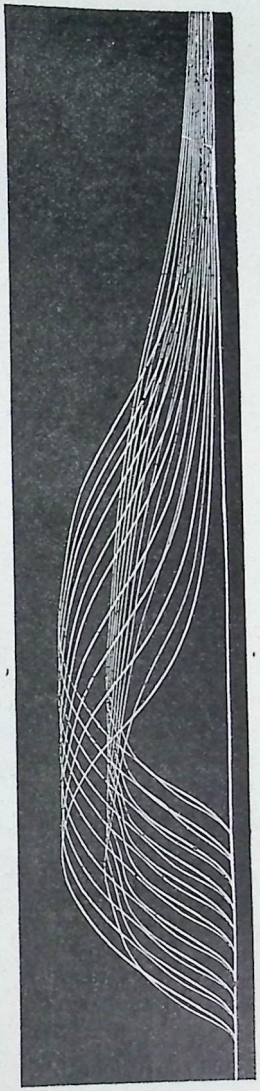


Fig. 85

Para tener un trazado dispuesto regularmente y que permita una comparación fácil de las sacudidas, se dispone la cosa de modo que el cilindro produzca automáticamente la excitación en un momento dado de su revolución. En estas condiciones,

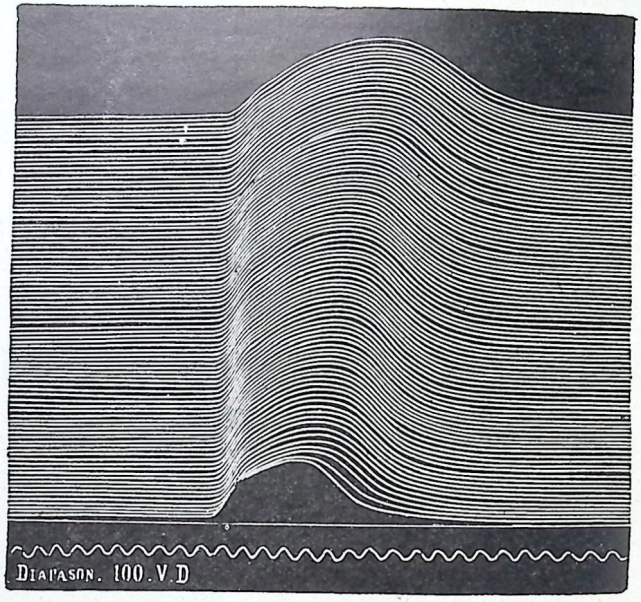


Fig. 86. — Gráfico de sacudidas musculares imbricadas verticalmente

si el miógrafo está montado sobre la carretilla automática representada en la figura 68, y destinada a evitar las superposiciones, se tiene el trazado de la figura 86.

La excitación automática se produce con ayuda de una pequeña llave de descarga (fig. 87). Para ello, una rueda dentada *R* de 100 dientes, montada en el eje del cilindro, engrana con otra rueda semejante *R'* dotada de un tope; a cada revolución del cilindro este tope actúa sobre la llave de descarga.

Con esta disposición de los trazados, existen algunas veces ligeras confusiones de líneas si el carretón automotor no marcha suficientemente de prisa. Si, por el contrario, se da a la rueda *R'* 101 dientes, girará un poco menos de prisa que

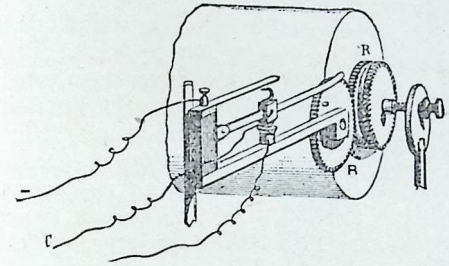


Fig. 87. — Aparato destinado a excitar los nervios en ciertos instantes de la rotación del cilindro

el cilindro; a cada vuelta, la excitación será un poco más retrasada con relación a la precedente y el trazado se dispondrá en escalera de un modo muy legible, como indica la figura 88.

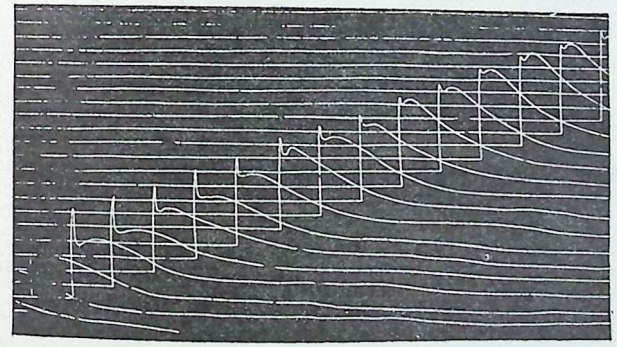


Fig. 88. — Sacudidas musculares dispuestas en imbricación oblicua (veratrina)

Es en ocasiones difícil inscribir directamente los acortamientos del músculo; se opera entonces por transmisión con las señales de aire. El músculo está en relación con la palanca de un tambor manipulador, como indica la figura 89; los mo-

vimientos de este manipulador son, según el principio representado en la figura 79, transmitidos a un tambor receptor que inscribirá sobre el cilindro registrador.

En lugar de registrar la variación de longitud de un músculo en el momento de su contracción, se puede, disponiendo la experiencia como en la figura 90, inscribir su abultamiento. Este procedimiento es, por lo demás, el único aplicable a los animales que no se quiere sacrificar, y al hombre. Para practicar la miografía en el hombre, se emplea un tambor de Marey alojado en una especie de canal, como indica la figura 91. Esta canal es colocada y fijada por medio de cintas, contra el músculo que se quiere explorar. En el momento de la contracción, a consecuencia del abultamiento del músculo, es comprimido el tambor que se encuentra en la canal y esta compresión es transmitida al tambor receptor.

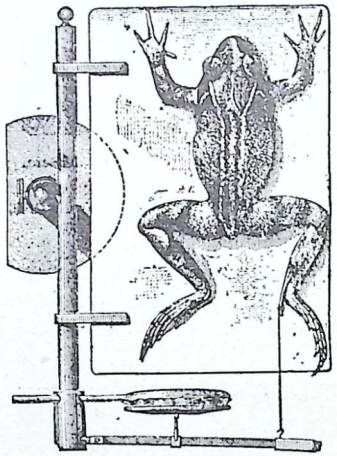


Fig. 89. — Miógrafo de transmisión

La contracción muscular puede producirse en dos condiciones muy diferentes. O bien el músculo se acorta bajo la acción de una fuerza antagonista constante, o bien la contracción se produce sin variación de longitud. Es lo que Fick ha distinguido con el nombre de contracción *isotónica* y de contracción *isométrica*.

Consideremos un músculo unido a una palanca miográfica en *A*, que se conduce a cero mediante un peso tensor (fig. 92). Es evidente que, durante toda la contracción, la tracción ejercida sobre el músculo permanecerá la misma; la extremidad *B* de la palanca inscribirá sobre el cilindro registrador la curva de acortamiento del músculo, la contracción isotónica.

Supongamos, por el contrario, que el hilo atado al tendón se fija a la palanca miográfica muy cerca del eje de rotación,

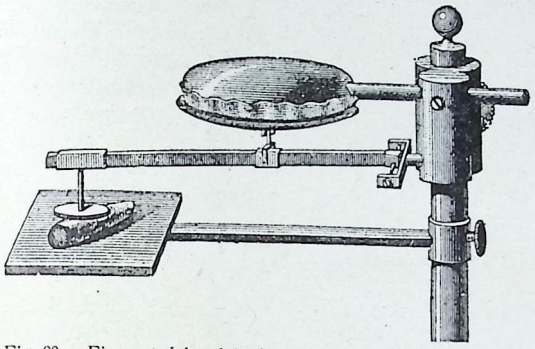


Fig. 90. — Figura teórica del miógrafo inscriptor de las fases de abultamiento de los músculos

estando la fuerza antagónica representada por un resorte colocado a cierta distancia del punto *O* (fig. 93). Cuando sea provocada la contracción, la palanca se desplazará, pero el músculo no podrá, por decirlo así, acortarse; la contracción será isométrica.

Si el resorte ha sido previamente graduado, el estudio de la curva trazada por *R* dará en cada momento la fuerza desarrollada por el músculo.

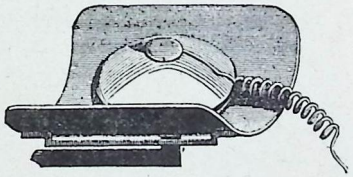


Fig. 91. — Miógrafo aplicable al hombre; traduce el abultamiento de los músculos

Cuando se provoca una contracción muscular bajo la influencia de una excitación muy breve, el músculo se encoge y vuelve casi inmediatamente a su longitud primitiva; se tiene lo que se llama una sacudida muscular.

La sacudida isotónica ha sido hasta ahora más estudiada que la sacudida isométrica. Esta sacudida puede dividirse en tres períodos. Se aprecia, ante todo, después de la excitación, un primer período *AB*, durante el cual el músculo perma-

nece en reposo (fig. 94); corresponde a lo que se llama *período de excitación latente*, o *tiempo perdido* de Helmholtz; será estudiado con más detalles en electrofisiología.

En segundo lugar viene el período de ascenso *BC*, seguido

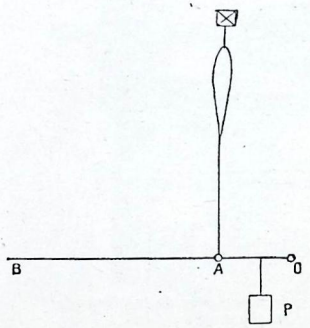


Fig. 92

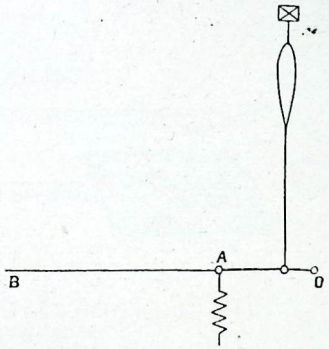


Fig. 93

inmediatamente de relajación del músculo. Este músculo no recobra inmediatamente su longitud primitiva; necesita para esto un tiempo bastante considerable.

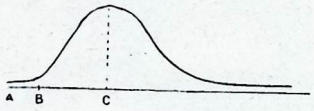


Fig 94

El período de descenso de la curva es generalmente más largo que el período de ascenso. La forma de esta curva varía, por lo demás, mucho, según los animales y hasta según los diversos músculos de un mismo animal.

Es difícil, en las experiencias de esta índole, mantener constante la forma de la curva miográfica durante un tiempo un poco largo; poco a poco se modifica esta forma, la amplitud del trazado baja ligeramente mientras que la duración general de la contracción aumenta. Este efecto es debido a dos causas: a la fatiga del músculo y a las modificaciones que las excitaciones sucesivas aportan a su irritabilidad. Este último punto será tratado con más detalles en electrofisiología.

Además de la fatiga, diversas influencias pueden modificar la forma de la curva miográfica.

La temperatura obra de la manera más notable. Si, por ejemplo, se toma el trazado de una sacudida muscular del gastrocnemio de una rana, y se hace poco a poco variar la temperatura, se obtiene a 0° una hermosa sacudida, muy alta, muy alargada. Por debajo de 0° la contractilidad muscular baja muy rápidamente, para desaparecer en las inmediaciones de — 5°. Por encima de 0° se ve también que la altura baja al mismo tiempo que su rapidez aumenta, la sacudida inscrita en el trazado se hace cada vez más corta. Pero, mientras que la rapidez de la sacudida aumenta siempre con la temperatura, hasta el momento de su desaparición, se ve bajar la altura a partir de 0° hasta cerca de 19°, en que pasa por un mínimo. Por encima de 19° aumenta de nuevo hasta los alrededores de 38°; después, baja rápidamen-

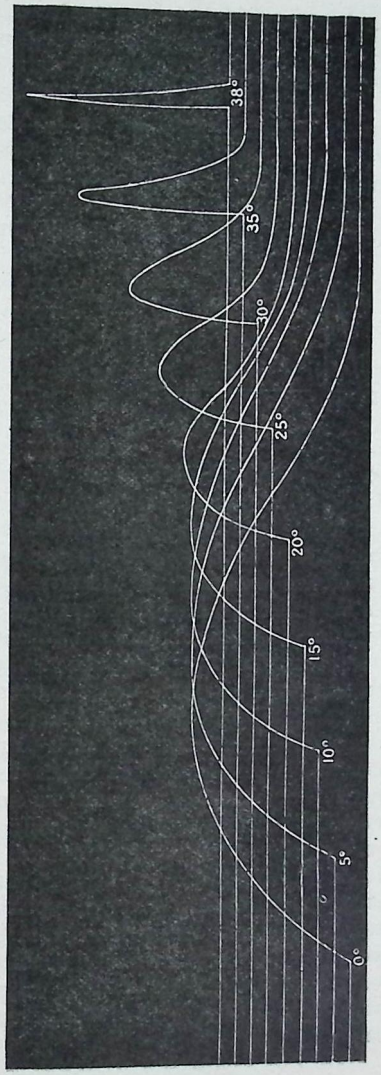


Fig. 95

te. La figura 95 representa un trazado tomado en estas condiciones, y la figura 96 es un esquema de las variaciones de altura de la sacudida con la temperatura.

Más allá de 38°, al mismo tiempo que la altura de la sacudida cae, se ve aparecer un fenómeno nuevo: en lugar de volver a su longitud primitiva después de cada contracción, el músculo adquiere poco a poco un acortamiento permanente, como si estuviera contracturado; este acortamiento llega a ser muy importante; puede desaparecer si no dura mucho tiempo, y si nos apresuramos a refrescar el músculo, de lo contrario, se hace persistente.

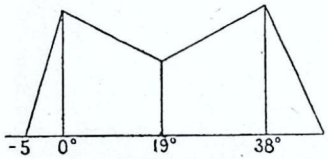


Fig. 96

La ley de variación de altura de la sacudida muscular con la temperatura está representada esquemáticamente en la figura 96; esto es lo que se admite habitualmente. No obstante, haciendo variar el peso tensor y la magnitud de la excitación, es fácil de ver que esta ley esquemática está lejos de ser siempre respetada, y no es raro, en ciertas experiencias, encontrar variaciones de la altura de las sacudidas muy diferentes, ya porque la máxima y la mínima se desplacen, ya hasta porque el mínimo desaparezca completamente, y que tenga una variación continua y del mismo sentido cuando se pasa de las temperaturas bajas a las altas.

La carga que el músculo debe levantar al contraerse, tiene una influencia muy clara sobre la forma de la contracción. En general, la altura de la sacudida disminuye cuando el peso que hay que levantar aumenta; sin embargo, es necesaria cierta tensión del músculo, ya que el músculo tiene un acortamiento mayor bajo una ligera tracción que bajo una tracción nula; hasta ocurre algunas veces que el aumento de la altura de la sacudida con el peso tensor se produce en límites bastante extensos. El período de ascenso está generalmente prolongado por un peso tensor más fuerte, mientras que el período de descenso está abreviado. Cuando la carga es muy ligera, este período de relajación puede prolongarse durante un tiempo más largo.

La influencia de la naturaleza de la excitación será estudiada en electrofisiología.

Hemos visto que cuando un músculo se contrae, se acorta al mismo tiempo que sus dimensiones transversales aumentan.

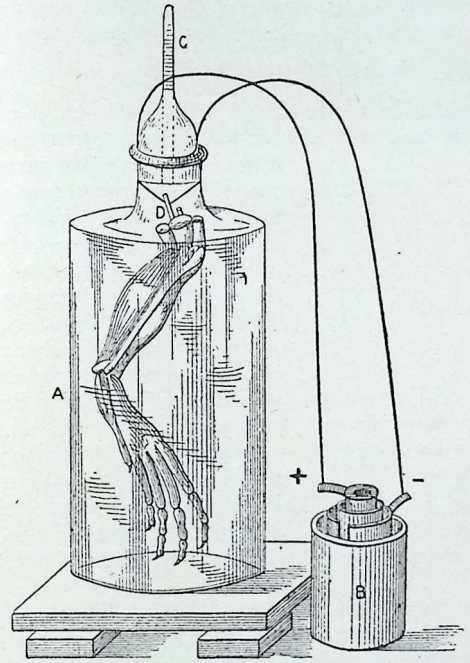


Fig. 97. — Aparato que demuestra que el volumen del músculo no cambia durante su contracción. — A, frasco lleno de agua. — B, pila para excitar el músculo. — C, tubo capilar colocado en la parte alta del frasco. — D, músculo de rana.

Diversos autores se han preocupado de la cuestión de saber si estas modificaciones acarrean un cambio de volumen del músculo, habiéndose empleado con este fin muchos procedimientos. Ciertos experimentadores han querido comprobar directamente si hay un cambio de volumen del músculo; para ello encerraban un músculo en un recipiente que contenía agua y

que no comunicaba con el exterior más que por un tubo capilar (fig. 97). Provocando la contracción, se podía comprobar si resultaban o no desplazamientos del menisco en el tubo capilar. Algunos autores niegan toda variación de volumen; parece, no obstante, que en el momento de la contracción hay una ligera disminución de volumen que, en todo caso, no llega al $\frac{1}{100}$ del volumen del músculo.

El estudio de la elasticidad del músculo en el estado de reposo o de contracción es de los más importantes; no es extraño, pues, que las investigaciones sobre este punto sean muy numerosas. Como la palabra elasticidad puede prestarse a confusión, es conveniente emplear, como ha propuesto Marey, los términos retractilidad y extensibilidad. El estudio de la extensibilidad del músculo está complicado por la existencia de lo que se llama la extensibilidad suplementaria. En efecto, cuando se suspende un peso a un músculo, este músculo no adquiere inmediatamente un alargamiento definitivo; es necesario, algunas veces, un tiempo muy largo para que se llegue a una longitud inmutable. Pueden hasta producirse incesantes variaciones de longitud, consistentes en alargamientos y acortamientos sucesivos que hacen casi imposible cualquiera determinación.

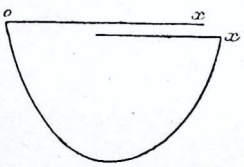


Fig. 98

Marey ha estudiado la extensibilidad del músculo registrando su alargamiento bajo la influencia de una carga regularmente creciente, después su retorno a la longitud primitiva durante la disminución de la carga. Se aprecia que después de la desaparición total de esta carga, el músculo no ha recobrado por completo su primitiva longitud. Ha habido un alargamiento permanente.

Esta variación de longitud está representada en la figura 98 en donde se ha cargado el músculo de un peso creciente a partir de *o*, lo que lo ha alargado poco a poco; después se ha descargado el músculo hasta *x'*; no ha recobrado su longitud primera.

El alargamiento no aumenta proporcionalmente a la carga; para una misma carga, este alargamiento es tanto menor cuanto más considerable es en sí este alargamiento. No obstante,

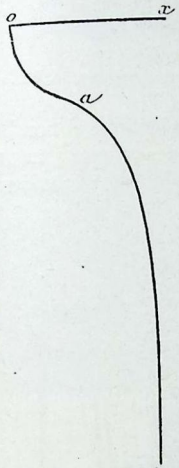


Fig. 99. — Elasticidad (según Marey). Músculo de rana. Rotación muy lenta del cilindro. Influencia de un peso gradualmente creciente. La ruptura se ha producido bajo una carga de 750 gr. Algunos instantes antes en *a* se ha traspasado el límite de la elasticidad.

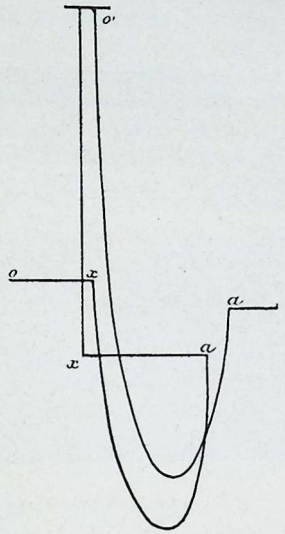


Fig. 100. — Elasticidad (según Marey). Músculo de rana. Rotación lenta del cilindro. Bajo la influencia de una carga, el músculo no tetanizado da la curva *xa*. El músculo tetanizado da la curva *a'o'* bajo la influencia de la misma carga. La excitación esta en *x'* y el músculo remonta en *o'* por el hecho de su contracción.

si se traspasa cierto límite, ocurre lo contrario, como se ve en la figura 99: para una misma carga, el alargamiento crece entonces cada vez más, hasta la ruptura del músculo.

La elasticidad del músculo es aún más difícil de estudiar durante su contracción que durante su reposo, porque la fatiga se convierte en una causa de complicación extrema. Weber ha sido el primero que ha hecho ver que el músculo activo tenía una extensibilidad mayor que la del músculo en reposo. La figura 100 permite ver comparativamente la curva de alargamiento en los dos casos.

Siendo mayor el alargamiento de un músculo durante su contracción que en el estado de reposo, puede ocurrir que un músculo que soporte un gran peso se alargue en el mo-

Fig. 101. — Aspecto de la onda muscular vista al microscopio, según Aeby

mento de la excitación. Este hecho, conocido con el nombre de paradoja de Weber, ha sido impugnado por unos autores y defendido por otros. Este desacuerdo depende probablemente

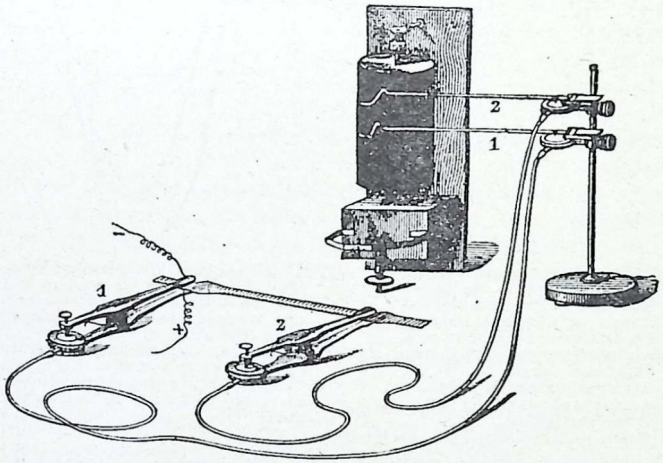


Fig. 102. — Pasos de la onda muscular explorados por medio de dos pinzas miográficas

de la naturaleza de los músculos sobre los que estos autores han operado.

Aeby ha sido el primero en demostrar que, si se excita un músculo en un punto, la contracción no se produce simultáneamente en todo el músculo. Para poner este hecho en evidencia, colocaba dos palancas miográficas sobre dos puntos diferentes de un músculo largo excitado en una de sus

extremidades. Ocurría entonces que las inscripciones de las dos palancas no concordaban; la más alejada del punto de excitación, parecía estar retardada con relación a la más próxima. Aeby deducía que una onda de contracción, partida del punto excitado, se propagaba a lo largo del músculo. Una onda muscular de esta índole puede ser observada al microscopio. Basta para ello arrancar la pata a un hidrófilo, abrir con cuidado la parte quitinosa y colocar sobre una lámina de cristal un pequeño fragmento del músculo blanco en ella contenido.

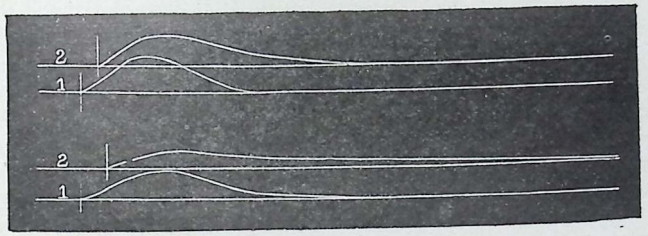


Fig. 103. — Trazados del paso de la onda muscular

Se añade una gota del líquido que se derrama por la herida hecha al animal y se tapa con un cubreobjetos. Examinando esta preparación al microscopio, se aprecian fácilmente las ondas que se producen espontáneamente y que recorren las fibras musculares.

Marey y otros autores han proseguido las experiencias de Aeby y han demostrado la existencia de la onda de la que hasta han podido medir la velocidad de propagación.

Marey utiliza con este fin dos pinzas miográficas de transmisión instaladas como representa la figura 102. El músculo es excitado cerca de una de las pinzas.

La figura 103 representa los trazados obtenidos sobre el conejo. El trazado inferior corresponde a un músculo enfriado por el hielo; se ve que en este caso la onda se propaga más lentamente. Si se excita el músculo por intermedio del nervio, no se aprecia onda, sino que todas las partes entran simultáneamente en actividad. Así, para poner en evidencia la onda,

es preciso operar sobre un músculo curarizado o excitar la parte más lejana del punto de entrada del nervio.

He aquí algunas cifras que dan una idea aproximada de la velocidad de propagación de la onda:

Rana. . . .	3 a 4	metros	por	segundo
Conejo . . .	4 a 5	»	»	»
Hombre. . .	10 a 13	»	»	»

Esta última cifra está tomada en el hombre vivo.

Las primeras se han obtenido en músculos separados del cuerpo del animal. El frío y la fatiga disminuyen la velocidad de propagación de la onda. Lo mismo ocurre con ciertos venenos.

X.— Estación y locomoción del hombre

En todos los problemas de equilibrio y movimiento de los cuerpos, el centro de gravedad desempeña un papel de primer orden. Es, pues, indispensable conocer el centro de gravedad del cuerpo humano para todas las cuestiones que se refieren a la estación, la marcha, etc.

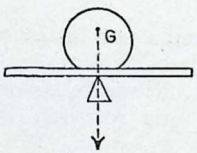


Fig. 104

Esta determinación puede hacerse de diferentes maneras.

Si se coloca una plancha horizontal sobre un cuchillo de balanza de arista superior, se podrá encontrar una posición en que esta plancha tiene igual tendencia a bascular a derecha que a izquierda. Coloquemos ahora sobre la plancha un cuerpo, se encontrará también para este cuerpo una posición sobre la plancha en que se conserve la tendencia a bascular igualmente a derecha que a izquierda (fig. 104). En este momento, el centro de gravedad *G* está por encima de la arista del cuchillo. Repitiendo la misma experiencia para una serie de posiciones del cuerpo *G*, se obtendrán una serie de líneas que, por su intersección, dan la posición del centro de gravedad. Basta para esto hacer la operación en tres posiciones diferentes.

Este es el procedimiento que se puede emplear para determinar la posición del centro de gravedad del cuerpo humano. Se acuesta primero el sujeto horizontalmente sobre la plancha, perpendicularmente a la arista del cuchillo; se obtiene así la altura a la que se encuentra el centro de gravedad en el cuerpo.

Se hace en seguida una segunda experiencia, estando el sujeto de pie y visto de perfil. Es, generalmente, inútil realizar una tercera, porque se sabe que el centro de gravedad está en el plano de simetría del cuerpo, a menos que no se busque esta posición del centro de gravedad para una actitud asimétrica, por ejemplo, para un sujeto en posición de esgrima, o un individuo que lleve un fardo a la espalda, etc.

La posición del centro de gravedad varía cuando se desplazan los miembros; por movimientos de esta clase consiguen los acróbatas sostenerse en equilibrio sobre una percha horizontal y hasta sobre una cuerda, llevando siempre, mediante un movimiento apropiado, el centro de gravedad por encima del punto de apoyo.

Es preciso, pues, en la determinación del centro de gravedad por el procedimiento que acabamos de indicar, especificar bien la posición en la que se encontraba el sujeto. Lo mejor es obtener una fotografía. Así ha operado, entre otros, P. Richer.

En la posición de pie, el centro de gravedad está a la altura de la parte superior de la segunda vértebra lumbar, y su proyección horizontal cae sobre una línea transversal que pasa por delante de la apófisis del quinto metatarsiano.

Cuando se desplaza un miembro, inmediatamente se desplaza también el centro de gravedad en el cuerpo, y sería preciso determinar esta posición para cada actitud. En lugar de hacer esto experimentalmente, lo que en ciertos casos sería casi imposible, se puede determinar el centro de gravedad de cada segmento del cuerpo o de los miembros, y, en una posición determinada, se encontrará por una composición de fuerzas la posición del centro de gravedad del conjunto.

Con este fin para determinar los centros de gravedad de las diversas partes del cuerpo W. Braune y O. Fischer han congelado un cadáver, lo han cortado con la sierra y han

buscado el peso y la posición de los centros de gravedad de los trozos así obtenidos.

Estación

Para que un hombre pueda sostenerse de pie en la posición llamada de soldado sin armas, los diversos segmentos del cuerpo deben estar en equilibrio unos por encima de otros.

Para que esta condición se realice se han dado diferentes teorías.

Para que un cuerpo se encuentre en equilibrio sobre un soporte, sabemos que la vertical que pase por el centro de gravedad debe pasar por el punto por donde toca el soporte, o, si lo toca por diversos puntos, por dentro del polígono formado uniendo unos con otros estos diversos puntos de contacto. Esta condición no se encuentra generalmente realizada en el cuerpo humano.

Tomemos, por ejemplo, la pieza superior, el cráneo, que descansa por los cóndilos sobre la primera vértebra, el atlas.

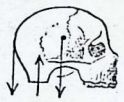


Fig. 105

La vertical del centro de gravedad pasa sensiblemente por delante de la línea transversal que une los dos cóndilos. Resulta de ello que la cabeza no se mantiene en equilibrio por sí mismo, tiene tendencia a caer hacia adelante. Es fácil de apreciar este hecho en una persona que duerme sentada; si previamente no ha inclinado mucho la cabeza hacia atrás, esta cabeza tendrá tendencia a caer hacia adelante. En el estado de vigilia intervienen los músculos de la nuca, y producen, con relación al centro de rotación *O* un momento que anula el efecto del peso. Lo mismo ocurre en las otras articulaciones, y este momento compensador es producido, según los autores, por los ligamentos, la tonicidad de los músculos, o por su contracción activa. Por lo tanto no hay que ser absolutos, ya que estos diversos factores pueden intervenir a la vez, y su influencia variar, por lo demás, según la articulación examinada y la posición de la estación.

Si examinamos las diversas vértebras, apreciamos que conservan su posición unas por encima de las otras por el mismo mecanismo que la cabeza. Aquí son los músculos de la espalda los que intervienen, por lo menos, para la parte cervical y dorsal. En la región lumbar la línea de gravedad pasa por detrás (fig. 106) de las vértebras y entonces son los músculos del abdomen los que forman el momento compensador.

El tronco está en equilibrio sobre la cabeza de los dos fémurs; es como si estuviese colocado sobre un eje horizontal que pasase por estas dos cabezas. La vertical del centro de gravedad pasa por detrás de esta horizontal; en este caso, son los músculos que van del muslo a la parte inferior de la pelvis los que forman el momento compensador. (Psoas ilíaco, tensor de la fascia lata y sobre todo ligamento de Bertin; figura 107.)

Los cóndilos del fémur descansan sobre las tibias; la vertical del centro de gravedad pasa por delante del contacto y el equilibrio está asegurado por los gemelos y los ligamentos de la rodilla. Por último, para el pie, son los gemelos y el sóleo.

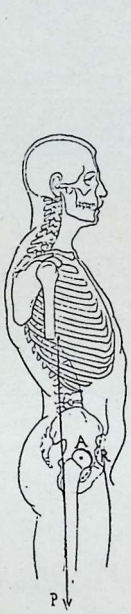


Fig. 106

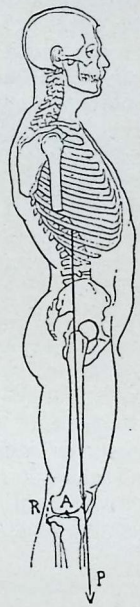


Fig. 107

Lo que acabo de decir se refiere a la posición simétrica en que la línea de los hombros es paralela a la línea de las caderas (fig. 108).

Las figuras 108 y 109 representan la proyección horizontal de las líneas de las espaldas y de las caderas en la estación recta y en la que se carga el cuerpo sobre la pierna izquierda.

Si se lleva el peso del cuerpo sobre una pierna, la izquierda, por ejemplo, hay una rotación doble en sentido inverso de la línea de los hombros y de la línea de las caderas, y el centro de gravedad se inclina hacia la pierna izquierda (fig. 109).

De la misma manera, si se lleva un peso, cubo de agua,

fusil, etc., sobre un hombro, no hay simetría con relación a un plano vertical ánteroposterior.

Cuando una persona quiere levantarse sobre la punta de los pies, se ve, según lo que se ha dicho sobre el punto en que cae la vertical del centro de gravedad, que es necesario que se incline previamente hacia adelante. En efecto, si se contentase con contraer los músculos de sus pantorrillas, se levantaría bien durante un momento, pero como la vertical del centro de gravedad cae por detrás del punto en que la punta de los pies toca al suelo, habría rotación hacia atrás y caída del cuerpo. La experiencia es fácil de realizar: si en la estación de pie se limita uno a contraer los músculos de la pantorrilla, se cae hacia atrás. Se puede, por el contrario, permanecer en equilibrio, si previamente se inclina el cuerpo hacia adelante, de modo que se haga caer la vertical del centro de gravedad en los puntos en que los pies tocarán el suelo una vez levantado el cuerpo.

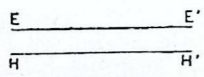


Fig. 108. — Estación derecha

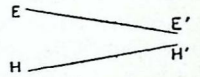


Fig. 109. — Estación inclinada sobre pierna izquierda

Marcha

El estudio de la marcha, de las diversas maneras de carrera, del salto, etc., comprende un gran número de problemas, de los que los principales son determinar el movimiento de las diversas partes del cuerpo en el espacio, la fuerza desplegada por los músculos y la acción ejercida por los pies contra el suelo.

Durante mucho tiempo, de acuerdo con las teorías de los hermanos Weber, se consideraba que durante la marcha el cuerpo reposaba alternativamente sobre la pierna derecha y la pierna izquierda, sirviendo de punto de apoyo, la pierna móvil oscilaría como un péndulo para abandonar el suelo detrás y dirigirse hacia adelante. La pierna móvil era, pues, hablando con propiedad, pasiva. Actualmente, gracias principalmente a los trabajos de Marey, se sabe que no hay nada de eso, y que a cada paso, la pierna que va a abandonar el suelo ejerce una presión contra él para empujar el cuerpo hacia adelante.

Para demostrar Marey este hecho, dotaba al sujeto sometido a la experiencia de un calzado explorador con suela elástica que contenía una pequeña cámara de aire (figura 110) que podía ser comprimida en el momento de apoyarse en el suelo. Esta pequeña cámara de aire estaba puesta en comunicación, mediante un tubo de caucho, con un tambor con palanca que inscribía sobre un cilindro ahumado todas las variaciones de compresión y, por consiguiente, todas las variaciones de fuerza con que el pie apretaba contra el suelo. Así pudo Marey comprobar que la presión aumenta al fin del apoyo, es decir, que antes de abandonar el suelo para ir hacia adelante, el pie ejerce contra él una presión más enérgica que en el simple apoyo. En una serie de trabajos notables W. Braune y O. Fischer han comenzado a estudiar la acción de los diferentes músculos en los diversos tiempos de la marcha, pero la exposición de estas investigaciones, reservadas a los especialistas, exigiría, para ser comprensible, excesivos desarrollos.

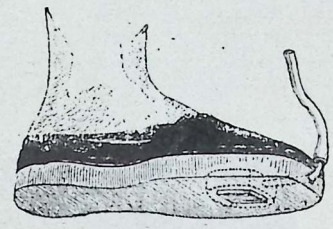


Fig. 110

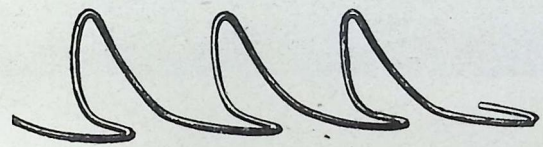


Fig. 111

Durante la marcha, el centro de gravedad sufre una serie de oscilaciones que se repiten periódicamente a cada paso. Para estudiar gráficamente estas oscilaciones, y no pudiendo operar sobre el centro de gravedad que se encuentra en el interior

del cuerpo, Marey determinó el movimiento del pubis. A este efecto, el sujeto marchaba manteniéndose en la extremidad del brazo de un manijo; el pubis estaba unido a un sistema de tambores de palanca que transmitían los movimientos a un registrador colocado en el centro del manijo. Se reconocía así que el pubis oscila de arriba abajo y de derecha a izquierda. El conjunto de la curva que describe puede ser representada

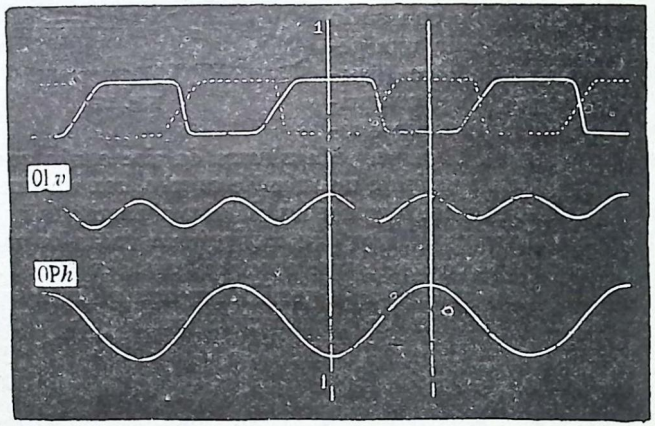


Fig. 112

(fig. 111) por medio de un alambre que haga una serie de sinuosidades a derecha y a izquierda de una línea media aplicada al fondo de una ranura cilíndrica de concavidad superior. En el momento en que el cuerpo reposa igualmente sobre los dos pies, lo que se denomina doble apoyo, el centro de gravedad está sobre la línea media y lo más bajo posible. Elevándose el pie de atrás para dirigirse hacia adelante, el centro de gravedad, o el pubis, se elevan y se desplazan lateralmente del lado del apoyo, para redescender en seguida hacia la línea media y alcanzarla en el momento del nuevo doble apoyo. La figura 112 representa las oscilaciones horizontales y verticales del pubis en este movimiento; se ve que el número de los segundos es doble que los primeros, lo que

se comprende fácilmente volviendo a la figura precedente.

En estos últimos años, el empleo del método gráfico para el estudio de la marcha ha sido reemplazado por la fotografía

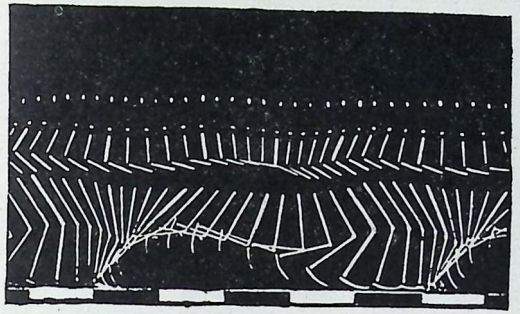


Fig. 113

instantánea en series. Estas series de fotografías, en los diversos tiempos de la marcha o de la carrera, pueden obtenerse sobre placa fija o sobre placa movible, como indicaremos

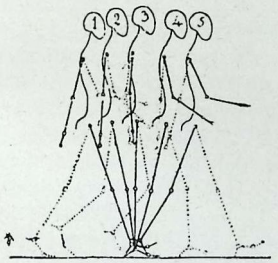


Fig. 114

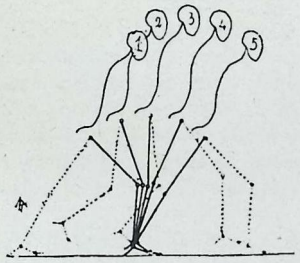


Fig. 115

en el capítulo relativo a la cronofotografía. Sobre placa fija se obtienen una serie de imágenes sobre la misma placa; por lo tanto, se corre el riesgo de superposiciones más o menos considerables, según el desplazamiento del sujeto y el número de las imágenes. Con el fin de evitar estas superposiciones, se coloca el sujeto sobre el fondo negro, se le viste completamente

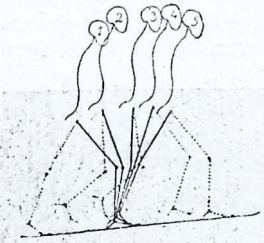


Fig. 116

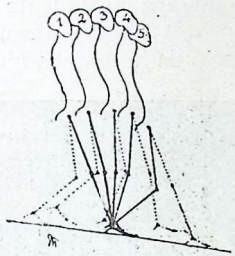


Fig. 117

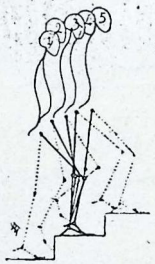


Fig. 118

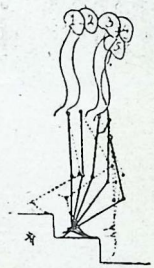


Fig. 119

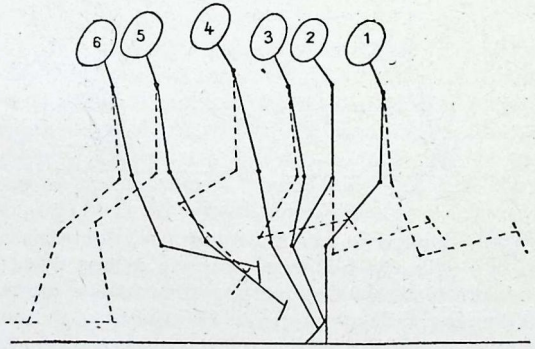


Fig. 120

de negro, y únicamente se marcan con líneas blancas los puntos o líneas cuya posición se desea fijar en la prueba. Se tiene entonces una prueba semejante a la de la figura 113, en la que se pueden seguir los movimientos de los diversos segmentos

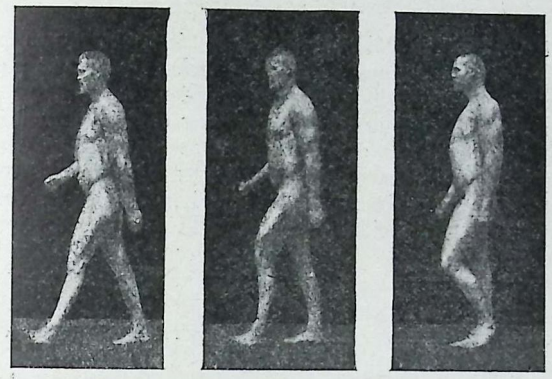


Fig. 121

del cuerpo. En las fotografías sobre placa móvil se tienen, por el contrario, las imágenes completamente disociadas, cada prueba está aparte, pero en este caso hay que tener puntos de referencia en cada una de ellas y hacer un enorme trabajo de reconstitución para tener la ley del movimiento. Este segundo método es bueno principalmente para estudiar las actitudes y los movimientos de los músculos en los diversos tiempos de la locomoción.

Las figuras 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, demuestran cómo se desplazan los diferentes segmentos del cuerpo en la marcha de diversos aires y en la carrera; estos son resultados de cronofotografías sobre placa fija.

La figura 121 es un ejemplo de fotografías disociadas en las que se puede ver bien el relieve de los músculos, su forma y la verdadera actitud de los miembros en los diversos tiempos de la marcha.

XI. — Principios generales de hidrostática e hidrodinámica

Hidrostática

Flúidos. — Los flúidos se distinguen de los sólidos en que sus moléculas no ocupan, unas con relación a otras, una posición fija. Estos flúidos son los gases y los líquidos.

Siendo las moléculas de los flúidos perfectamente movibles, unas con relación a otras, estos cuerpos se moldean exactamente sobre la superficie interna de los vasos que los contienen. Cuando se coloca un gas en el interior de un vaso, ocupa toda la capacidad; sus moléculas se separan, por lo tanto, unas de otras. Un líquido, por el contrario, conserva un volumen constante, sea el que fuere el vaso que lo contenga. Su forma cambiará con la del recipiente, pero sus moléculas, aun deslizándose unas sobre otras, conservarán la misma distancia recíproca.

Presión. — Consideremos un vaso completamente lleno de un flúido cualquiera, que supondremos ante todo, desprovisto de pesantez. Este flúido ejerce sobre las paredes del vaso cierta presión, y si se tallase en la pared del vaso una abertura, el flúido se escaparía por ella, a menos que la presión exterior fuera mayor que la presión interior, en cuyo caso ocurriría lo inverso. Esta presión del flúido no se ejerce solamente sobre la pared del vaso; en un punto cualquiera del medio, una pequeña superficie ideal, o si se quiere materializarla, la superficie de un pequeño trozo de papel tal como *AD*, sufrirá una presión por parte del flúido.

La propiedad fundamental de los flúidos, enunciada por Pascal, es que la presión se transmite íntegramente. Esto quiere decir que si en un punto cualquiera del flúido una superficie dada soporta una presión determinada, en cualquier otro punto la misma superficie sufrirá la misma presión. Supongamos, por ejemplo, que el vaso *V* (fig. 122) contiene un flúido no pesante, y que en *B* un centímetro cuadrado sufre, de parte del flúido, una presión de 1 kilogramo; se puede afirmar que en una

región cualquiera *C* de la pared, un centímetro cuadrado soportará igualmente una presión de 1 kilogramo. Si en lugar de tomar una superficie de pared, se toma 1 centímetro cuadrado en *AD*, soportará igualmente la misma presión de 1 kilogramo. En general, en este vaso, 1 centímetro cuadrado, sea la que fuere su posición y su orientación, soporta una presión de 1 kilogramo. Esta presión es normal a la superficie.

Este principio establecido para los flúidos no pesantes, subsiste para los flúidos pesantes, pero se añade otro efecto.

Consideremos un vaso *V* que contiene un flúido pesante que lo llena completamente (figura 123). Un centímetro cuadrado de pared *A*, en la parte superior del vaso estará sometido a la presión *p*, que se transmitirá integralmente al centímetro cuadrado colocado en *B*. Pero, además, *B* soportará el peso de la columna de flúido que se encuentra encima de él. Por consiguiente, *B* soportará una presión tanto mayor, con relación a la que soporta *A*, cuanto mayor sea la altura *AB*.

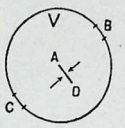


Fig. 122

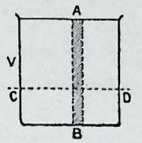


Fig. 123

En este caso, la presión es también normal a la superficie.

Las pequeñas superficies *A* y *B* no tienen necesidad de estar superpuestas para que esta regla se aplique. En efecto, todas las superficies iguales a un centímetro cuadrado que se encuentran en un mismo plano horizontal *CD*, soportan la misma presión que un centímetro cuadrado en *A*, más el peso de una columna de flúido que tenga por base un centímetro cuadrado y por altura la distancia vertical entre *CD* y *A*. Por último, la presión sobre un centímetro cuadrado es independiente de la orientación de este centímetro.

Así, un centímetro cuadrado colocado en *C* soporta la misma presión, sea horizontal, vertical u oblicua. Una superficie tal como *CD*, en donde cada centímetro soporta la misma presión, se llama una superficie de nivel.

Principio de Arquímedes. — Cuando un cuerpo C (fig. 124) se encuentra sumergido en un flúido, toda su superficie se en-

cuentra sometida a la misma presión. Si el flúido es pesado, la presión sobre cada centímetro cuadrado será mayor en la parte inferior del cuerpo que en la superior. Resultará, por lo tanto, que todas las presiones que tenderán a elevar el cuerpo serán superiores a las que tenderán a bajarlo. La resultante del conjunto de todas estas presiones será dirigida de abajo arriba.

Se demuestra experimental y teóricamente que esta resultante, o empuje del líquido sobre el cuerpo, es igual al peso del flúido desplazado por el cuerpo.

Puede ocurrir:

1.º Que el cuerpo tenga exactamente el mismo peso que el

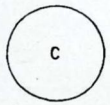


Fig. 124

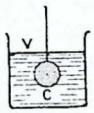


Fig. 125

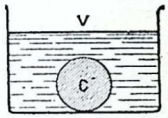


Fig. 126

volumen de flúido que desplaza. El cuerpo permanecerá entonces en equilibrio en este flúido, no ascenderá ni descenderá.

2.º Que el cuerpo tenga un peso superior al del volumen del flúido desplazado, y caerá, como lo hacen la mayor parte de los cuerpos en el aire, o como lo hace una piedra en el agua.

3.º Que el cuerpo tenga un peso inferior al del volumen del flúido desplazado; el empuje será superior al efecto de la atracción terrestre. El cuerpo se elevará como un globo en el aire o como un corcho en el agua.

Este principio de Arquímedes encuentra su aplicación en un gran número de casos. En particular, cuando se quiere determinar el volumen de un cuerpo, basta suspenderlo debajo del platillo de una balanza y establecer el equilibrio. Se sumerge en seguida el cuerpo en el agua (fig. 125); resulta un empuje de abajo arriba. Se restablece el equilibrio añadiendo pesos en el platillo del lado del cuerpo. Estos pesos añadidos dan el peso del agua desplazada por el cuerpo y, por consiguiente, su volumen.

Cuando un cuerpo sumergido en un flúido, un líquido, por ejemplo, sufre así una presión de abajo arriba, a la inversa, las

paredes del vaso sufren una presión de arriba abajo. Esto depende del principio de Newton sobre la acción y la reacción. Supongamos, por ejemplo, que un vaso *V* (fig. 125) contiene agua y un cierto cuerpo *C*. Este cuerpo *C* sufre, como hemos dicho, un empuje de abajo arriba. Inversamente, las paredes del vaso sufren un empuje de arriba abajo, igual al peso del agua contenido en un vaso, más el peso de agua que ocuparía el volumen del cuerpo.

Cuando un cuerpo *C* descansa sobre un plano, por ejemplo, sobre el fondo del vaso *V*, todo el peso del cuerpo se transmite al plano por su punto de contacto. Puede ocurrir entonces que bajo esta presión el cuerpo *C* se deforme y se deteriore en este punto de contacto. Si se llena el vaso de agua, por ejemplo, el cuerpo sufrirá un empuje de abajo arriba y la presión que ejerce en su contacto con el plano estará disminuída en esa misma cantidad; si su densidad no es más que ligeramente superior a la del líquido en que está sumergido, flotará y no sufrirá más que una ligera presión directa en uno de sus puntos, por contacto con el vaso que lo contiene. La presión del líquido estará repartida sobre toda su superficie y no causará ninguna deformación sensible. De esta manera es cómo ciertos órganos delicados, como el cerebro, están sostenidos y protegidos, en la caja ósea que los encierra, por el líquido interpuesto entre ellos y la pared. Este líquido desempeña finalmente el papel de un verdadero acolchado.

Hidrodinámica

Consideremos un líquido en movimiento.

La variación de presión de un punto a otro no sigue la sencilla ley indicada para los líquidos en equilibrio.

Además, la presión ejercida por el líquido sobre una pared sólida no es normal a la pared. Esto no ocurriría más que si las moléculas líquidas se deslizasen sobre estas paredes sin ningún rozamiento. En realidad, no ocurre así; cuando un líquido se desplaza sobre una pared sólida, existe entre estos dos cuerpos un rozamiento análogo al que hemos estudiado en el movimiento de dos cuerpos sólidos en contacto; refiriéndonos al rozamiento de los sólidos, podemos fácilmente concebir que la

acción ejercida por el líquido móvil sobre la pared fija no es normal a esta pared. La presión del líquido sobre la pared tiene una inclinación variable según la magnitud del rozamiento; depende de la velocidad de la corriente, de la naturaleza del líquido y de la pared.

Otro elemento influye considerablemente sobre la transmisión de las presiones en un líquido en movimiento: es lo que se denomina la viscosidad del líquido, que estudiaremos más adelante de una manera especial. Hemos supuesto, en efecto, en la definición de los flúidos, que sus moléculas ruedan unas sobre otras sin experimentar ninguna resistencia. Pero esta definición corresponde a un estado ideal, a lo que se puede llamar un líquido perfecto. Los líquidos por nosotros conocidos, están lejos de encontrarse en este caso. Poseen todos lo que se llama rozamiento interior; y cuando las moléculas de semejante líquido están en movimiento unas con respecto otras, experimentan en sus desplazamientos una resistencia que es causa de una perturbación en la transmisión de las presiones.

La diferencia de presión entre dos puntos de un líquido, causa del movimiento de este líquido, es lo que se llama carga. Consideremos un tubo de derrame de agua. En uno de sus extremos, la presión será, por ejemplo, de tres atmósferas; en el otro extremo será de una atmósfera, si desemboca en el aire. Se dirá que la carga entre las dos extremidades del tubo es de dos atmósferas. El derrame se producirá bajo la influencia de esta carga.

Si se desea conocer la presión en un punto de un líquido, basta colocar en este punto la extremidad inferior de un tubo de vidrio abierto en sus dos extremos. El líquido penetra en el tubo y sube a una altura que da la presión en el punto considerado. Semejante tubo se denomina *tubo piezométrico.*

Cuando un líquido se derrama a través del orificio *O* de un vaso, siendo las paredes muy delgadas a nivel de este orificio, de manera que se evite el rozamiento de las moléculas líquidas contra las paredes sólidas, la velocidad a la salida está dada por la relación $V=\sqrt{2gh}$, siendo h la altura del nivel por encima del orificio (fig. 127). Esto quiere decir que las moléculas líquidas tienen la misma velocidad que si cayeran en caída libre de la altura h.

Si un líquido se derrama a través de un tubo cilíndrico (fig. 128) hay, ante todo, que hacer notar que la velocidad del líquido debe ser la misma en todos los puntos del trayecto, porque el líquido es prácticamente incompresible. En el mismo tiempo debe pasar la misma cantidad a través de la superficie *AA'* que a través de la superficie *BB'*. Siendo estas dos superficies iguales, la velocidad es la misma. Si, por el contrario, el tubo es de sección brusca o gradualmente variable (fig. 129), debe también pasar la misma cantidad de líquido a través de *AA'* y de *BB'*, pero evidentemente, en este caso, la velocidad es tanto menor cuanto mayor es la superficie de sección que ha de atravesar.

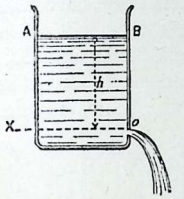


Fig. 127

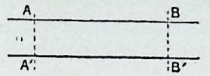


Fig. 128

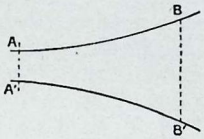


Fig. 129

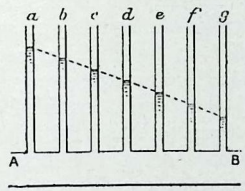


Fig. 130

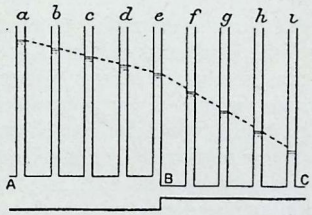


Fig. 131

Veamos ahora lo que pasa para las presiones. En un tubo cilíndrico de sección uniforme (fig. 130) el líquido corre de las partes de mayor presión *A*, hacia las partes de más baja presión *B*. La experiencia demuestra que entre estos dos puntos la baja de presión se distribuye uniformemente, es decir, que los niveles en los tubos piezométricos se encontrarán

todos en una línea recta, como lo indica la figura. Si a partir de cierto punto la sección del tubo disminuye (fig. 131), se verá hacerse más rápida la caída de presión en la parte estrecha del tubo que en la parte ancha. Si, por el contrario (fig. 132), el calibre aumenta, la parte de presión se hace más lenta. Por último, si en una región B de un tubo, por cualquier causa, se produjera un aumento de resistencia (fig. 133), inmediatamente este aumento se traduciría por esta caída de presión, tras la que la disminución de altura de los niveles

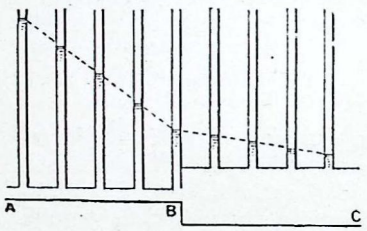


Fig. 132

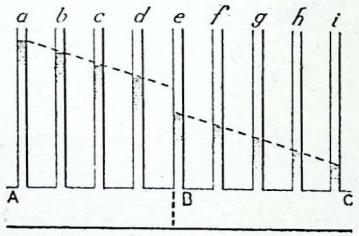


Fig. 133

piezométricos recobraría la misma marcha que antes, si el tubo tiene el mismo calibre. La cantidad de líquido que sale por un tubo varía según su sección, su longitud, la naturaleza de sus paredes y la presión. La ley que rige este gasto es bastante complicada; nos bastará decir que la cantidad de líquido que se derrama, en el mismo tiempo, a través del mismo tubo, es proporcional a la raíz cuadrada de la diferencia de presión que se ejerce en sus dos extremidades; dicho de otro modo, para doblar el derrame, hay que cuadruplicar la presión.

Esto no es aplicable más que a los tubos de gran diámetro; la ley de derrame de líquidos en los tubos capilares es totalmente diferente de la mencionada. Debemos a Poiseuille un estudio muy completo de esta cuestión. Hizo ver este sabio que, en un mismo tubo capilar, la cantidad de líquido derramado es proporcional a la presión, y no a la raíz cuadrada de la presión, como para los tubos anchos. Además, demostró que el gasto, bajo una misma presión, está en razón inversa de la longitud del tubo. Es preciso, para que esta ley

se cumpla, que la longitud no caiga por debajo de cierto límite, variable con el diámetro del tubo. Así, para un diámetro de 0,1 mm., basta con algunos milímetros de longitud; para 0,5 mm. de diámetro, es preciso, por lo menos, 150 mm. de longitud. Por último, en las mismas condiciones, el derrame aumenta con la cuarta potencia de los diámetros. Es decir, que si el diámetro se duplica, se derraman diez y seis veces más líquido, si se triplica, se derraman ochenta y una veces más.

Se puede, pues, expresar la ley de derrame en los tubos capilares por la fórmula

$$Q = K\frac{PD^4}{L},$$

siendo K un coeficiente que depende de la naturaleza del líquido y de la temperatura.

Poiseuille ha demostrado también que existe en las inmediaciones de la pared de los tubos capilares una capa líquida inmóvil. Duclaux, mediante una serie de ingeniosas experiencias, ha comprobado la existencia de esta capa y ha podido medirla para un cierto número de líquidos. Resulta, pues, que cuando un líquido corre por un tubo capilar, se desplaza sobre un cuerpo de su misma naturaleza. La resistencia que experimenta depende, pues, de lo que hemos llamado rozamiento interior del líquido, o de la viscosidad, y el derrame de los diversos líquidos en los tubos capilares permite, como veremos más adelante, medir esta viscosidad.

Canalización ramificada. — Cuando en lugar de un tubo único se tiene una canalización ramificada, todos los problemas relativos al derrame de los líquidos se complican mucho.

Es imposible dar reglas generales; en cada caso hay que estudiar por trozos lo que pasa entre dos ramificaciones.

Régimen no permanente. — En todo lo que precede, hemos supuesto que estaba establecido el régimen permanente, es decir, que en cualquier punto el líquido conservaba siempre la misma velocidad.

Con frecuencia no ocurre así. Esto sucede, por ejemplo,

cuando en lugar de dejar el agua de un depósito de nivel constante derramarse libremente en un conducto, este líquido sea lanzado en los tubos por una bomba. En muchos casos, el efecto de esta bomba no será lanzar una corriente continua, sino producir una serie de ondas. En el origen del conducto, la velocidad del agua, primero nula, irá aumentando hasta un máximo, después descenderá a cero, para repasar periódicamente por los mismos estados.

Estas condiciones están aún mal estudiadas, pero se sabe que se produce en estos casos grandes pérdidas de carga. Para reducir estas pérdidas, es preciso dar a los conductos cierta elasticidad. Se puede conseguir esto, bien utilizando conductos de pared elástica, bien colocando en el origen de estos conductos un amortiguador de aire.

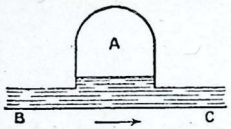


Fig. 134

Supongamos, por ejemplo, que sobre un conducto BC (fig. 134) recorrido por una corriente variable de izquierda a derecha, se coloca una campana A que contiene aire; esto no impide pasar el líquido. A cada aumento de presión que venga por B, el aire A será comprimido, no se producirá onda brusca por la parte de C. El líquido no se derramará sino poco a poco hacia la derecha y, a pesar de las variaciones de presión que vienen por B, la corriente será sensiblemente continua en C. Se puede hacer esta continuidad tan grande como se quiera, haciendo A bastante grande. En estas condiciones, las pérdidas de carga del conducto están muy disminuídas, y se aprecia que la misma bomba da un derrame mucho mayor. Cuando, en el caso de una corriente intermitente, no existe reservorio elástico en el origen de esta cañería, se puede conseguir la atenuación de las oscilaciones por la elasticidad de las paredes de los tubos, como vimos a propósito de la elasticidad. Se comprenderá el interés de estos hechos cuando estudiemos la circulación de la sangre.

Trabajo necesario para producir un derrame determinado. — Consideremos un conducto AB, siendo A la abertura por la que el agua entra en el conducto bajo una presión P, y v la velocidad del derrame.

Todo ocurre como si en A hubiera un pistón de sección exactamente igual a la del tubo y que avanzase con una velocidad v. ¿Cuál es la cantidad de trabajo consumido para hacer avanzar el pistón? Siendo p la presión por unidad de superficie y S la superficie del pistón, la presión total sobre el pistón será pS. Ahora bien; como en un segundo recorre un camino v, el trabajo consumido será pSv. Pero Sv es la cantidad Q de agua derramada por segundo; el trabajo estará, pues, representado por pQ.

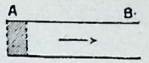


Fig. 135

Es decir, que el trabajo necesario para lanzar un líquido en un conducto, es igual al producto de la cantidad de líquido derramado por la presión en el origen del conducto.

XII. — Circulación

Revolución cardíaca

Todos los vertebrados, salvo el amphioxus, tienen un corazón. En los vertebrados inferiores se compone de una aurícula y de un ventrículo; después se ve que, primero, se divide la aurícula y después, el ventrículo. En las aves y en los mamíferos existe una separación completa entre lo que se llama el corazón derecho, que contiene la sangre venosa y se compone de una aurícula y un ventrículo, y el corazón izquierdo, que contiene la sangre arterial y se compone también de una aurícula y de un ventrículo.

En los dos corazones, la sangre afluye por las venas y es lanzada por las arterias. Salvo en casos excepcionales, las dos aurículas se contraen simultáneamente dando el sístole auricular, después los dos ventrículos se contraen también simultáneamente, dando el sístole ventricular.

Si se observa lo que ocurre durante una revolución del corazón, es decir, entre dos retornos al mismo estado, se aprecia primero un período de reposo completo, el corazón está en diástole, las aurículas se llenan de sangre. En un momento dado, las aurículas lanzan una parte de su contenido en los ven-

tríctulos a través de los orificios auriculoventriculares; muy rápidamente después de este sístole auricular, se produce el sístole ventricular, lanzando la sangre a la aorta y a la arteria pulmonar. Válvulas colocadas en los orificios auriculoventriculares, válvula mitral a la izquierda y tricúspide a la derecha, impiden durante este tiempo que refluya la sangre de los ventrículos, así como las válvulas aórticas y pulmonares impiden que retroceda la sangre a los ventrículos durante su diástole.

El corazón funciona como una bomba dotada de válvulas para tomar la sangre de las venas y lanzarla en las arterias.

La frecuencia de los latidos es muy variable, según las especies animales; veremos, a propósito del calor que, en los mamíferos, esta frecuencia está íntimamente ligada con el tamaño de los animales.

En un mismo animal pueden también hacer variar esta frecuencia diversas condiciones, como el trabajo muscular, la temperatura, la presión y otros factores más difíciles de precisar. En condiciones en apariencia idénticas, existen variaciones individuales notables para una misma especie. Así, en el hombre sano, se ha visto con frecuencia, por minuto, caer a 20 y ascender a 120; las cifras medias son: 70 para el hombre y 80 para la mujer. En los niños, puede elevarse normalmente a 100.

Durante una revolución del corazón, la duración de los sístoles permanece sensiblemente constante de un individuo a otro. Se pueden tomar como cifras sencillas, fáciles de recordar: 0",5 para el descanso mayor; 0",1 para el sístole auricular; 0",1 para el descanso menor, y 0",3 para el sístole ventricular. Esto daría 60 latidos por minuto; las variaciones recaen principalmente sobre el descanso mayor.

La revolución cardíaca se manifiesta exteriormente por los latidos y el choque del corazón.

El primer ruido, sordo, corresponde al sístole ventricular. El segundo ruido, breve y más claro, al fin de este sístole.

El segundo ruido es debido al chasquido de las válvulas aórticas y pulmonares, es generalmente único; estos dos grupos de válvulas funcionan casi simultáneamente; no obstante, en cierto número de personas, hay un desdoblamiento potente

de este segundo ruido, y es fácil darse cuenta de las causas de este fenómeno. La presión sanguínea es menor en la arteria pulmonar que en la aorta; las válvulas sigmoideas, al fin del sístole, en el momento en que la sangre tiende a refluir de las arterias al corazón, están sometidas a una acción menor en la arteria pulmonar que en la aorta y, por consiguiente, se cierran con mayor lentitud. En general, esta diferencia es demasiado pequeña para ser percibida; pero, como hemos dicho, en ciertos individuos es suficiente para dar lugar al desdoblamiento. Hagamos notar, además, que en el momento de la inspiración, el pulmón se dilata, la presión del aire baja en este pulmón y hay una aspiración de sangre en sus vasos, lo que produce, además, un descenso de presión en la arteria pulmonar. Por esta razón, el desdoblamiento del segundo ruido es más claro al final de la inspiración, sobre todo cuando se hace una inspiración forzada. En ciertos casos patológicos, puede ocurrir que la presión se haga más grande en la arteria pulmonar que en la aorta; es lo que tiene lugar en la estrechez mitral en la que, por efecto de la resistencia que la sangre encuentra a su paso por el orificio auriculoventricular izquierdo, hay aumento de presión en las venas y en la arteria pulmonar, y disminución en la aorta. Entonces hay también desdoblamiento del segundo ruido, pero las válvulas pulmonares chocan antes que las aórticas.

El primer ruido es complejo, es un ruido muscular acompañado del que produce el cierre de las válvulas auriculoventriculares; es debido también, en parte, a movimientos del líquido.

El choque del corazón se produce en el quinto espacio intercostal izquierdo, raras veces en el cuarto. Coincide con el sístole ventricular, y es debido a los cambios de forma y de posición del corazón. Estos cambios ocasionan una variación de la presión del corazón contra la pared torácica que se traduce hacia el exterior. Más adelante volveremos a ocuparnos con más detalle del choque del corazón.

Estudio de la presión en el corazón

Durante una revolución cardíaca, existen en las diversas cavidades del corazón variaciones de presión correspondientes

a las diferentes fases. El estudio de estas variaciones es de lo más importante, porque ellas son las que regulan la circulación de la sangre en los vasos. Chauveau y Marey han sido los primeros en estudiarlas en el caballo, utilizando para ello sondas cardíacas. Una sonda cardíaca simple se compone esencialmente de un tubo metálico *t*, que lleva en una de sus extremidades una ampolla elástica *a*. La otra extremidad está unida, por medio de un tubo de caucho, con un

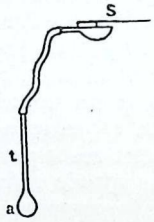


Fig. 136

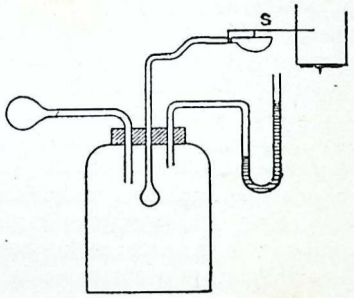


Fig. 137

tambor de Marey; todo el aparato está lleno de aire. Se puede introducir la sonda en el ventrículo izquierdo pasando por la carótida. Desde aquel momento, la ampolla *a* estará sometida a todas las variaciones de presión que se produzcan en el ventrículo, y las variaciones de volumen de esta ampolla podrán ser registradas por medio del estilo *s* apoyado sobre un cilindro giratorio.

Una vez trazada la curva, para conocer la presión real sobre *a* que ha producido un desplazamiento dado del estilo *s*, es preciso graduar el aparato. Al efecto, se introduce la ampolla en un frasco bien tapado con un tapón de tres agujeros; uno da paso a la sonda, el segundo a un manómetro, el tercero a un aparato de compresión, una jeringa o una pera. Se establecen entonces en el frasco presiones de 1, 2, 3... cm. de mercurio, se registran las variaciones correspondientes del estilo, y se tiene así una escala que permite estudiar todas las curvas de presión obtenidas por medio de la sonda que se acaba de graduar.

Es imposible penetrar de una manera análoga en la aurícula izquierda; sería preciso, en efecto, llegar por las venas pulmonares.

Para el corazón derecho, Chauveau y Marey han hecho sondas dobles (fig. 138). Dos tubos concéntricos están en comunicación, uno con la ampolla superior, otro con la inferior. Se penetra por la vena yugular. Se llega a la aurícula derecha y de allí se pasa al ventrículo por el orificio auriculoventricular. La distancia de las dos ampollas está reglada de tal modo que cuando la primera está en el ventrículo, la segunda queda en la aurícula. Las demás operaciones se realizan como para la sonda simple.

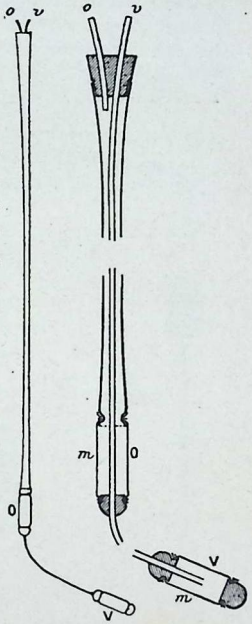


Fig. 138

Si se desea tener la presión de la aorta por encima de las válvu'as sigmoideas, se puede obtener por medio de la sonda simple, retirando esta sonda lo suficiente para pasar encima de las válvulas.

Otro procedimiento consiste en introducir en la cavidad a explorar una extremidad de un tubo abierto por los dos extremos; la otra extremidad está unida a un manómetro registrador al que se transmite la presión. En estas condiciones, todo el espacio comprendido entre el manómetro y la cavidad que hay que explorar debe estar lleno de líquido; la presencia de aire sometido a variaciones de presión daría lugar a oscilaciones que falsearía las indicaciones del aparato. El empleo del manómetro de mercurio no es recomendable para esta clase de investigaciones; a consecuencia de la inercia enorme de este líquido, las indicaciones de este instrumento están considerablemente alteradas en cuanto está en régimen variable. Por esto se han ideado numerosos dispositivos para reemplazarlo.

En realidad, no se pone la cavidad en donde se quiere estudiar la presión en comunicación directa con el tambor de Marey, porque siendo esta presión generalmente demasiado fuerte, la membrana del tambor se rompería. Se evita este inconveniente por medio del esfigmoscopio de Chauveau. Este instrumento da muy buenos resultados, tiene la ventaja de

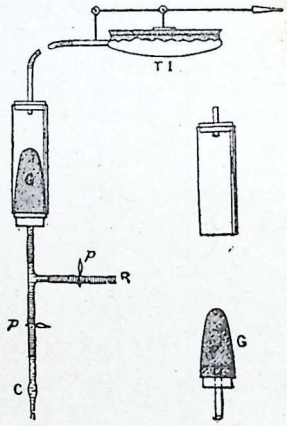


Fig 139

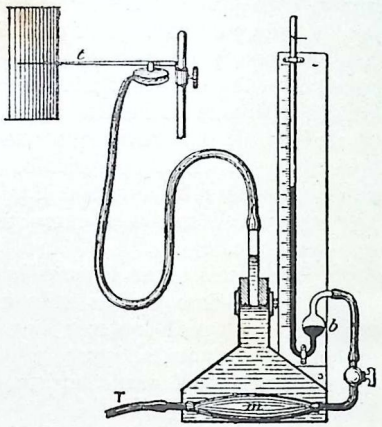


Fig. 140

ser fácil de construir, pero, desgraciadamente, es preciso graduarlo con frecuencia, si no después de cada experiencia. Se compone esencialmente de un dedo de guante de caucho (fig. 139) con el que se cubre un tapón perforado dotado de un tubo de cristal como indica la figura. Por este tubo de cristal es por donde se une este aparato, cuidadosamente lleno de líquido, con la sonda manométrica. Con las variaciones de presión, el dedo de guante sufrirá cambios de volumen; para registrarlos, se introduce el tapón cubierto de su dedo de guante en un tubo de cristal cuya otra extremidad está provista de un tapón a cuyo través pasa un tubito de cristal, unido, mediante un tubo de caucho, a un tambor de

Marey. Es fácil darse cuenta, mirando la figura, del modo cómo funciona el instrumento. Basta graduar el aparato como se hace para las sondas de Chauveau y Marey.

Marey ha construído un aparato fundado en el empleo de las cápsulas del barómetro aneroide. La sangre comunica con el interior de esta cápsula (fig. 140) colocada en un frasco cerrado, que contiene líquido hasta cierta altura. El aire que se encuentra por encima de este líquido se halla en comunicación con un tambor registrador de Marey. El aparato está dotado, además, de un manómetro de mercurio que se puede aislar y que permite una fácil comprobación. Para ello se pone el tubo *T* en comunicación con un reservorio en el que se hará variar la presión; bastará una simple jeringa. Se abrirá la llave de acceso al manómetro y se leerán las presiones que corresponden a las diversas excursiones del estilete registrador. Cuando se quiere obtener un trazado, se cierra la llave para evitar que las oscilaciones de la columna de mercurio actúen sobre la cápsula manométrica.

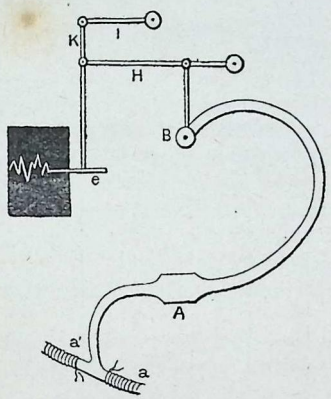


Fig. 141

Fick ha empleado dos dispositivos diferentes. Uno de ellos (fig. 141) es, en suma, un tubo de manómetro Bourdon, a cuyo interior se hace llegar el líquido del que se quiere estudiar la presión, y cuyos movimientos amplificados se inscriben mediante un sistema de palanca indicado en la figura. En el otro, el líquido llega a una pequeña cavidad *b* (fig. 142) y rechaza más o menos una membrana de caucho *c* que lleva un botón de marfil *d*. Este botón tropieza contra un resorte *f* cuyas flexiones son registradas por la palanca *h*.

Además de éstos, se han ideado otros aparatos por diversos

autores, que no son más que modificaciones de los que acabamos de describir.

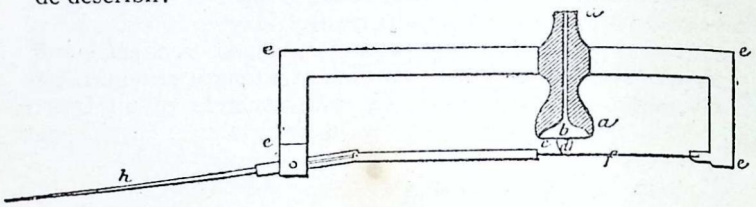


Fig. 142

Veamos ahora cuáles son los resultados obtenidos.

La figura 143 es una representación esquemática de las va-

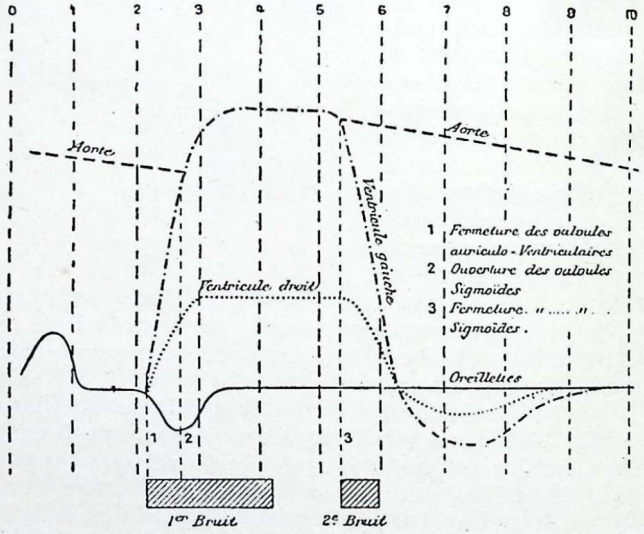


Fig. 143

riaciones de presión en las cavidades del corazón; con todo, la presión de las aurículas ha sido exagerada con el fin de hacer el trazado más patente. Se han indicado también los mo-

mentos de los movimientos valvulares y los ruidos del corazón. Se observa que los ventrículos se contraen simultáneamente y que entre su sístole y el de las aurículas existe cierto intervalo. Este intervalo es muy variable; hasta ha escapado a ciertos autores, pero Chauveau ha establecido su existencia. El sístole auricular va seguido a cierto intervalo de una aspiración que sería debida principalmente a un descenso del suelo de las aurículas. De la misma manera, el sístole de los ventrículos va acompañado de una caída análoga de la presión. Se ve que el máximo de presión en el ventrículo izquierdo es muy superior al del ventrículo derecho. La presión en la aorta nunca cae muy baja; en el momento en que se ha elevado la tensión en el ventrículo izquierdo, las válvulas sigmoideas se abren, se produce una oleada de sangre que hace aumentar la presión en la aorta y grandes vasos vecinos. El conjunto elástico de estos vasos desempeña el mismo papel que el globo colocado en los tubos de los pulverizadores; se dilatan, y después de cerrarse las válvulas sigmoideas, la presión no desciende sino lentamente hasta una nueva contracción.

He aquí, no las cifras absolutas de las presiones que se observan, sino los valores aproximados y relativos. Chauveau y Marey han encontrado en el caballo:

Aurícula derecha . . .	2,5	mm. de mercurio
Ventrículo derecho . . .	24	—
— izquierdo . .	128	—

de Jäger en el perro de gran talla:

Ventrículo izquierdo	191
Aorta	177

Goltz y Gaule en el perro de gran talla:

Ventrículo derecho.	53
Aorta	130

Es mucho más fácil obtener trazados de la presión en los gruesos vasos que en el corazón; la experiencia se realiza generalmente en la carótida y en la femoral. Para ello se

comienza por ligar el vaso; después se introduce en el cabo central una cánula de tres ramas *c*. Una de las otras ramas está provista de un tubo de caucho en el que se coloca una pinza *p*. El tercer tubo está unido, mediante un tubo de caucho, con una pinza en *m* al aparato registrador, que, en el caso de la figura, es un manómetro de mercurio (fig. 144).

Antes de colocar la cánula en la carótida, se han llenado

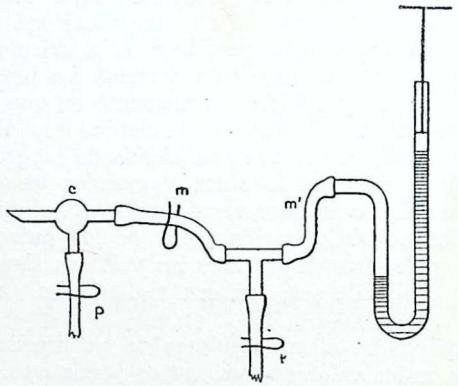


Fig. 144

todos los tubos de caucho y la cánula de una solución concentrada de sulfato sódico, para retardar las coagulaciones. Una vez colocada la cánula *c*, se introduce en *t* la punta de una jeringa cargada de la misma solución, y se aprieta sobre el pistón hasta que el manómetro indique aproximadamente la presión supuesta de la sangre, se cierra la pinza *t* y se abre *m*. Inmediatamente se ve oscilar el mercurio, y si la rama libre está provista de un flotador, se pueden registrar sobre un cilindro giratorio todas las variaciones de presión (fig. 145). Si se produce una coagulación de sangre, se lleva la pinza *m* a *m'*, se aprieta provisionalmente la arteria con los dedos y abriendo *p* y *t* se practica una inyección con sulfato sódico por *t*; sale por *p* arrastrando los coágulos. Después se cierra de nuevo *p* y *t* y se abre *m'*.

Con frecuencia se llega con semejante lavado a desembarazarse por completo de los coágulos y a poder continuar el trazado.

En esta experiencia la inercia del mercurio tiene menos influencia que en las investigaciones sobre el corazón, porque

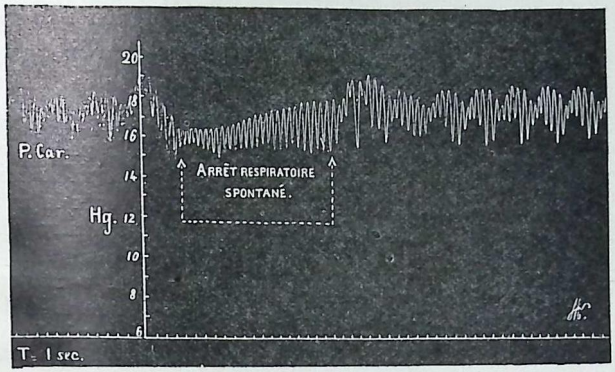


Fig. 145

las variaciones de presión y, en consecuencia, las oscilaciones, son mucho más limitadas.

El aparato indicador varía, aunque el dispositivo antes mencionado, debido a Ludwig, sea el más corriente. Hales, que hizo las primeras experiencias de esta índole, colocaba simplemente la arteria en comunicación con un tubo vertical en el que subía la sangre, con lo que resultaba una verdadera hemorragia. Poiseuille es el que le adicionó el manómetro de mercurio y Ludwig el que lo hizo registrador. Se puede también utilizar un manómetro elástico.

En el caso en que nos contentemos con estudiar la presión media, se puede utilizar el manómetro de Marey, en el tubo del que hay una estrangulación *e*, que crea al paso de la sangre una resistencia tal que resulta un amortiguamiento de las oscilaciones. Se establece entonces un nivel medio (fig. 146).

Sería muy importante, tanto desde el punto de vista de la fisiología como de la patología, poder determinar la presión

sanguínea en el hombre, sin, claro está, producir ninguna lesión. El ideal sería determinar todas las variaciones de la presión sanguínea en una arteria, como se hace en los animales en el laboratorio, pero esto parece imposible. Hasta ahora, los aparatos imaginados no tienen por fin más que medir, bien la presión máxima sola, bien los límites entre los que oscila la presión.

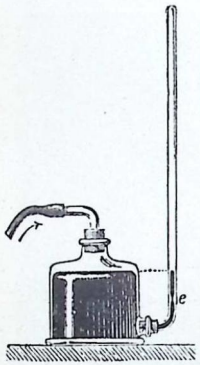


Fig. 146

Método de Bloch. — Bloch ha propuesto un procedimiento muy sencillo para evaluar aproximadamente la presión máxima en la radial. Consiste en coger la muñeca del sujeto, colocando los cuatro dedos por debajo y el pulgar por encima aplicado sobre la radial, en el punto en donde se toma el pulso. Mediante un tallo que obra sobre un resorte en espiral encerrado en un estuche, se ejerce una presión sobre la uña del pulgar hasta que la onda sanguínea deja de pasar (fig. 147). En este momento se lee sobre una graduación la magnitud de la presión ejercida.

Hagamos notar que el pulgar no debe por sí mismo ni ayudar ni dificultar la compresión; debe permanecer absolutamente pasivo; esta es una primera dificultad, pero a la que se puede uno habituar.

Otra causa de error resulta de la apreciación del momento en que la onda sanguínea deja de pasar bajo el pulpejo del pulgar, pero únicamente late contra él. En fin, es evidente que, para una misma fuerza total leída en la graduación, la compresión de la arteria es diferente según que el pulgar del operador está en contacto con la muñeca del sujeto por una superficie más o menos considerable. No insisto sobre otras causas de error.

No hay que exigir a este instrumento más que la indicación aproximada, entre las manos de un mismo operador, de una presión alta o baja. En estas condiciones, como es muy portátil, puede prestar servicios.

Método de Basch-Potain. — Este procedimiento ha sido imaginado por von Basch y perfeccionado por Potain. Se comprime la radial mediante una pequeña pelota de caucho llena de aire y unida a un manómetro metálico (fig. 148). Tactando la arteria bajo del punto comprimido, se comprueba que

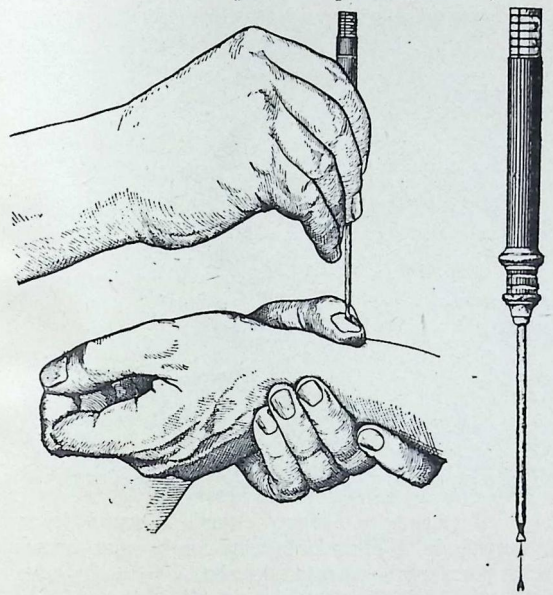


Fig. 147. — Método de Bloch

el pulso deja de latir; en este momento se lee la presión del manómetro que se considera como representando la tensión arterial. Es evidente que mientras la presión exterior a la arteria es inferior a la tensión sanguínea, la sangre puede circular, puede forzar el paso; pero desde el momento en que el vaso queda obliterado por ser la presión exterior superior a la interior, la circulación cesa. Este razonamiento supone que no existe ninguna resistencia pasiva interpuesta entre la sangre y el aire contenido en la pelota, lo que no es rigurosamente exacto. En efecto, la pared de la arteria, los tejidos, la piel,

se oponen a la compresión y de ello resulta un ligero error por exceso. No obstante, parece que clínicamente no tienen gran importancia los errores debidos a esta causa; pero una aplicación viciosa del método puede conducir a resultados erróneos. He aquí cómo se debe operar:

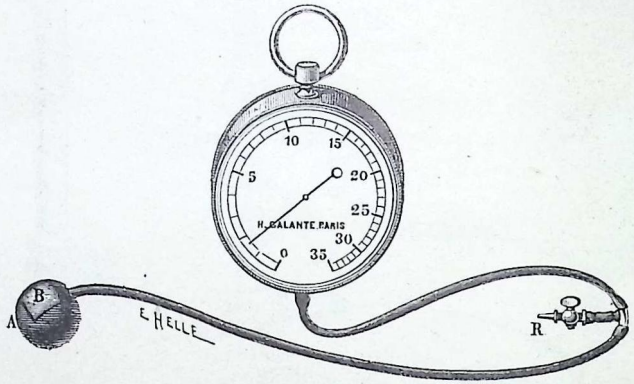


Fig. 148

Se comienza por hinchar moderadamente la pelota por la llave *R*, que se cierra en seguida. Potain partía así de la división 5 del manómetro. Después, estando la mano del sujeto en semipronación, el operador la toma con la mano homónima (derecha, por explorar la mano derecha) y toma el pulso con el índice (fig. 149). Al mismo tiempo, para evitar los errores debidos a la recurrencia del pulso, aplasta la radial en primer lugar con el medio colocado un poco por debajo del índice, en segundo lugar con el anular comprimiendo en la tabaquera anatómica. El pulgar sirve para mantener la muñeca. Con el índice de la otra mano se aprieta la pelota sobre la arteria, encontrándose el sector *B* de caucho delgado sobre esta arteria, por encima del punto en donde se toma el pulso, y se busca la posición que permite interceptar el pulso con la presión mínima. Se puede, efectivamente, por una posición viciosa de la pelota, comprimir sobre un tendón, lo que daría una presión demasiado elevada.

Es necesario que el sujeto abandone completamente su mano, sin poner rígida en lo más mínimo la muñeca; lo mejor es apoyarla sobre la rodilla del operador, cuyo pie estará sobre un taburete, sobre un barrote de silla o un hierro de cama,

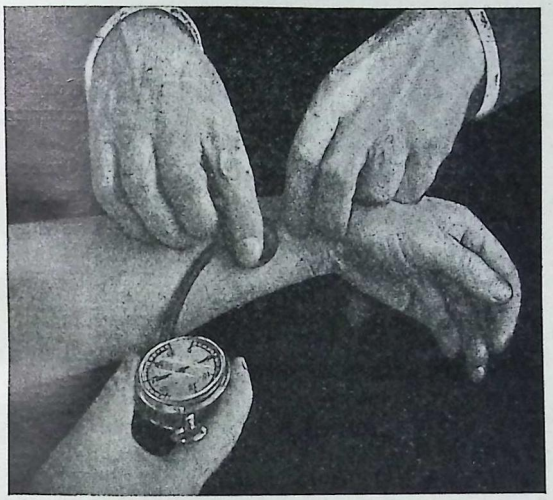


Fig. 149. — Método de Basch-Potain

de modo que se mantenga la muñeca a la altura del corazón del sujeto.

Los resultados obtenidos por este método, después de numerosas medidas tomadas por Potain, han sido publicados, después de su muerte, por su discípulo P. Teissier. Es interesante recordar aquí, por lo menos, los medios de las presiones encontradas en las diversas edades en el sujeto normal:

De 6 a 10 años.	9	centímetros
— 10 a 15 —	13,5	—
— 15 a 20 —	15	—
— 20 a 25 —	17	—

De 25 a 30 años.	18	centímetros
— 30 a 40 —	19	—
— 40 a 50 —	20	—
— 50 a 60 —	21	—
— 60 a 80 —	24	—

El aparato de Potain tiene la ventaja de poderse aplicar a la medida de la tensión de cualquier arteria de la que se puede notar el pulso, y que puede comprimirse a través de la piel sobre un plano resistente, de modo que se interrumpa en ella la circulación.

En general, se opera sobre la radial, con las precauciones antes indicadas; la temporal o la pedia se prestan también a esta medida.

Ahora bien; junto a estas ventajas tiene grandes inconvenientes. El empleo del esfigmomanómetro de Potain exige una práctica bastante grande de su manejo. El hecho de borrar más o menos completamente las recurrencias, de encontrar la mejor posición para la pelota, de percibir delicadamente el pulso con el índice de la misma mano que suprime la recurrencia, son factores que pueden influir en el resultado y conducir a errores variables según los operadores. Por ello se han buscado procedimientos menos sujetos a estos errores individuales.

Método de Riva-Rocci. — Existen numerosos aparatos fundados en el principio de Riva-Rocci. La medida de la presión se practica en la humeral. El método consiste en aplicar al brazo del sujeto, hacia su parte media, un brazal formado por una bolsa de caucho protegida por una tela y apretada contra el brazo por un medio variable según los modelos. Esta bolsa está unida a un compresor de aire y a un manómetro. Se busca cuál es la presión de aire necesaria para que la humeral cese de ser permeable para la sangre o, más exactamente, para que el pulso radial deje de ser perceptible. En resumen, la pelota de Basch-Potain, que comprimía la radial, ha sido substituída por un brazal circular que, obrando sobre todos los tejidos del brazo, comprime por su intermedio la humeral.

En el aparato primitivo de Riva-Rocci, el brazal estaba formado por una bolsa de caucho de 4-5 cm. de anchura, recubierta de una guarnición de seda y bastante larga para dar, por lo menos, una vez la vuelta al brazo sobre el que se arrollaba, sujetándolo por una especie de pinza de corbata. El interior del brazal comunicaba, por un tubo de caucho, con

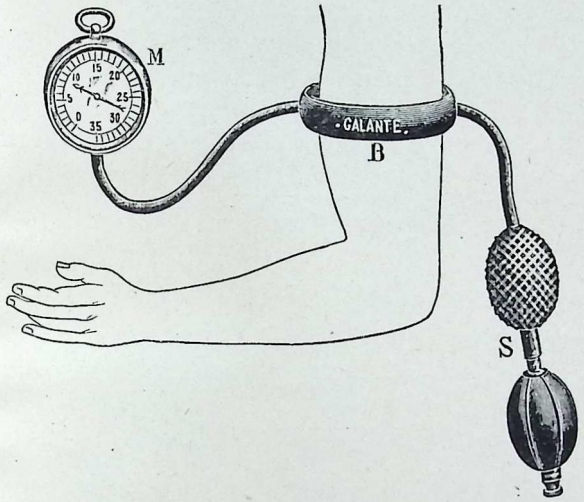


Fig. 150. — Método de Riva-Rocci

un manómetro de mercurio y un insuflador de Richardson. Se comprobaba que la arteria estaba o no permeable tomando el pulso del sujeto y se leía la presión correspondiente al momento límite en que el pulso dejaba de ser percibido.

De este método derivan varios aparatos, por una modificación, bien del brazal, bien del manómetro, bien del modo de comprimir el aire o del procedimiento empleado para comprobar la permeabilidad de la humeral.

Actualmente, el modelo más perfecto es el esfigmoseñal de Vaquez. Se compone esencialmente de un reservorio, en el que se hace una provisión de aire comprimido por medio de una bomba de bicicleta. El brazal compresor de la humeral, del

que nos volveremos a ocupar, está unido a este reservorio y a un manómetro metálico en el que se leerá la presión ejercida en el brazal.

Para reconocer si la sangre continúa o no pasando, en lugar de tomar el pulso, se fija en el antebrazo, un poco por

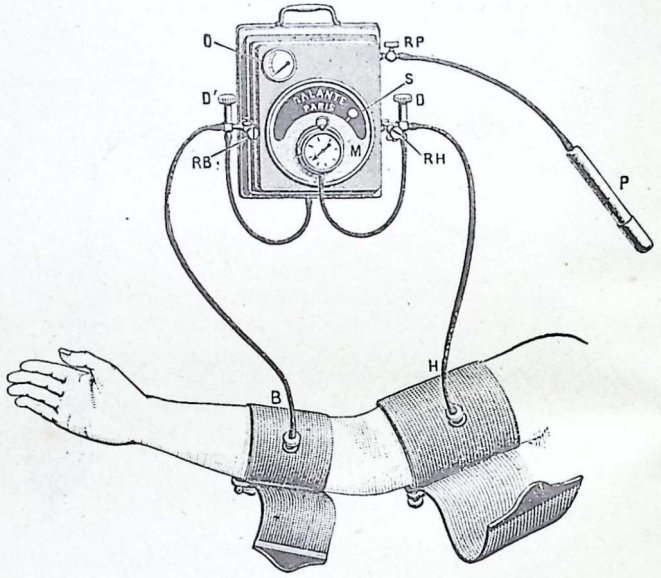


Fig. 151. — Método de Vaquez

debajo del pliegue del codo, un segundo brazal, unido igualmente al reservorio de aire comprimido y a una señal de construcción especial.

Cuando, abriendo la llave *RB*, se hace subir poco a poco la presión en el brazal explorador, se ve que la aguja de la señal se desvía del cero, y que adquiere una posición variable según los sujetos, en la que se pone a oscilar periódicamente, de una manera sincrónica con el pulso. Obtenido este resultado, se hace pasar aire al brazal compresor y se lee el manómetro en el momento en que la saeta de la señal cesa de

latir. Se admite que de esta manera se obtiene la presión sanguínea máxima. Esto equivale a decir que la presión del aire del brazal compresor ha bastado precisamente para vencer la presión sanguínea.

En realidad, esto no es exacto; Pachon ha demostrado que cuando la saeta de la señal de Vaquez cesa de oscilar, no

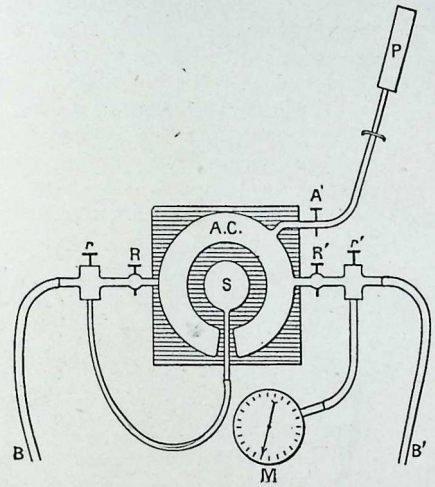


Fig. 152. — Esquema de las conexiones de la señal de Vaquez

A. C., reservorio de aire comprimido; *P*, bomba; *S*, señal; *M*, manómetro; *B*, brazal explorador; *B'*, brazal compresor; *R*, llave para dar admisión al aire comprimido, al brazal explorador y a la señal; *r*, llave de fuga para deshinchar más o menos el brazal explorador y la señal en el caso en que se hubiera dejado subir la presión demasiado; *R' r'*, llaves que desempeñan el mismo papel para el brazal compresor y el manómetro

depende de que la corriente sanguínea está detenida, sino de que está *regularizada*, la bolsa de caucho del brazal compresor funciona entonces como el globo del aparato de Richardson. La parada de las oscilaciones de la saeta no corresponde, pues, al momento en que la presión del aire del brazal es igual a la presión máxima de la sangre en las arterias.

Método de Gærtner. — En este método se hace uso de un anillo metálico, dotado en su interior de una bolsa de caucho

(fig. 153). Se pasa este anillo por uno de los dedos a nivel de la segunda falange; después se expulsa la sangre de la extremidad del dedo por medio de una ligadura de caucho *AB* que se arrolla sobre él, partiendo de la extremidad distal (fig. 154). Hecho esto, se comprime aire en el anillo por el tubo *T* y se quita la atadura (fig. 155). La sangre no puede volver a la extremidad del dedo, que parece blanco, de cera. Se descomprime poco a poco, y se nota el instante en que la uña se vuelve roja; en este momento se lee la presión en el manómetro.

Fig. 153

La aplicación de este método es muy sencilla, el momento del retorno de la sangre es muy preciso y, no obstante, debe ser considerado como

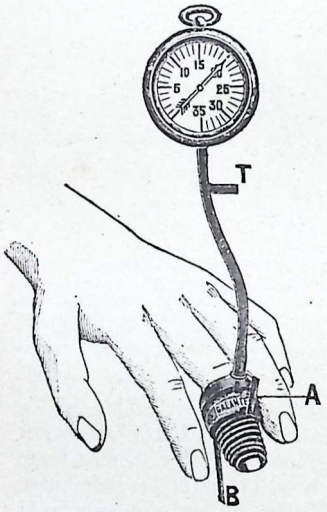


Fig. 154. — Método de Gærtner

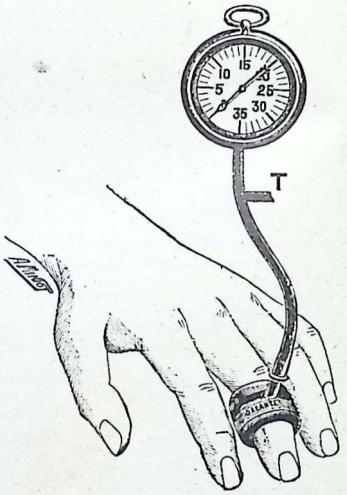


Fig. 155

muy infiel. Aunque bueno en principio, es evidente que sus resultados no pueden ser comparados con los de la señal de

Vaquez, por ejemplo. En un caso se mide una presión de la humeral; en el otro, la de las pequeñas arterias de la extremidad de los dedos, en donde, como es sabido, debe ser más débil.

Pero, además, existe un hecho grave, aparte de toda discusión de principio: no se encuentra la misma presión en los diferentes dedos.

He aquí un resultado de medición:

Indice	13	centímetros
Medio	15,5	—
Anular.	18	—
Auricular	13	—

Como se ve, las diferencias no son despreciables, y no hay ninguna razón que valga para adoptar una cifra con preferencia a las otras. Pero aún hay algo peor. Colocando el anillo en la primera falange, se encuentra, generalmente, una presión más baja que la obtenida en la segunda falange, y debía ocurrir lo contrario. Esto no depende únicamente de la variación de calibre del dedo con relación al anillo, porque no se observa ninguna variación regular desde este punto de vista. Hay, pues, motivo para desconfiar del método de Gærtner.

Método de Marey. — Los métodos precedentes tienen por fin determinar la presión máxima que acompaña a cada sístole cardíaco, o presión sistólica.

Otros aparatos, basados en un principio debido a Marey, permiten medir la presión mínima o diastólica.

Marey ha hecho notar que, si se ejerce sobre una arteria una presión exterior ligeramente superior a la presión mínima interior, la arteria se aplasta completamente en el momento del mínimo interior, mientras que se dilata durante la onda sistólica. En estas condiciones es cuando el volumen exterior de la arteria sufre las mayores variaciones. Para una presión exterior menor, la arteria no se aplasta durante el diástole; para una presión mayor no se dilata tan bien.

Hill y Barnard han aplicado este principio a la medida de la presión diastólica; para esto colocan en el brazo un brazal

B unido a un manómetro *M* y a una bomba de compresión *P* (fig. 156). Comprimiendo el aire en el brazal, se ve que en un momento dado, la aguja del manómetro se pone a moverse; estos movimientos van durante algún tiempo aumentando de amplitud con la presión, luego van disminuyendo. Se lee la presión correspondiente al máximo de amplitud y se considera que corresponde a la presión diastólica.

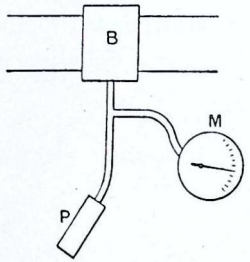


Fig. 156

Las oscilaciones del manómetro metálico son, en general, bastante ligeras y sus desviaciones de amplitud difíciles de apreciar. Pachon ha hecho notar, además, que en el aparato de Hill y Barnard existe una causa de error que depende de que la sensibilidad del manómetro va disminuyendo a medida que la presión interna aumenta, lo que falsea los resultados. Para evitar esta causa de error, Pachon coloca el

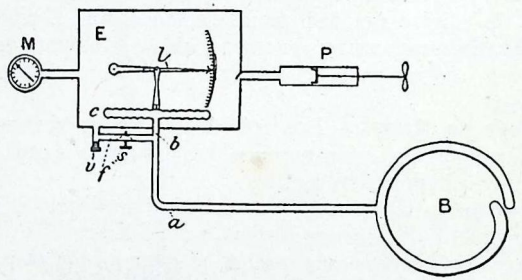


Fig. 157

indicador de las oscilaciones en el interior de un reservorio que contiene aire a la misma presión que el indicador (fig. 157). En este caso, la membrana elástica de este indicador experimenta sobre sus dos caras la misma presión y no está tensa; pero, naturalmente, las pulsaciones que vienen del brazal no la hacen oscilar. Cuando se quiere ver cuál es el valor de las pulsaciones, se aplasta en *s* un tubo de caucho que aisla el brazal

y el interior del indicador de la cámara de aire comprimido en donde se encuentra este último; inmediatamente se le ve mover. El manómetro *M* da la presión del aire. Para hacer una determinación, se ejerce, por medio de la bomba *P*, una presión manifiestamente superior a la de la sangre, después se desciende poco a poco, maniobrando la válvula de escape *V*, y, de vez en cuando, aplastando en *s*, se investiga en dónde están las pulsaciones. La más pequeña presión, que apaga com-

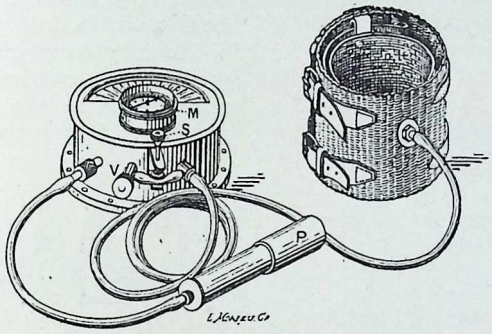


Fig. 158

pletamente las oscilaciones, corresponde a la presión sistólica; la presión que da las oscilaciones máximas corresponde a la presión diastólica.

La figura 157 es un esquema del dispositivo; la figura 158 representa una vista del aparato al que Pachon ha dado el nombre de *oscilómetro esfigmométrico*.

Velocidad de la sangre

El estudio de la velocidad de propagación de la sangre es un problema extremadamente difícil; pero es también muy importante, porque la nutrición de los órganos está directamente ligada a la cantidad de sangre que los irriga.

Para realizar una medición de velocidad de sangre, es preciso absolutamente interrumpir el vaso en un punto de su trayecto e intercalar allí un aparato de medida. Es imposible

por esta operación no introducir una causa de error muy importante. Además, los aparatos en sí son de un manejo muy delicado. Se les puede dividir en dos categorías: aquellos en los que se mide la cantidad de sangre que pasa en un lapso de tiempo determinado, y que no dan, por lo tanto, más que una velocidad media, y los que indican el valor en cada momento y permiten seguir todas las variaciones.

En la primera categoría podemos colocar el más antiguo en fecha de estos instrumentos, el hemodromómetro

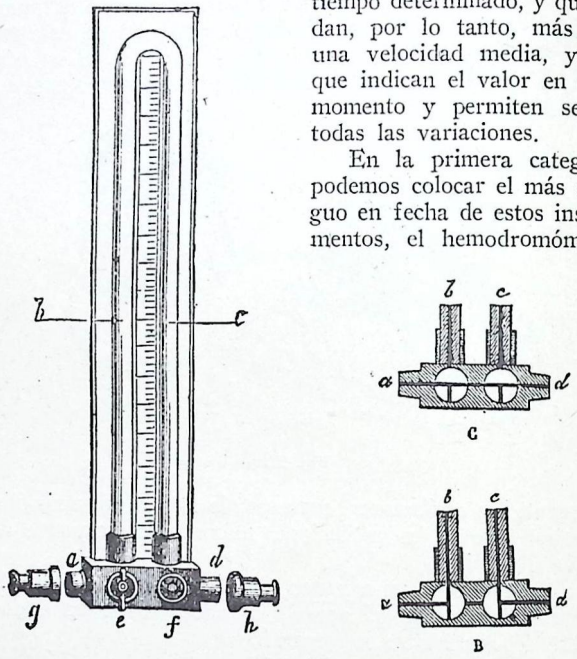


Fig. 159

de Volkmann y el reómetro de Ludwig, que es un perfeccionamiento de aquél (figs. 159 y 160). El hemodromómetro de Volkmann se compone de un tubo en *U* invertida unido a una porción adicional cuyo detalle se ve en *C* y *B*. Se llena el tubo en *U* de agua salada, poniendo las espitas en la posición *C*, se intercala la guarnición metálica en el trayecto del vaso sobre que se experimenta. La sangre entrará, por ejemplo, por *a* y saldrá por *d*.

Bruscamente se colocan las llaves en la posición *B*; la sangre se ve obligada a recorrer el tubo en *U*, y con un reloj de segundos se cuenta cuánto tiempo necesita para expulsar el agua salada delante de sí.

El reómetro de Ludwig (fig. 160) se compone de dos ampollas que comunican entre sí por la parte superior, y terminan inferiormente por tubos sobre los que se ligan los extremos seccionados del vaso.

Se comienza por llenar una de las ampollas de aceite, la otra de suero, y se las intercala en el vaso, estando el aceite en el lado central. En el momento en que se establece la

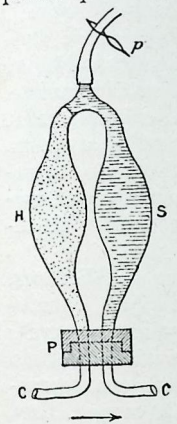


Fig. 160

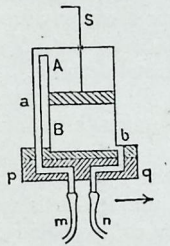


Fig. 161

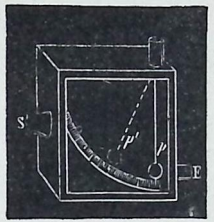


Fig. 162

corriente, el suero es lanzado a la circulación, el aceite ocupa su lugar, siendo él reemplazado por sangre. Si se ha contado cuántos segundos se han necesitado para ello, si, además, se conoce el volumen de las ampollas, se deduce el gasto del vaso. Se puede, en el momento en que todo el aceite ha pasado de *H* a *S*, hacer girar los dos recipientes y substituir uno al otro, y repetir esta misma operación un gran número de veces. Esto permite estudiar el gasto durante un tiempo bastante largo.

En estos últimos tiempos, Hurthle ha modificado el reómetro de una manera muy ingeniosa para convertirlo en un aparato registrador. Las dos ampollas están reemplazadas por dos vacíos dejados a uno y otro lado de un pistón en un pequeño cuerpo de bomba (fig. 161). Los tubos de conducción *a* y *b* desembocan frente a frente de dos conductos excavados en una plataforma *PQ*, que puede girar alrededor de su eje. Estos

dos conductos conducen, por medio de tubos de caucho flexibles, a las cánulas *m* y *n*, destinadas a ser colocadas en el extremo central y periférico de la arteria. En el caso de la figura, la sangre llegará por *m*, el pistón descenderá. En el momento en que habrá llegado al final de su carrera, se hará girar rápidamente la plataforma *PQ* en 180°, de manera que queden invertidas las comunicaciones; el pistón será empujado de abajo arriba, después se hará una rotación en sentido inverso, y así sucesivamente. El pistón se desplaza evidentemente en cantidades proporcionales al gasto, del que se podrá, por lo tanto, registrar el valor y las variaciones por medio del estilete *S* apoyado sobre un cilindro giratorio.

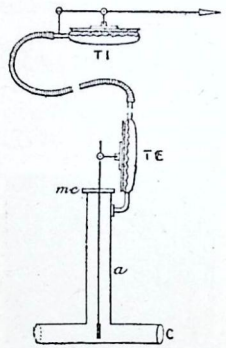


Fig. 163

En el hemotacómetro de Vierordt, la sangre atraviesa una cajita, entrando por *E* (fig. 162) y saliendo por *S;* empuja, al pasar, un pequeño péndulo *p*, que se desvía tanto más cuanto mayor es la velocidad de la sangre. Esta desviación se lee en un arco graduado. Este procedimiento es muy imperfecto, aun cuando no fuera más que por los remolinos que se forman en la caja, los que no es posible tener en cuenta. Chauveau le ha hecho sufrir una serie de transformaciones que le han conducido a su hemodromógrafo (fig. 163). el tubo *C* está intercalado en el trayecto de la arteria que se estudia. A su paso, la sangre choca contra una pequeña paleta que atraviesa una membrana de caucho *mc* y actúa sobre un tambor explorador de Marey *TE*. El tambor receptor *TI* registrará la curva de las velocidades sobre un cilindro giratorio.

Marey ha imaginado otro aparato registrador de la velocidad, que está basado sobre lo que se denominan tubos de Pitot, y está representado en la figura 164.

La sangre atraviesa un tubo en el sentido de las flechas: en el eje de este tubo hay colocados dos tubos más pequeños, abiertos, el de la izquierda contra la corriente, el de la derecha en sentido inverso. La sangre tiende a ejercer una compresión en el pequeño tubo izquierdo, una aspiración en el de la derecha; la membrana del tambor 1 se eleva, la del tambor 2, desciende. El conjunto de estos efectos es transmitido por un sistema de palancas a un tambor único unido a un regis-

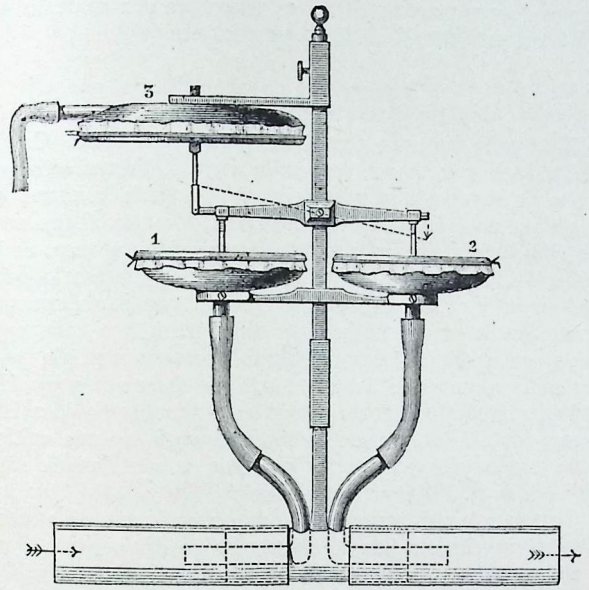


Fig. 164

trador, como en el aparato de Chauveau. Este instrumento tiene, entre otros inconvenientes, el de su difícil limpieza, cuando en él se han formado coágulos.

Claro es que, tanto el hemodromógrafo de Chauveau como el aparato de Marey, exigen ser graduados antes de emplearlos; para esto se les coloca en un tubo de caucho que funciona como la arteria, en el que circula agua bajo un régimen constante: se mide el gasto y se deduce la velocidad para las diversas indicaciones de los aparatos.

Para dar un ejemplo de velocidad de la sangre, diremos

que Chauveau ha encontrado en la carótida del caballo una velocidad media de 15 cm. por segundo elevándose, en el momento de la contracción ventricular, a 52 cm. por segundo; añadamos que el gran número y variedad de los aparatos propuestos demuestran cuán difícil es encontrar una solución satisfactoria para esta clase de investigaciones.

Trabajo del corazón

El corazón funciona como una bomba elevadora. Consideremos, ante todo, lo que pasa en la aorta. La altura a la que el corazón elevaría la sangre, es igual a la de la columna de sangre que mide la presión en el ventrículo; esta altura será aproximadamente de 2 m. Según lo que ha sido expuesto en la página 142, en el párrafo titulado: "Trabajo necesario para producir un derrame determinado", se ve que basta conocer la cantidad de sangre lanzada, es decir, elevada a cada pulsación para poder calcular el trabajo necesario para la progresión de la sangre en la aorta. Aquí las cifras son muy discordantes; según los autores, varían en el hombre de 45 a 188 gramos por sístole. Se puede admitir, después de una crítica de las experiencias, que, según los casos, la cantidad de sangre varía de 50 a 100 gr. por sístole.

Tomemos la primera cifra. Todo ocurre como si a cada sístole el ventrículo izquierdo elevara 50 gr. de sangre a 2 m. de altura, lo que corresponde a un trabajo de $0{,}05 \times 2 = 0{,}1$ kilográmetro. Si se tomase la otra cifra, se encontraría 0,2 kilográmetro por sístole.

El ventrículo derecho lanza la misma cantidad de sangre que el ventrículo izquierdo, pero la presión es tres o cuatro veces menor; el trabajo es, por lo tanto, tres o cuatro veces menor. En cuanto al trabajo de las aurículas, es despreciable con relación al de los ventrículos.

Hay que hacer una advertencia importante: El cálculo que acabamos de efectuar, corresponde a lo que en todas las obras se llama impropiamente: "El trabajo del corazón"; pero, en realidad, no obtenemos así más que el trabajo necesario para poner en circulación la sangre; no sabemos lo que el corazón ha tenido que gastar para ello. Así como cuando

se eleva un peso por medio de un motor, se sabe cuál es el trabajo absorbido para esta elevación, pero no se conoce el gasto del motor. Esta cuestión está todavía muy poco estudiada para que la tratemos aquí.

Trazados tomados sobre el corazón

Se han estudiado mucho los movimientos exteriores del corazón, ya explorándole directamente después de haberle

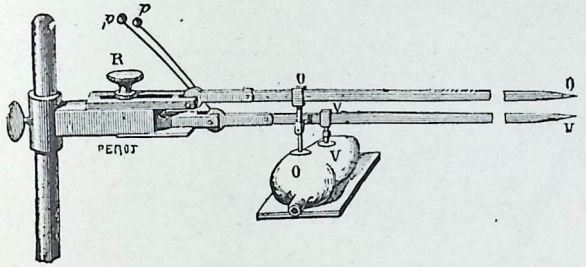


Fig. 165

puesto al descubierto, ya operando a través de la pared torácica.

En los animales de sangre fría, se puede aislar el corazón fácil y completamente sin que deje de latir. Se puede entonces registrar los movimientos de las aurículas o de los ventrículos apoyando sobre ellos ligeras palancas. La figura 165 representa el doble miógrafo de F. Franck aplicado sobre un corazón de tortuga y del que se inscriben así las pulsaciones de la aurícula y del ventrículo. Un aparato semejante puede servir para la rana, pero para este animal, y puesto que la experiencia es fácil de hacer, vale más conservar el corazón en su sitio con su circulación, como lo representa la figura 166 Se toma entonces el órgano entre dos pequeñas cucharillas, de las que una es fija, la otra movible y sostenida contra la primera mediante un pequeño resorte o un contrapeso. Estas cucharillas pueden al mismo tiempo servir de electrodos, si se quiere excitar eléctricamente el corazón.

Un buen procedimiento consiste también en introducir el corazón, separado del cuerpo, en una cavidad cerrada. La primera idea de este procedimiento fué debida a Flick y Blasius; en su dispositivo, el recipiente que contenía el corazón, dotado de una circulación artificial, estaba lleno de líquido. Llevaba una rama lateral en la que un flotador inscribía los cambios de volumen del corazón. Fr. Franck ha unido esta rama la-

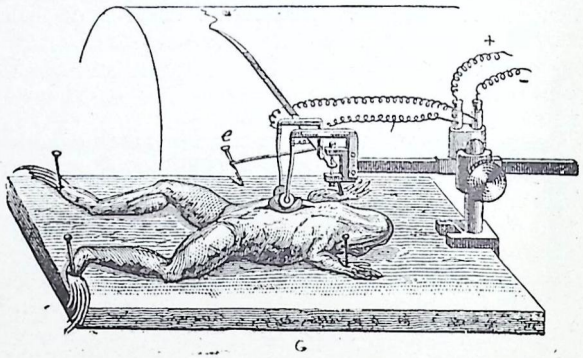


Fig. 166

teral a un tambor de Marey, quedando entonces el aparato como lo indica la figura 167.

El mejor dispositivo ha sido dado por Camus. El corazón está colocado en una cavidad que no contiene más que aire del que se registrarán las variaciones de presión. Este corazón está unido por la vena cava y la aorta a un recipiente que contiene el líquido de alimentación, como indica la figura 168. El aparato no contiene más que 1 ó 2 cm.³ de líquido, que es suficiente, constituído por agua salada al 7 por 1000, con algunos glóbulos de sangre. Para hacer variar la temperatura, basta introducirlo todo en un baño; en cuanto a la presión, se la modifica a voluntad en la aurícula o el ventrículo, inclinando convenientemente el instrumento. Se pueden hacer así muy cómodamente investigaciones sobre la acción de diversos medicamentos o venenos.

En estos últimos años se han hecho numerosos estudios sobre el corazón de los mamíferos aislado; este órgano puede, en efecto, si se le hace una buena circulación artificial, separarse del cuerpo y continuar latiendo durante mucho tiempo. Hasta se puede reanimar un corazón que ha cesado completamente de latir antes de la extirpación. La operación es de ejecución más delicada que en los animales de sangre fría, y deben concurrir dos condiciones principales: una temperatura conveniente y un aporte abundante de oxígeno. El líquido es sangre desfibrinada o, mejor aún, un suero artificial, cuya composición ha sido

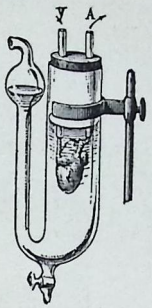


Fig. 167

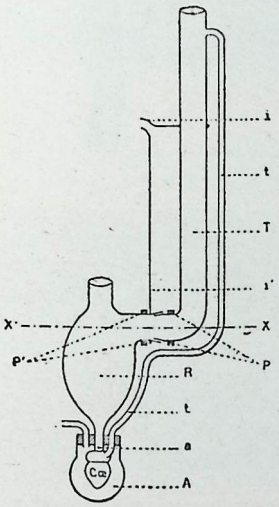


Fig. 168

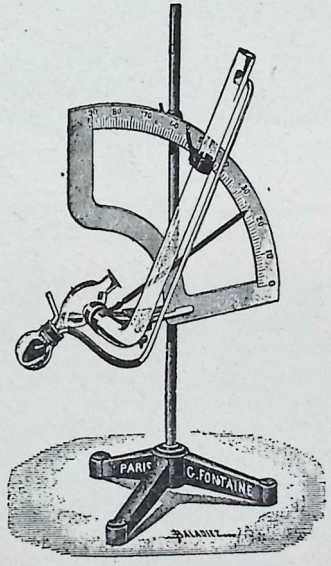


Fig. 169

dada por Locke. Además, hay diversos accidentes, de que hay que guardarse: embolias por coagulación, entrada de aire, etc.

En los mamíferos, de ordinario, se ha dejado el corazón en su sitio, practicando la respiración artificial y abriendo el tórax. Se aplican entonces sobre el corazón palancas convenientemente colocadas, o se toma en las pinzas apropiadas para hacer los trazados.

Uno de los problemas más importantes consiste en tomar trazados a través de la pared misma del tórax; éste es, en

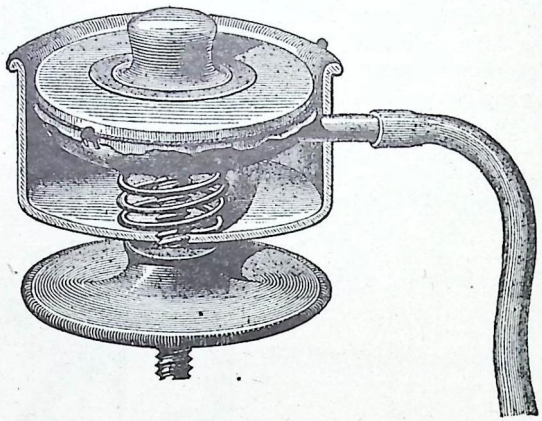


Fig. 170

efecto, el único medio de aplicación al hombre y a los animales que no se quiere sacrificar. Se emplea generalmente con este fin el cardiógrafo de Marey, que consiste esencialmente en un tambor cuya membrana lleva en su centro un botón de marfil o de hueso, y soportado por una armadura metálica que tiene forma de campana, como lo muestra la figura 170. Esta campana está aplicada por su base sobre el pecho, correspondiendo el botón al punto en donde se desea explorar el corazón: el quinto espacio intercostal, generalmente. Se regula la presión de este botón por medio de un tornillo y se une el aparato a un tambor receptor que inscribirá los desplazamientos de su palanca sobre un cilindro ahumado. Aparatos análogos permiten obtener trazados de los animales. La figura 171 nos da la concordancia de un trazado tomado en estas condiciones con el juego de las aurículas y de

los ventrículos. Se puede reconocer en la curva de choque del corazón *P*: primero, el sístole auricular, después el sístole

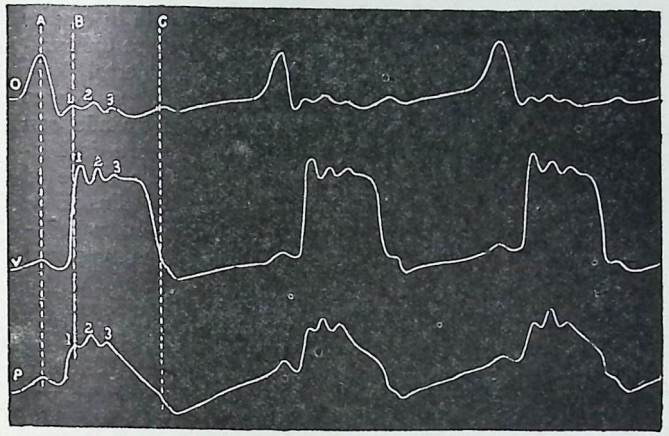


Fig. 171

ventricular con la reproducción de sus principales accidentes.

Estos trazados cardiográficos son difíciles de obtener, y es

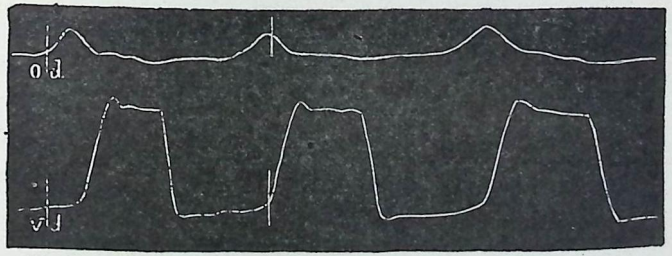


Fig. 172

preciso ir con mucho cuidado. En algunos casos particulares, cuando el corazón estaba en ectopia, lo que se ha visto en el

hombre y se ve de vez en cuando en los animales, se han podido tomar separadamente gráficos de los latidos auriculares y ventriculares. La figura 172 es un ejemplo: se encuentra entonces exactamente lo que se obtiene sobre un corazón descubierto.

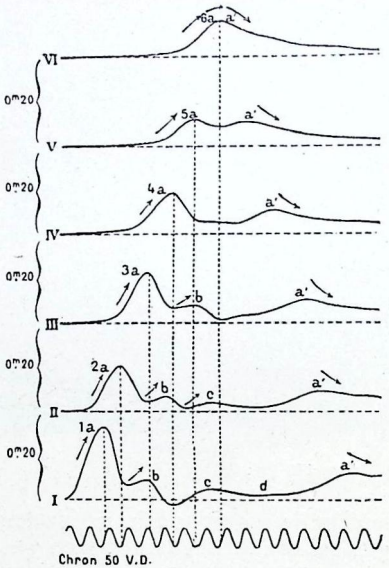


Fig. 173

Cuando se desea tomar un trazado con el cardiógrafo de Marey aplicado sobre el pecho, de ordinario se opera en malas condiciones; el corazón huye delante del botón del cardiógrafo, y he aquí la razón de porqué los trazados son generalmente malos.

No se obtienen buenos resultados más que conformándose con el método de Pachon, que recomienda practicar la exploración cardiográfica sistemáticamente en el decúbito lateral izquierdo. Es el único medio que nos da la forma exacta de la contracción cardíaca.

Esfigmografía

A cada contracción del ventrículo izquierdo corresponde una onda sanguínea lanzada a la aorta; de aquí resulta la producción, en todas las arterias, de lo que se llama pulso. Este fenómeno es análogo al que se observa cuando se conmueve un flúido en uno de sus puntos. Si se arroja un guijarro en el agua, se ve partir una ondulación del punto en donde este guijarro ha entrado en el líquido y recorrer la superficie bajo la forma de círculos de radio cada vez mayor.

Colocando una serie de aparatos exploradores sobre un tubo de caucho lleno de agua y produciendo una onda en uno de los extremos de este tubo por una brusca introducción de líquido, Marey ha puesto en evidencia (fig. 173) una onda

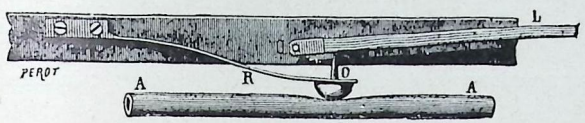


Fig. 174

análoga a la que se ve en la superficie de los líquidos después de la caída de una piedra en un punto, propagándose en toda la longitud del tubo.

En el caso de la pulsación cardíaca se produce el mismo fenómeno: una onda que parte del corazón recorre todas las

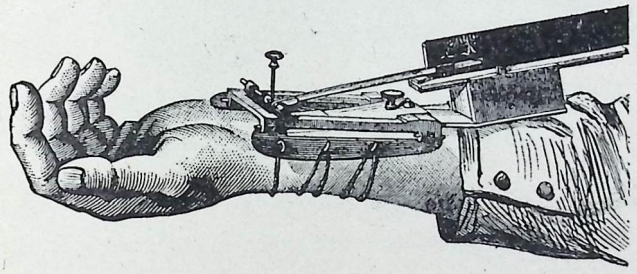


Fig. 175

arterias. El fenómeno que se percibe colocando el dedo sobre una de ellas y que se designa con el nombre de pulso, es debido a la hinchazón y endurecimiento súbito de la arteria bajo la influencia del paso de la onda sanguínea.

Es sabido que para notar bien este pulso es preciso comprimir una arteria sobre un plano resistente; entonces, todo el efecto de la proyección de sangre se realiza contra el dedo del observador.

Reemplacemos ahora el dedo por un ligero resorte conve-

nientemente reglado; este resorte será rechazado a cada pulsación, y podremos inscribir los desplazamientos. Este es el origen del esfigmógrafo. El primer aparato de esta clase fué imaginado por Vierordt, pero las piezas movibles tenían tal inercia, que el trazado obtenido estaba completamente deformado. El mejor modelo de que actualmente disponemos, es el de Marey. La figura 174 es un esquema fácil de comprender sólo con mirarlo, que explica la teoría del aparato; la figura

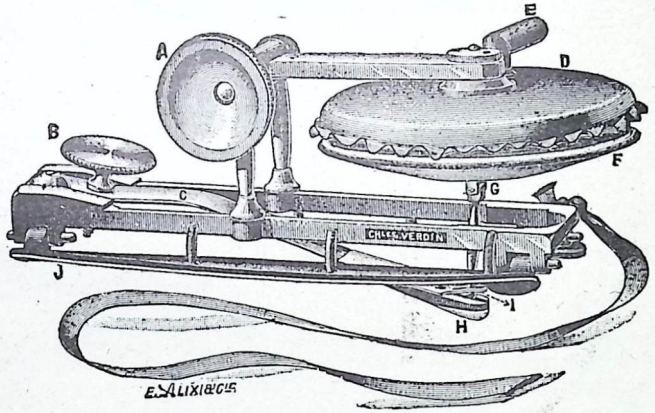


Fig. 176

175 muestra el esfigmomanómetro tal como debe ser aplicado en el antebrazo.

El registro se hace sobre un papel ahumado tenso sobre una pequeña plancha movida por un aparato de relojería. Un tornillo permite regular la presión del resorte sobre la arteria. Según el grado de presión, la curva registrada se modifica, y este es el gran escollo de la esfigmografía, en el estado actual de la cuestión. Dos personas, sirviéndose del mismo aparato sobre el mismo sujeto, no encuentran forzosamente el mismo trazado.

Cuando se quiere prolongar durante algún tiempo la inscripción, el esfigmógrafo directo resulta insuficiente, porque la cinta de papel llega pronto al final de su carrera. Se toma

entonces el esfigmógrafo de transmisión; el resorte, en lugar de obrar directamente sobre el estilete, comprime la membrana de un tambor de Marey (fig. 176); este tambor se unirá a un receptor según el procedimiento conocido.

Si se quiere hacer esfigmografía, no debe emplearse en la actualidad más que el instrumento de Marey, que está bien combinado y construído en buenas condiciones; los instrumentos similares tienen, generalmente, demasiada inercia y falsean las indicaciones, como hemos comprobado. Hay que desconfiar, sobre todo, del tipo Dudgeon (fig. 177), en el que los movimientos del resorte apoyado sobre la radial en *F* se transmiten a una serie de palancas muy complicada y al que la presencia de una pequeña bola *C* da una inercia considerable. Este aparato es muy seductor a primera vista, fácil de colocar, pero es el más inexacto de los instrumentos de esta clase.

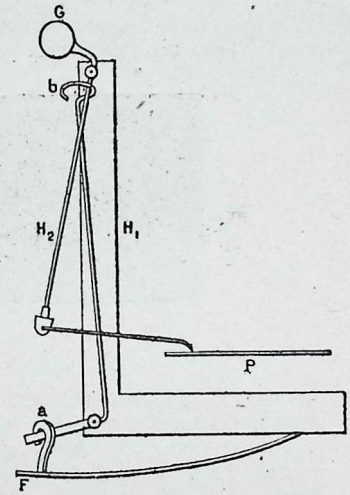


Fig. 177

Cuando en un sujeto normal se toma un trazado con un buen esfigmógrafo de Marey (fig. 178), este trazado se presenta bajo la forma siguiente: Primero hay un ascenso brusco, después un descenso más lento, en el que se observan muchas ondulaciones, de las que una, *d*, es más importante que las otras: *d* corresponde a lo que se llama dicrotismo del pulso. El brusco ascenso del principio *b* corresponde a la llegada de la onda, lanzada por el corazón. Generalmente, se atribuye el dicrotismo *d* a una reflexión de la onda primaria. Al final del sístole ventricular, después que la aorta se ha dilatado bajo la influencia del aflujo sanguíneo procedente del corazón, la sangre tiende a volver hacia este órgano. Pero las válvulas

sigmoideas se cierran, la sangre choca contra ellas y la producción de una nueva ondulación da lugar al dicrotismo.

Contra lo que se podría pensar a primera vista, la altura de los trazados esfigmográficos no aumenta con la presión sanguínea, muy al contrario. Si, en igualdad de condiciones, se ve aumentar la amplitud de un trazado, la presión sanguínea ha disminuído. Esto puede depender de diferentes causas, entre las que hay una fácil de concebir: cuanto mayor es la presión, más distendida está ya la arteria y menos la hará

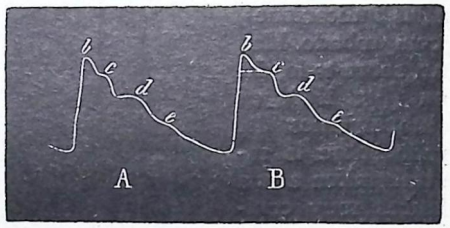


Fig. 178

ya variar en su calibre una mínima onda; ahora bien, lo que se inscribe, son únicamente estas variaciones.

Naturalmente, no hay sincronismo entre el pulso y la pulsación cardíaca; existe un retardo tanto más pronunciado cuanto más alejada está la arteria del corazón. Además, la onda no comienza a producirse hasta el momento de la abertura de las válvulas sigmoideas, y esta abertura no tiene lugar, como sabemos, sino un momento después del comienzo del sístole. Dicho de otro modo: entre el momento en que el ventrículo comienza su sístole y aquel en que el pulso se hace sentir, existe: 1.º un período de compresión hasta la abertura de las válvulas sigmoideas; 2.º una duración de propagación desde el corazón hasta el punto explorado.

El período de compresión varía según los autores; pero no pasa de 0",1 (Chauveau y Marey). En cuanto a la velocidad de propagación de la onda, es estimada en 8 ó 9 m. por segundo en las grandes arterias. Se comprende inmediatamente que esta propagación del pulso no puede ser confundida con

la velocidad de la sangre, que no es más que de 0,25 a 0,30 m. por segundo.

En diversas enfermedades se modifica la forma del pulso; desgraciadamente, hasta ahora este estudio se ha hecho muy

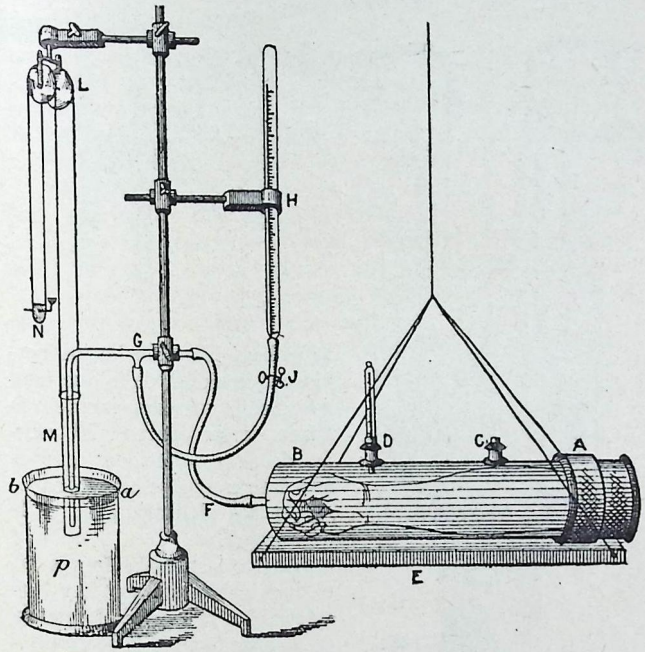


Fig. 179

mal, no siendo los diversos instrumentos que se han empleado de ninguna manera comparables entre sí; por lo tanto, sería cuestión de emprenderlo de nuevo.

Pletismografía

La pulsación cardíaca no se deja sentir únicamente en los gruesos vasos; sus efectos se propagan hasta los capilares, de

lo que resulta una variación periódica del volumen de los órganos. Además, es sabido que el calibre de los vasos pequeños

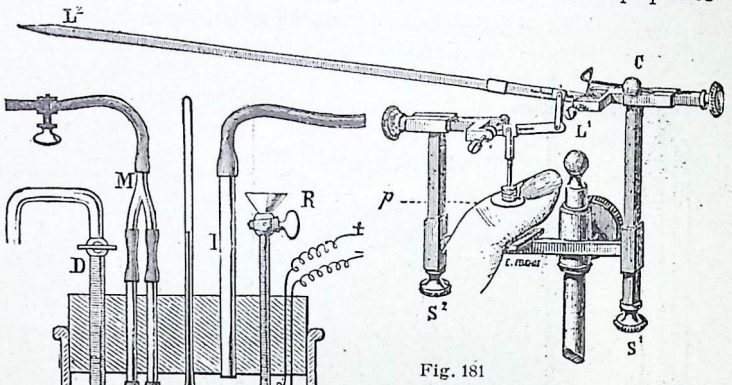


Fig. 181

varía bajo la acción de los nervios vasomotores, de lo que también resulta una variación del volumen de los órganos. El estudio de estas variaciones, que es muy interesante, se hace por medio de los pletismógrafos o de los oncógrafos.

En los pletismógrafos se introduce el órgano que hay que estudiar en una cavidad cerrada unida a un tambor de Marey o a un registrador análogo.

En los oncógrafos se toma el órgano entre las valvas apropiadas, de las que una será fija, la otra movible, dotada de una palanca registradora que obra sobre una transmisión.

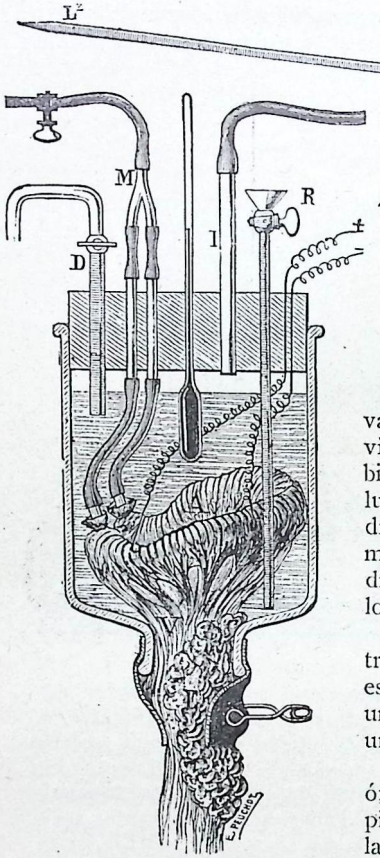


Fig. 180

La figura 179 representa el pletismógrafo de Mosso. Consiste en un grueso tubo *E*, en el que se introduce el brazo; en *A*, una guarnición de caucho permite cerrar herméticamente

el aparato, que se llena de agua por *C*. Las variaciones de volumen producen un derrame o una aspiración en una probeta *M*, suspendida en dos poleas con contrapesos y cuyos desplazamientos se registran mediante un estilete fijo en *N*.

Se puede desprender en parte un órgano o una porción de órgano del cuerpo, suponiendo que su circulación sea respetada, y estudiar sus variaciones de volumen. La figura 180 representa una asa intestinal introducida así en el pletismógrafo. El aire, por encima del líquido, comunica por *I* con un tambor de Marey destinado a inscribir sobre el cilindro registrador las variaciones de volumen.

Los aparatos construídos por F. Franck y por Laulanié, para inscribir el pulso digitálico son, en realidad, oncógrafos. La figura 181 representa el de F. Franck. Se coloca el dedo sobre un soporte fijo, la valva movible del oncógrafo puede estar representada por una pequeña lámina metálica o por la uña sobre la que se apoye la palanca registradora.

Este instrumento es de muy sencillo manejo y puede dar excelentes trazados.

SEGUNDA PARTE

ACCIONES MOLECULARES

I. — Gases

Es indispensable para el estudio de un gran número de fenómenos, entre otros en las investigaciones sobre la respiración, conocer las propiedades fundamentales de los gases, que pueden resumirse de la manera siguiente:

1.º **Ley de Mariotte.** — A una misma temperatura, el volumen de cierta masa de gas está en razón inversa de la presión que soporta este gas, o bien, lo que es lo mismo, de la presión que él ejerce contra las paredes del recipiente en que está contenido.

Así, si tomamos cierta masa de gas encerrado en un metro cúbico bajo cierta presión, para reducir este volumen a medio metro cúbico será preciso doblar la presión. Para reducir el volumen a un tercio de metro cúbico, habrá que triplicar la presión, y así sucesivamente.

2.º **Ley de Gay-Lussac.** — Para una misma presión constante, el aumento de volumen de cierto volumen de gas es proporcional a la temperatura.

Si se parte de 0º por cada elevación de temperatura de 1 grado centígrado, el volumen aumenta $\frac{1}{273}$ del volumen a 0º.

En lugar de dejar la presión constante y de hacer variar el volumen se puede hacer lo inverso. En estas condiciones, quedando constante el volumen, la presión aumenta con la temperatura según la misma ley, es decir, que el aumento de

presión es proporcional al aumento de temperatura; y si se parte de cero, para cada grado centígrado de presión aumenta en $\frac{1}{273}$ de la presión a cero.

3.º **Ley de Dalton.** — Si se colocan juntos dos o más gases, se mezclan de una manera perfecta. Cada uno de estos gases se conduce en el recipiente en que se encuentran cerrados como si estuviese solo. Ejerce la misma presión, y la presión total de la mezcla es igual a la suma de las presiones ejercidas por cada gas.

La ley de Dalton parece rigurosamente exacta; no ocurre lo mismo para la ley de Mariotte y la ley de Gay-Lussac, que no son más que aproximadas. Hay que hacer notar, en efecto, como lo han demostrado investigaciones exactas, que los diversos gases no se comprimen de la misma manera y tienen, cuando varía la temperatura, coeficientes de dilatación diferentes.

Además, hay que hacer intervenir en estas operaciones un factor muy importante: es lo que se llama proximidad del punto de licuefacción.

Todo gas puede transformarse en un líquido por una compresión y un descenso de temperatura suficientes. De la misma manera, todo líquido puede dar vapores que, a una temperatura bastante elevada, son verdaderos gases.

Ahora bien; en el momento en que un gas, o más bien, un vapor, va a liquidarse, las leyes de Mariotte y de Gay-Lussac faltan por completo. Están tanto más cerca de la verdad cuanto más alejados estamos de este punto de licuefacción, y cuando se está muy lejos, como ocurre con el oxígeno, el nitrógeno, el hidrógeno y otros gases, aún en las condiciones habituales, son verdaderas para límites bastante extensos de variaciones de presión o de temperatura. Se dice entonces que estos gases están en el estado perfecto.

II. — Densidad de los gases

La densidad de un gas es la relación entre cierto volumen de este gas y el mismo volumen de aire, en las mismas condiciones de temperatura y de presión.

Para tener el peso de un gas, se busca el peso del mismo volumen de aire, en las mismas condiciones de temperatura y de presión, y se multiplica este volumen por la densidad del gas.

A la inversa, para tener la densidad de un gas, se busca el peso del gas, después se busca el peso del mismo volumen de aire en las mismas condiciones de temperatura y de presión y se divide el uno por el otro.

En los tratados elementales de física, se describen los métodos empleados para pesar un gas. Consisten, en principio, en pesar un matraz en el que se ha hecho el vacío; después, en dejar entrar en él el gas sobre el que se desea experimentar y en hacer una nueva pesada. Por diferencia, se tiene el peso del gas.

Advertencia. — La densidad de un gas no representa el peso de la unidad de volumen, como para los sólidos y los líquidos. Así, la densidad del anhídrido carbónico es de 1,529 y el peso del decímetro cúbico 1,977; esto depende de que el peso del decímetro cúbico de aire, substancia con relación a la que se ha tomado la densidad, no es 1 gramo, sino de 1µ,293.

III. — Medición de los gases

De la misma manera que para un líquido o un sólido, se puede evaluar una masa de gas en volumen o en peso y se puede pasar de una de estas evaluaciones a la otra; pero para los gases hay que tener muy en cuenta en estas operaciones la presión y la temperatura. Sabemos que un kilogramo de agua tiene aproximadamente el volumen de un litro; si no se nos dan ni la temperatura ni la presión soportada por este líquido, no introduciremos, no obstante, por este hecho, ningún gran error en nuestras operaciones, al menos en las circunstancias ordinarias. Es lo que nos permite el empleo fácil de las medidas graduadas en volumen, probetas, pipetas, etc.

Para un gas no ocurre lo mismo. Las variaciones de volumen, bajo la influencia de los cambios de presión y de temperatura, son demasiado considerables para que se puedan

despreciar; por lo tanto, hay que especificar siempre en qué condiciones se han hecho las mediciones, y se ha tomado la costumbre de referir todas las determinaciones a una misma temperatura y a una misma presión. Esta temperatura es la de 0° y la presión es una atmósfera, es decir, 760 mm. de mercurio.

Algunos experimentadores refieren sus medidas a 1 m. de mercurio, lo que es más racional y simplifica ciertas operaciones de cálculo.

Es indispensable, para hacer diversos cálculos, conocer el volumen ocupado por un gramo de diversos gases, o el peso del litro de este gas a 0° y a 760 mm. de presión. He aquí estos valores para los de entre ellos que intervienen en fisiología.

Gases	a 0° y a 760 mm.	
	Peso del litro	Volumen del gramo
Aire	1, 293 gr.	0,773 l.
Hidrógeno	0, 090 gr.	11,111 l.
Oxígeno	1, 430 gr.	0,698 l.
Nitrógeno.	1, 256 gr.	0,796 l.
Anhídrido carbónico.	1, 977 gr	0,506 l.
Vapor de agua . .	0, 806 gr.	1,241 l.

Con ayuda de estas cifras, si se conoce el peso de un gas, se deduce inmediatamente su volumen a 0° y a 760 mm. Se puede, a continuación, pasar a una temperatura o a un volumen cualquiera. Para la temperatura, basta para cada elevación de 1° añadir al volumen de 0° este volumen multiplicado por $\frac{1}{273} = 0{,}00366$. Si hay t^0 de elevación de temperatura, es preciso añadir $Vt \times 0{,}00366$. El volumen será, pues, $V + V.t \times 0{,}00366 = V\ (1 + t.\ 0{,}00366)$.

Para pasar de la presión 760 a otra presión H, según la ley de Mariotte, será preciso multiplicar el volumen a 760 por $\frac{H}{760}$

Por lo tanto, por último, para pasar del volumen a 0° y 760 milímetros, al volumen a t^0 y H mm. de presión, es preciso multiplicar el volumen a 0° por

$$[1] \qquad \frac{760}{H}(1 + t\ 0{,}00366).$$

Inversamente, si se conoce un volumen de gas a t^0 y a la presión H, para obtener este mismo volumen a 0° y 760 será preciso dividir por [1]. Obtenido este resultado se podrá, mediante la cifra apropiada del cuadro precedente, encontrar el peso del gas.

En las investigaciones biológicas, no se dosifica, generalmente, en peso más que CO^2 o H^2O. Estos cuerpos son absorbidos por substancias convenientemente escogidas y, por pesadas hechas antes y después de la absorción, se conoce el peso de CO^2 y de H^2O buscado.

Los demás gases se dosifican en volumen, lo que, claro está, se puede también hacer y se hace, por lo demás, con frecuencia para el CO^2. En este caso es cuando es sumamente importante tener muy en cuenta la temperatura y la presión.

La temperatura se determina por medio del termómetro. Es preciso estar bien seguro de que el gas se ha puesto en equilibrio de temperatura con el termómetro; como esto exige cierto tiempo, es bueno no hacer estas mediciones más que debajo del agua, y es preciso, para ello, emplear procedimientos de técnica en cuyo detalle nos es imposible entrar aquí. En el aire, las corrientes y variaciones bruscas no permitirán obtener un resultado cierto.

La presión se determina por medio del barómetro. Claro está que, según el grado de precisión que se desee obtener, es necesario un barómetro más o menos perfecto.

Una vez determinada la presión barométrica, hay que comprobar que el gas estudiado está a esta misma presión, de lo contrario, habrá necesidad de tener en cuenta la diferencia y de añadirla o de restarla, según que el gas esté por debajo o por encima de la presión atmosférica. A este efecto, los aparatos en donde los gases sean recogidos deben estar dotados de un manómetro indicador de la diferencia de presión entre el gas que en él está contenido y la atmósfera.

Existe, además, un elemento que importa tener en cuenta: es el vapor de agua que puede contener el gas, porque un volumen dado no contiene la misma masa de gas, según que este gas esté húmedo o seco. Si el gas está completamente seco, no hay ninguna dificultad; pero este estado es difícil de obtener y de mantener, estando generalmente húmedas las

substancias absorbentes, así como las paredes de los vasos. Para no tener ninguna duda sobre la cantidad de agua contenida en el gas, es bueno tenerle siempre saturado, es decir, de mantener en su presencia una ligera cantidad de agua. Desde este momento, es fácil conocer la cantidad de vapor de agua contenida en este gas, porque cada unidad de volumen, cada centímetro cúbico o litro contiene una cantidad que no depende más que de la temperatura, como veremos en el capítulo de la higrometría. Este vapor de agua se conduce como un gas en la mezcla. Tiene su presión propia, que es preciso restar de la presión total para tener la presión real del gas estudiado. La presión del vapor de agua a las diversas temperaturas es dada por tablas especiales.

Para poder medir los gases y analizarlos, es preciso, ante todo recogerlos.

Cuando se trata de seguir los cambios respiratorios de un animal, el procedimiento más sencillo consiste en colocar el animal sujeto a la experiencia en un recinto cerrado. Se hace una toma de gas al principio o bien se admite que este gas tiene la composición del aire; después se hace una nueva toma al final de la experiencia. Esta última toma es analizada y, si se sabe cuál es el volumen total del recipiente, se puede deducir la cantidad de oxígeno absorbido y la de CO^2 exhalada. Este método tiene el inconveniente de hacer respirar al animal un aire confinado, cuya composición se modifica durante la experiencia, lo que puede introducir algunos trastornos; es mejor no darle más que aire fresco.

Para esto, se puede hacer pasar una corriente continua de aire por la cámara en donde se encuentra el animal, pero entonces el CO^2 producido se encuentra diluído en una gran cantidad de otro gas y la dosificación es bastante delicada; la cantidad de oxígeno absorbido es todavía más difícil de determinar. Se consigue, no obstante, siguiendo el método de contadores empleado por Pettenkoffer y Voit, y por Hanriot y Richet; he aquí el principio de este procedimiento.

El método de Pettenkoffer y Voit consiste en colocar el sujeto sobre quien se opera en un recinto *E* (fig. 182); el aire es aspirado por medio de una bomba *P*, y un contador *C* da la cantidad de aire que pasa así. Además, una segunda bomba

p, más pequeña, capta una muestra de aire, que será medido por el contador *C'* y que burbujea sucesivamente en el ácido sulfúrico *K* para determinar el vapor de agua que contiene, y

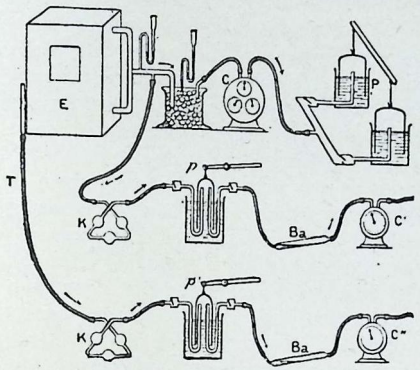


Fig. 182. — *Esquema del aparato de Pettenkoffer y Voit.* E, cámara respiratoria; P, gran bomba aspiradora para desplazar el aire; C, contador que mide el aire desplazado; p, p', pequeñas bombas con C' C'' sus contadores particulares colocados en derivación, uno *p* en la corriente de salida, el otro *p'* en la corriente de entrada, K, K'; *Ba, Ba'* burbujeadores destinados a retener el anhídrido carbónico y el agua.

en la barita *Ba* para medir el anhídrido carbónico. Por último, una tercera pequeña bomba *p'*, toma aire antes de entrar en el aparato. Este aire es medido por el contador *C''* y se determina

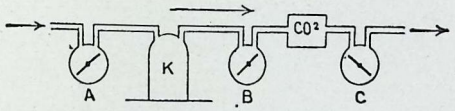


Fig. 182 bis

igualmente el vapor de agua y el anhídrido carbónico que contiene.

De este modo se conoce el volumen de aire que atraviesa el aparato, se sabe cuál es su posición a la entrada y a la salida, se puede deducir el vapor de agua y el anhídrido carbónico eliminado por el animal. En Alemania han sido hechas así un gran número de determinaciones.

En el dispositivo de Hanriot y Richet, el animal se encuentra en K (fig. 182 bis) y recibe el aire puro que atraviesa el contador de gas A y es medido por él. A la salida de K, el aire es medido de nuevo por el contador B, después desembarazado de su anhídrido carbónico mediante el paso por la potasa y finalmente medido en C. Una trompa de agua produce una aspiración continua para hacer pasar el aire en el sentido de las flechas. La diferencia entre los volúmenes medidos en C y en A da el oxígeno absorbido. La diferencia de aire entre C y B da el anhídrido carbónico producido.

Este método es muy delicado, sujeto a error a causa de las variaciones de temperatura del aire y del desarreglo posible de los contadores; exige ser manejado con mucha prudencia.

Otro procedimiento debido a Regnault y Reiset consiste en hacer circular siempre el mismo aire en la campana en donde se encuentra el animal; se le aspira, se pasa por potasa para desembarazarle del CO^2 y se le lanza de nuevo en la cámara. Con este juego se empobrece en oxígeno y la presión baja, pero entonces se hace entrar oxígeno puro en la campana, de modo que se mantenga en ella la presión constante. Al fin de la experiencia, basta medir el oxígeno gastado y apreciar el aumento de peso de la potasa para tener todos los elementos del problema. Este procedimiento ha sufrido notables perfeccionamientos; se sabe actualmente registrar de una manera continua el anhídrido carbónico producido y el oxígeno consumido.

Fundada en este principio, se ha construído la cámara en la que un hombre puede permanecer durante muchos días, y que ha servido a Atwater y a Bénédict, en América, para sus experiencias.

Un buen procedimiento para estudiar los cambios respiratorios, consiste en examinar directamente el aire que sale de los pulmones y, por consiguiente, en no recoger más que este aire sin ocuparse de la atmósfera en que está sumergido el animal.

Se emplea con este fin la válvula de Müller (fig. 183). Consiste esencialmente en dos frascos cuyos tapones perforados reciben tubos, de los que unos van hacia el fondo de los frascos, y los otros permanecen en la parte superior, como indica la figura. Cada vaso contiene una pequeña cantidad de líquido, de agua, por ejemplo. El animal respira por el tubo C, que toma con la boca cuando es el hombre, que hay que ligar a la tráquea cuando es un animal.

El aire no puede circular más que en el sentido de las flechas; en el momento de la aspiración, entra por B y va por C al animal. En el momento de la espiración es rechazado de C por A al aire. Pasando así, el aire burbujea en el líquido que hay en el fondo de los vasos; si se quisiera invertir la corriente, el líquido subiría por el interior de los tubos en él sumergidos y resultaría una resistencia considerable. Gracias a este mecanismo, el aire no puede circular más que en el sentido indicado por las flechas.

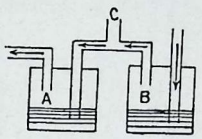


Fig. 183

Este dispositivo tiene un grave inconveniente: el aire atraviesa un líquido burbujeando, de lo que resulta una cierta presión que vencer, tanto en la inspiración como en la espiración. Esta presión es pequeña, es cierto, pero basta para modificar la mecánica de la respiración. Chauveau y Tissot se sirven de una válvula con valvas metálicas muy ligeras (fig. 184), que funcionan como la válvula de Müller. Para evitar que las válvulas se adhieran a su soporte, lo que ocurre fácilmente, en cuanto una pequeña cantidad de vapor de agua se ha condensado en el aparato, descansan sobre un orificio de borde cortante que no puede dar lugar a ninguna adherencia. En el caso de la figura, la válvula lleva una doble cánula H y H' destinada a fijarse en las narices del sujeto.

En estas condiciones, se recoge todo el aire procedente de la respiración en un recipiente apropiado, se le mide y se le analiza. Pero se concibe que en cuanto se opera sobre grandes animales, sobre el hombre, por ejemplo, se trata de volúmenes gaseosos muy considerables y se hace difícil tener recipientes bastante grandes para contenerlos. Chauveau, para evitar esta dificultad, ha imaginado un aparato de derivación parcial, es decir, que no se recoge más que una fracción conocida del aire espirado. Una décima del aire espirado es retenida, medida y analizada, y basta multiplicar todos los resultados

por 10 para obtener el mismo resultado que si se hubiese operado sobre todo el aire de la respiración.

Claro está que los recipientes a los que, en el momento de la respiración, el animal envíe el aire que respira, no deben dar lugar a ninguna contrapresión; sin esto resultaría, como para la válvula de Müller, una resistencia que vencer que modificaría los resultados.

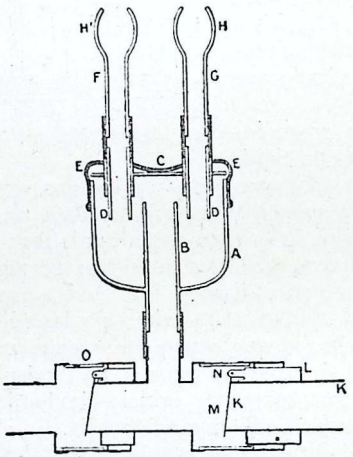


Fig. 184

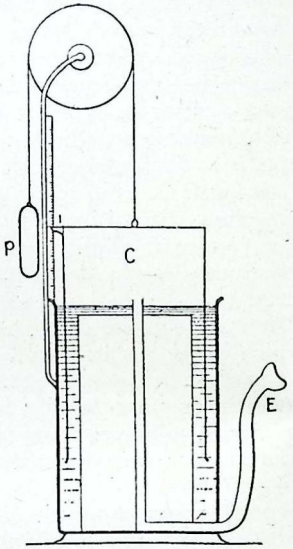


Fig. 185

Cuando se emplean gasómetros que consisten en una campana invertida en el agua, en la que penetra el aire por un tubo que atraviesa el recipiente que contiene esta agua, recubierta de una pequeña capa de aceite para evitar la disolución de los gases, la campana de estos aparatos se eleva a medida que entra el aire. El peso de esta campana debe ser cuidadosamente compensado, para no ejercer presión sobre el aire en ella contenido. Este resultado es bastante difícil de alcanzar, porque el valor del contrapeso varía con la sumersión de la campana;

debe crecer, a medida que la campana se eleva y sufre un empuje menor de parte del agua.

Tissot, modificando los aparatos de Pflüger y de Frédéricq, ha construído un gasómetro en que el valor del contrapeso se regula automáticamente, de manera que la presión en el interior del aparato sea siempre rigurosamente igual a la presión atmosférica.

Se utilizan también, en el laboratorio de Chauveau, vejigas. Cuando están bien elegidas, delgadas y convenientemente embadurnadas de grasa, se puede en ellas conservar el gas de la respiración sin temor de pérdidas a través de la pared, y por efecto de su flexibilidad no crean ninguna contrapresión apreciable en el momento en que se les introduce el aire espirado.

Para eva'uar la cantidad de gas espirado, se puede efectuar directamente la medida en la campana en donde ha sido recogido; en esto consiste en suma el espirómetro de Hutchinson (fig. 185).

Este aparato tiene la ventaja de retener los gases y de permitir su análisis después de haberlos recogido. Otros espirómetros que hay en el comercio, son simples contadores de gas a través de los que pasa el aire espirado para perderse en la atmósfera; puede entonces evaluarse este aire, pero no se conoce su composición. Por lo demás, estos aparatos no pueden ser más que muy aproximados, a consecuencia de la ignorancia en la que nos encontramos acerca de la temperatura y presión del aire que los atraviesa.

IV. — Fenómenos mecánicos de la respiración

Los pulmones se encuentran en la cavidad torácica cerrada por todas partes; a consecuencia de su plasticidad, su superficie externa se aplica contra la superficie interna de esta cavidad, si, no obstante, existe el vacío entre estas dos superficies. Si se produce una abertura poniendo en relación la cavidad torácica con la atmósfera, el aire se precipita en el interior de esta cavidad, el pulmón abandona la pared y se aplasta sobre sí mismo.

Si, por el contrario, no es posible ninguna entrada de aire,

cuando la cavidad torácica aumenta de volumen a consecuencia de la elevación de las costillas y del descenso del diafragma, el pulmón aumenta de volumen y el aire penetra por la tráquea; es el período de inspiración. En el momento de elevación del diafragma y descenso de las costillas, ocurre lo inverso; el volumen del pulmón y el de la cavidad torácica disminuyen, es el período de espiración durante el cual el aire es lanzado de nuevo en la atmósfera.

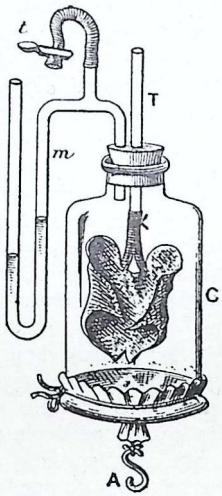


Fig. 186

Se comprenden muy bien estos diversos fenómenos con ayuda de un dispositivo esquemático representado en la figura 186. Se extraen, por ejemplo, los pulmones de un perro de la cavidad torácica, con la tráquea, teniendo cuidado de no herir dichos pulmones. Se liga sobre la tráquea un tubo que se hace pasar a través de un tapón colocado en el cuello de una campana. Un segundo tubo da acceso a un manómetro y por una ramificación se fija un tubo de caucho que se podrá a voluntad cerrar con una pinza.

La abertura inferior de la campana está cerrada por una gruesa membrana de caucho, provista en su centro de una empuñadura o de un gancho.

Estando colocado el pulmón en el interior de la campana y ligada la membrana de caucho en la abertura inferior, se comienza por aspirar por *t* una parte del aire de la campana. A medida que se realiza esta operación, se observa que el pulmón se hincha cada vez más; es inútil proseguir la operación hasta conseguir que se aplique en todas sus partes sobre la pared interna de la campana. Se cierra el tubo *t* y se aprecia en el manómetro una depresión permanente en el interior de la campana; esto depende de que, a consecuencia de su elasticidad, el pulmón tiende a volver sobre sí mismo y a disminuir su volumen exterior; si se colocara un manómetro en la tráquea y

se abriera el tubo *t*, se apreciará que, a consecuencia de esta elasticidad, el pulmón ejerce una presión de aire en este manómetro; sopla, por decirlo así, en el manómetro.

La membrana de caucho se encuentra abombada hacia arriba mientras la presión del interior de la campana es menor que la atmosférica. Si ahora tomamos la empuñadura que se encuentra en el centro de la membrana y se la baja, se produce en el interior de la campana una disminución de presión apreciable en el manómetro *m*, el pulmón se dilata y realiza una inspiración. Cuando se deja remontar la membrana, ocurre lo contrario, las cosas vuelven al estado primitivo y se realiza una espiración. La membrana desempeña así el papel del diafragma y se ve, observando el pulmón y el manómetro, cómo las variaciones de presión en la cavidad en que está contenido el pulmón influyen sobre estos cambios de volumen y sobre la respiración. En realidad, no existe intervalo entre el pulmón y la cavidad torácica; hay adosamiento perfecto; pero el mecanismo es el mismo.

Para seguir exactamente los fenómenos mecánicos de la respiración se hace uso del método gráfico en diferentes formas.

Un procedimiento sencillo, cuando no se trata de estudiar más que el ritmo respiratorio, consiste en encerrar el animal que se desea estudiar en una campana; todos los movimientos de dilatación o de contracción del tórax se traducen por variaciones de presión del aire, y basta colocar este aire en comunicación con un tambor de Marey para registrar estas variaciones. A primera vista, parece que siendo la misma la cantidad de aire contenida en el recinto en que está encerrado el animal, no debe resultar de los movimientos de este animal ninguna variación en la presión de este aire; pero hay que considerar que en el momento de la inspiración, por ejemplo, la dilatación del tórax precede un poco a la penetración del aire en los pulmones, por consiguiente, en este momento, hay una compresión del aire ambiente. Por el contrario, en el momento de la expulsión del aire del pulmón, esta expulsión está causada y, por lo tanto, precedida por una retracción de la pared torácica, acarreando una disminución de presión del aire en el que se encuentra el animal.

Si el animal sometido a la experiencia no debe ser conservado, se le puede fijar una cánula en la tráquea. Esta cánula estará unida a un tubo que pasa a través del tapón de un vaso cerrado por todas partes y que contiene aire. El aire de este vaso cerrado será el que utilizará el animal para la respiración y será alternativamente comprimido y dilatado. Estas variaciones de presión podrán ser registradas como precedentemente. En los dos dispositivos que acabamos de describir se han recogido los productos de la respiración y se les puede anali-

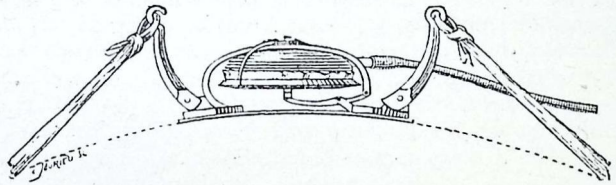


Fig. 187

zar. Si no se les tiene, es preferible emplear el dispositivo de Hering, gracias al que, el animal no respira el aire confinado. Se le liga una cánula a la tráquea, el animal está colocado en vaso cerrado para realizar el registro de los movimientos respiratorios, pero su tráquea comunica con la atmósfera y toma así aire puro.

Según lo que se quiere obtener, hay que adoptar uno de estos tres dispositivos.

Se han imaginado también aparatos llamados neumógrafos, que permiten registrar los movimientos de la caja torácica sin preocuparse de la manera cómo será recogido el aire de la respiración.

La figura 187 representa el neumógrafo de Marey. El aparato se compone de una placa metálica elástica, que se aplica delante del pecho. Un cinturón unido a dos palancas solidarias de esta placa rodea la caja torácica que, dilatándose, ejerce una tracción sobre las extremidades de estas dos palancas.

En estas condiciones, la banda metálica se incurva más o menos, la membrana del tambor se comprime y sus movimientos son transmitidos por el método habitual a un tambor recep-

tor que inscribirá sobre un cilindro giratorio las variaciones de volumen del tórax.

Este aparato ha sufrido numerosas modificaciones, pero todas están basadas en el mismo principio. La figura 188 representa el modelo de Laulanié, que es de una aplicación muy fácil y del que es fácil comprender el funcionamiento por el examen del dibujo recordando las explicaciones antes dadas.

La cinta *C* viene, después de haber dado la vuelta al pecho, a fijarse en los dientes *D* sobre los que tira cuando se dilata la caja torácica. Los

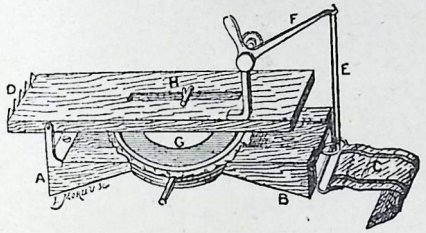


Fig. 188

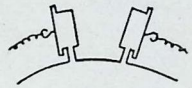


Fig. 189

movimientos de la planchuela articulada *H* son moderados por la atadura elástica *E* y se transmiten a la membrana del tambor *G*.

Se han construído también modelos en los que se pueden registrar por separado las dilataciones del lado izquierdo y del lado derecho del tórax. El principio de estos dos aparatos es el siguiente: Una plancha metálica está colocada sobre la parte anterior del pecho; lleva dos tambores, aislados uno del otro, y el cinturón que da la vuelta a la caja torácica ejerce sus tracciones sobre los dos tambores, ya estando unida directamente al centro de la membrana de caucho, como en la figura 189, ya mediante otro dispositivo variable según los modelos. Hay que tomar grandes precauciones en el empleo de este género de aparatos, porque las dilataciones de un lado del tórax pueden muy bien transmitirse al tambor del lado opuesto, bien por deslizamiento del instrumento en la parte anterior del tórax, bien por deslizamiento de la cinta. Lo mejor es mantener en su sitio el instrumento mediante tiras de esparadrapo adhesivo bien pegadas a la piel y fijar igualmente la cinta a nivel de la columna vertebral por el mismo procedimiento.

V. — Disolución de los gases

La disolución de los gases está sometida a las leyes siguientes:

1.ª *Cuando una mezcla de gases se encuentra en presencia de un líquido, cada gas se disuelve como si estuviera solo.* Es decir, que todo ocurre, para cada gas, como si se hicieran desaparecer los otros gases mezclados con él. No falta, pues, más que examinar cómo se conduce un gas en presencia de un líquido.

2.ª *Para un mismo gas y un mismo líquido, a una temperatura dada, la cantidad de gas disuelto en el líquido es proporcional a la presión que el gas ejerce en la superficie del líquido una vez la disolución efectuada.*

Así, si se coloca un gas en presencia de un líquido, mientras la disolución se efectúa, la masa de gas libre puede variar y la presión cambiar; pero al fin de la operación, cuando el equilibrio se ha establecido, la cantidad de gas en disolución es proporcional a la presión que el gas libre ejerce en la superficie libre del líquido.

3.ª *Para una misma presión final y una misma temperatura, la cantidad de gases disueltos depende de la naturaleza del gas y de la del líquido.*

4.ª *La cantidad de un gas que se disuelve en un líquido a una presión determinada disminuye cuando la temperatura se eleva.*

He aquí un cuadro que da la cantidad de gases que se disuelven en el agua a diversas temperaturas para una presión de 760 mm. y para los gases más usuales en biología. Este cuadro da los volúmenes de gas que se disuelven en un volumen de agua igual a 1.

GASES	0º	4º	10º	15º	20º
Aire	0,0247	0,0224	0,0195	0,0179	0,0170
Nitrógeno	0,0203	0,0184	0,0160	0,0148	0,0140
Oxígeno.	0,0411	0,0372	0,0325	0,0299	0,0284
Hidrógeno	0,0193	0,0193	0,0193	0,0193	0,0193
Anhídrido carbónico.	1,7987	1,5126	1,1847	1,0020	0,9014
Óxido de carbono. .	0,0329	0,0299	0,0263	0,0243	0,0231

Con ayuda de estas cifras se puede calcular la cantidad de gas disuelto en el agua a una presión cualquiera para las temperaturas comprendidas entre 0º y 20º.

Cuando se desea obtener la disolución de la mayor cantidad de gas posible, hay que operar a baja temperatura y alta presión. Si por el contrario, se desea expulsar los gases de una disolución, tenemos a nuestra disposición dos medios: se puede hacer el vacío por encima del líquido o calentarlo. En este último caso hay que llegar a la ebullición para obtener la expulsión de las últimas huellas del gas disuelto; también, en muchos casos, cuando se teme alterar ciertos productos que se encuentran en el líquido, se prefiere recurrir al primer procedimiento. Con frecuencia se les combina, haciendo obrar a la vez la elevación de temperatura y el descenso de presión.

VI. — Oclusión de los gases

Los cuerpos sólidos gozan de la propiedad de condensar los gases, todo ocurre como si el gas se disolviese en un líquido. Ciertos cuerpos son particularmente notables desde este punto de vista; así el paladio puede absorber hasta 643 veces su volumen de hidrógeno. En el momento de esta absorción se produce una elevación considerable de temperatura. Uno de los cuerpos más interesantes desde este punto de vista para el biólogo es el carbón de madera del que se echa mano algunas veces para absorber los gases procedentes de los cuerpos en putrefacción.

Un volumen de carbón de madera puede absorber:

	Volúmenes		Volúmenes
Amoníaco.	90	Anhídrido carbónico. .	35
Ácido clorhídrico. . .	85	Oxígeno	9'25
Anhídrido sulfuroso. .	56	Nitrógeno.	7'70
Hidrógeno sulfurado. .	55	Hidrógeno.	1'75

Una elevación considerable de temperatura desembaraza los cuerpos de los gases que en él están ocluídos. Si se quiere

tener carbón que no contenga así ningún gas, es preciso calentarlo al rojo y apagarlo bajo el mercurio.

VII. — Difusión de los gases

Cuando dos gases están uno en presencia de otro, sin agitación, se penetran uno a otro y cada uno de ellos acaba por conducirse en el vaso en que están encerrados como si se encontrase solo, se dice que los gases han difundido uno en el otro.

Cuando los gases están separados por un diafragma delgado con una o muchas pequeñas perforaciones, la mezcla de los gases se realiza por el paso de los gases a través de estos orificios. La ley de paso es en este caso muy sencilla, la velocidad de cada gas está en razón inversa de la raíz cuadrada de su densidad. Es decir que si, en el mismo tiempo, pasa dos veces más de un gas *A* que de un gas *B*, es que el gas *A* es cuatro veces menos denso que *B*. La naturaleza de la pared no tiene ninguna influencia.

No ocurre lo mismo con los diafragmas gruesos y porosos; entonces se producen acciones especiales por parte de las paredes que limitan los orificios, la naturaleza de la pared interviene, el fenómeno se complica, y no hay ley sencilla que formular para la mezcla de los gases situados a una y otra parte del diafragma.

Hay un caso particularmente importante: es aquel en el que el diafragma no parece presentar ningún orificio, ni aún pequeño; así ocurre con el caucho. Los gases pasan a través de la membrana de caucho con una velocidad variable según la naturaleza del gas. El cuadro siguiente da las velocidades relativas con relación a la del nitrógeno.

Nitrógeno	1
Óxido de carbono	1,113
Aire	1,149
Gas de los pantanos	2,148
Oxígeno	2'556
Hidrógeno	5,500
Anhídrido carbónico	13,585

Por lo dicho se comprende porqué un globo lleno de hidrógeno puesto en una atmósfera de aire disminuye rápidamente de volumen: el hidrógeno sale con mayor rapidez que tiene el aire para entrar. Por el contrario, un globo de aire en el hidrógeno o en el anhídrido carbónico se hincha hasta casi estallar.

Hay que hace notar que la presión total de los gases no desempeña en este fenómeno más que un papel secundario; así, en la última experiencia, el H o el CO^2 exterior, aun estando a menor presión que la interior del globo, penetran en él. Claro está que cuando la presión del H o del CO^2, considerados aisladamente, sea la misma en el interior que en el exterior del globo, el paso dejará de efectuarse.

Este paso de los gases a través del caucho es un fenómeno importante de conocer; demuestra a cuántos errores se expone uno cuando se quiere conservar en sacos de caucho gases destinados a ser analizados para hacer un estudio de los cambios respiratorios, por ejemplo.

VIII. — Disociación

La disociación es un fenómeno de los más importantes desde el punto de vista de la estabilidad de los compuestos químicos en los que entra un gas; particularmente él es el que interviene en los casos de fijación, con combinación, de un gas en un sólido; por lo tanto, vamos a exponerlo con algunos detalles.

Tomemos un cuerpo sólido que por su descomposición puede desprender un gas, por ejemplo, un carbonato, y, para precisar, tomaremos el carbonato cálcico a la temperatura de 1 040°. Si, en estas condiciones, el carbonato cálcico se encuentra libre, se descompone en cal, que queda en estado sólido y CO^2, que se pierde en la atmósfera.

Metamos, por el contrario, en un espacio cerrado, en donde podremos hacer variar la presión, carbonato cálcico, cal viva y anhídrido carbónico a una temperatura de 1 040°. Ocurrirán diferentes casos.

Si la presión del anhídrido carbónico es de 520 mm., se

encontrará en un régimen de equilibrio, no se formará carbonato cálcico nuevo y no se descompondrá; las cantidades de carbonato cálcico y de anhídrido carbónico permanecerán constantes. Por un procedimiento cualquiera, introduzcamos ahora anhídrido carbónico en el reservorio; parecerá que la presión debe subir; pero no ocurre nada de esto. Cierta cantidad de anhídrido carbónico se combinará con la cal, y la presión permanecerá a 520 mm.

Por el contrario, si extraemos gas, se desprenderá anhídrido carbónico a consecuencia de la descomposición del carbonato hasta que la presión haya subido a 520 mm.

Ocurre aquí algo semejante a lo que se observa con los vapores saturados en presencia de su líquido. Sabido es que, si en un espacio cerrado se tiene un líquido y encima de él su vapor, si la temperatura permanece constante, por más que se intente aumentar o disminuir la presión, no se puede conseguir: se liquida el vapor o se vaporiza el líquido de manera que la presión permanece sin cesar constante.

Sucede absolutamente lo mismo para la disociación del carbonato cálcico: se desprende o se fija anhídrido carbónico de modo que la presión permanece constante. Claro está, que si se llevan las cosas muy al extremo, si se quita sin cesar anhídrido carbónico, todo el carbonato acaba por ser descompuesto, y, a partir de este momento, una nueva extracción da lugar a una baja de la presión. O bien, si introduciendo anhídrido carbónico en el aparato, se transforma toda la cal en carbonato, a partir de este momento, toda nueva introducción o compresión da lugar a una elevación de presión.

Hagamos notar también este hecho importante. Si, en lugar de mantener en el aparato anhídrido carbónico puro, introducimos una mezcla de gases, por ejemplo, anhídrido carbónico y aire, todo ocurre como si no existiese aire, es decir, que el anhídrido carbónico, por su parte, sólo deberá alcanzar la presión de 520 mm.; la presión total de mezclas será según la ley de la mezcla de los gases igual a la suma de las presiones del aire y del anhídrido carbónico. Si, por ejemplo, el aire y el anhídrido carbónico están mezclados en partes iguales, cada uno tendrá 520 mm. de presión y la presión total será 1 040 mm. Si hay dos partes de aire y una de anhídrido carbónico, este anhídrido carbónico deberá tener siempre 520 mm. y el aire dos veces 520 mm., o sea 1040 mm.; la mezcla tendrá, pues, 1560 mm., y así sucesivamente.

La tensión de disociación del carbonato cálcico, se dice que es a 1 040° igual a 520 mm.

A medida que la temperatura desciende, la tensión de disociación baja también, es decir, que el carbonato cálcico puede existir a una presión menor, se hace cada vez más estable. Por el contrario, a medida que la temperatura se eleva, la tensión de disociación se eleva también y el carbonato cálcico se hace cada vez más inestable.

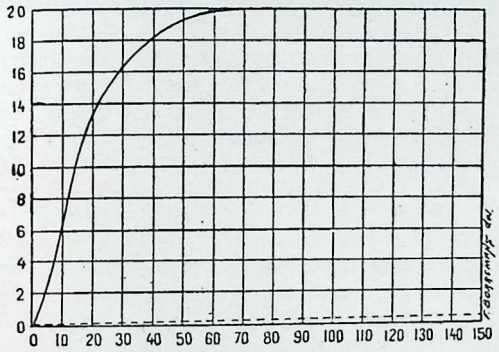


Fig 190

Esta ley se aplica siempre que un cuerpo gaseoso se combina con un cuerpo sólido; naturalmente, según la naturaleza de los cuerpos, el valor de la tensión de disociación a una temperatura dada no es la misma. En la mayor parte de los tratados de Fisiología, se establece una analogía entre la fijación del anhídrido carbónico sobre la cal y la del oxígeno sobre la hemoglobina. Tal semejanza es completamente inexacta, porque resultaría, para una temperatura dada, una tensión de disociación bien determinada de la oxihemoglobina. Por debajo de esta tensión nó podría fijarse oxígeno en la sangre, mientras que por encima esta última se saturaría por completo. Ahora bien; no ocurre nada de esto; sabido es, según las mediciones

practicadas, que la cantidad de oxígeno que se fija en un volumen dado de sangre, crece gradualmente con la presión, como lo representa la figura 190. La ley que regula este fenómeno es la ley de los equilibrios químicos en las soluciones, que importa examinar ahora, para demostrar en qué difiere de la disociación.

IX. — Equilibrios químicos en las soluciones

Cuando se hacen reaccionar unos sobre otros diversos cuerpos en solución, y que los productos que se formen queden también en disolución, la reacción no es en general completa. Tomemos un ejemplo: Mezclemos alcohol con ácido clorhídrico y agua según la fórmula:

$$C^2H^6O + HCl = C^2H^5Cl + H^2O$$

Si, por el contrario, se mezclara éter clorhídrico y agua, se tendría:

$$C^2H^5Cl + H^2O = C^2H^6O + HCl$$

Reacción inversa de la precedente. Se concibe que ninguna de ellas pueda ser completa; tanto para una como para otra, hay un límite correspondiente a un estado de equilibrio, el mismo en los dos casos. La reversibilidad del fenómeno se expresa por el símbolo:

$$C^2H^6O + HCl \rightleftarrows C^2H^5Cl + H^2O$$

y el punto de equilibrio se regula de la manera siguiente: Llamemos C, C' las concentraciones en la solución de C^2H^6O y de HCl, es decir, el peso de estos cuerpos por litro de solución. De la misma manera, llamemos C_1, C'_1 las concentraciones de C^2H^5Cl y H^2O, el equilibrio tendrá lugar, cuando las concentraciones satisfarán a la igualdad

$$\frac{C \times C'}{C_1 \times C'_1} = K$$

de donde:

$$C \times C' = K \times C_1 \times C'_1$$

K es una constante que no depende más que de la naturaleza de los cuerpos en presencia y de la temperatura.

Apliquemos esta regla a la transformación de la hemoglobina reducida en oxihemoglobina. Supongamos que en cierto volumen de líquido hay una cantidad C de hemoglobina, C' de oxígeno, C'' de oxihemoglobina, el equilibrio químico tendrá lugar si se tiene:

$$C.C' = KC''.$$

Hagamos notar que conforme a la ley de disolución de los gases, la cantidad de oxígeno en solución, C', dependerá de la presión que este gas ejerza sobre la superficie libre del líquido. Si esta tensión es muy débil, C' será muy pequeña; el primer término de la ecuación estará próximo a cero y, por consiguiente, ocurrirá lo mismo con el segundo, y habrá poca oxihemoglobina. A medida que la tensión del oxígeno aumenta, se disuelve cada vez más, C' va a ir creciendo gradualmente, y ocurrirá lo mismo con el primer miembro de la igualdad y, por consiguiente, con C''. Poco a poco, la hemoglobina se transforma en oxihemoglobina, fijando tanto más oxígeno cuanto más elevada es la tensión, pero jamás la transformación podrá ser rigurosamente completa, porque entonces no habría más hemoglobina reducida $C = 0$, el primer miembro sería nulo, lo que acarrearía $C'' = 0$, es decir, una contradicción. Este resultado está conforme con lo que expresa la curva de la figura 190.

Se ve, pues, que la cantidad de oxihemoglobina va creciendo con la tensión del oxígeno, sin que jamás, cualquiera que sea la presión, haya transformación completa de la hemoglobina en oxihemoblogina. Esto sería inexplicable por un fenómeno análogo a la descomposición del carbonato cálcico, en donde, por una presión superior a la tensión de disociación, hay fijación del gas hasta la transformación completa saturada, mientras que para una presión inferior a la tensión de disociación hay descomposición completa.

X. — Influencia de la presión sobre los animales

A la orilla del mar, la presión atmosférica es aproximadamente de 760 mm. de mercurio; a medida que nos elevamos sobre este nivel, la presión media disminuye. Se puede, en los límites en que habitualmente vive el hombre, admitir aproximadamente una depresión de un poco menos de 1 mm. por 10 m. de altura; este descenso es cada vez menos rápido a medida que se sube. Cuando se desciende en el agua, hay un aumento de presión de una atmósfera por cada 10 m. de profundidad.

Las regiones más elevadas habitadas por el hombre se encuentran en la cordillera de los Andes; la localidad de la Paz está a 3,720 m., la presión barométrica desciende allí a 480 mm. Pero se puede ascender más; algunos aeronautas han podido pasar de 8,500 m. por medio de precauciones especiales que indicaremos más adelante; el fisiólogo Mosso ha sufrido sin daño, en una campana neumática, una depresión que hacía bajar el barómetro a 192 mm., lo que correspondía a una altura de 11,650 m.

Hemos visto que la fijación del oxígeno sobre la sangre es la consecuencia de una combinación química, y que esta fijación está directamente ligada a la tensión del oxígeno en contacto con la sangre. Existe un límite por debajo del que la tensión del oxígeno no puede descender sin muerte cierta, no siendo la cantidad de oxígeno que se fija entonces, suficiente para sostener la vida. Hemos demostrado también que las condiciones de fijación no dependen más que de la presión parcial del oxígeno en la mezcla de gas nitrógeno y oxígeno que forma la atmósfera. Si, por ejemplo, la presión estuviera reducida a la mitad, no se cambiarían en nada las condiciones de fijación del oxígeno en la sangre, tomando la precaución de doblar la proporción de oxígeno en el aire inspirado. Cuando se asciende en la atmósfera, durante cierto tiempo los cambios de presión son demasiado ligeros para que el organismo se resienta; pero a partir de cierto punto, según condiciones muy variables, se experimenta el mal de las montañas, sobre el que más adelante insistiremos; después se llega a la zona

realmente peligrosa para cualquier individuo, en la que la tensión del oxígeno es muy débil para sostener las condiciones de vida. Para remediar esto, hay necesidad de respirar aire más rico en oxígeno o mejor oxígeno puro, mediante lo que se puede continuar la ascensión. En estas condiciones es en las que algunos aeronautas han podido elevarse a grandes alturas y que Mosso ha podido soportar la depresión considerable de que antes hemos hablado.

Durante la depresión barométrica, se producen cierto número de fenómenos importantes. En los límites en que hasta ahora se ha experimentado, los movimientos respiratorios varían poco; resulta que se inspira o se espira sensiblemente los mismos volúmenes de aire en el mismo tiempo; pero, a medida que se sube, siendo la presión cada vez más débil, estos volúmenes corresponden a pesos cada vez más reducidos de gases. Parecería que los cambios del organismo debían reducirse; pero resulta del análisis de estos gases espirados que, cuanto más se sube, más importante se hacen la fijación del oxígeno y la eliminación del anhídrido carbónico, de tal suerte que se establece una compensación. El aire que sale del pulmón a 2,000 ó 3,000 metros de altura, contiene menos oxígeno y más anhídrido carbónico que en tierra.

Las causas del mal de montañas no son todavía conocidas por completo; este fenómeno depende, en efecto, de muchas circunstancias, en primer lugar, de la costumbre, quizá de la temperatura. Cosa extraña: se adquiere más en unas montañas que en otras; las personas que lo sufren, notan generalmente los primeros efectos en el límite de las nieves, lo que está conforme con la observación de que en los Alpes se produce a menor altura que en las cordilleras o en el Himalaya. Regnard ha demostrado, por comparación en los animales en reposo o en movimiento, que el gasto de energía muscular facilita la aparición del mal de montañas. Esto explica porqué es posible elevarse en globo sin padecerlo, a una altura por debajo de la que se está ya generalmente atacado cuando se sube por una montaña.

El hombre y los animales soportan mejor el aumento que la disminución de presión, al menos cuando no se rebasan ciertos límites. En los trabajos públicos se utilizan aparatos de aire

comprimido para ejecutar los trabajos debajo del agua, cajones o escafandras, que permiten de ordinario descender a 20 m. de profundidad; lo que corresponde a un aumento de presión de 2 atmósferas. Excepcionalmente, se ha trabajado en los cajones de aire comprimido a 4 ½ atmósferas y ciertos buzos han descendido con escafandras a 54 m., lo que da un total de 6 ½ atmósferas.

En estas operaciones hay que considerar dos períodos: la fase de compresión y la de descompresión. Durante el primero, no ocurre generalmente ningún accidente grave, o puede haber algunos zumbidos de oídos, hasta algunos dolores, debidos a la compresión sobre la membrana del tímpano, que es fácil hacer desaparecer mediante algunos movimientos de deglución que restablecen la igualdad de presión sobre sus dos caras. En el momento de la descompresión es cuando es preciso obrar con prudencia. Hasta unos diez metros de profundidad, es decir, para un aumento aproximado de presión de 1 atmósfera, no se observa, por decirlo así, nada de particular cuando se vuelve a la presión normal. Desde los 10 a los 20 metros, se producen, al volver a la presión normal, comezones en la piel, en ocasiones, hinchazón de ciertos músculos y dolores periarticulares. Con mayores presiones aparecen los accidentes graves y hasta mortales, las parálisis, síncopes, alteraciones de la vista o del oído, etc. Estos accidentes siguen inmediatamente a la salida del aparato o tardan algún tiempo, hasta veinticuatro horas en producirse. Desde este punto de vista, hay una regla absoluta que observar. El peligro es tanto mayor cuanto con más rapidez se producen la compresión y sobre todo la descompresión. He aquí porqué en los grandes cajones que sirven para hacer los fundamentos de los pilares de los puentes, no se penetra directamente en la cámara de aire comprimido, sino que se entra por una pieza intermedia que desempeña el papel de esclusa, en donde se producen gradualmente las variaciones de presión; aumento a la entrada y disminución a la salida. Procediendo con lentitud, sobre todo a la salida, se evita casi todo accidente.

Pablo Bert, y tras él otros autores, han estudiado los efectos de la compresión por medio de aparatos de laboratorio consistentes en cámaras metálicas herméticamente cerradas, en

donde se podía encerrar, bien al hombre, bien a los animales.

Hasta 5 atmósferas aproximadamente, Pablo Bert ha apreciado los mismos fenómenos que acaban de ser enumerados. Los autores que le han seguido, han demostrado que en estas condiciones, ni los cambios respiratorios ni el ritmo respiratorio eran modificados. A 5 atmósferas, el aire contiene, en el mismo volumen, tanto oxígeno como el mismo volumen de oxígeno puro a la presión atmosférica; ahora bien; se han estudiado los efectos del oxígeno puro y se ha reconocido que la inspiración de este gas no modificaba la intensidad de los cambios.

Los accidentes durante la descompresión parecen provenir del hecho siguiente. Mientras el animal se encuentra sometido a una gran presión, los gases del aire, aparte de la fijación del oxígeno sobre la hemoglobina, se disuelven en el plasma de la sangre proporcionalmente a la presión. En el momento de la descomposición se desprenden en burbujas. El oxígeno puede ser utilizado por los tejidos, pero el nitrógeno forma, como será demostrado a propósito de la capilaridad, embolias gaseosas que no se reabsorben más que con mucha dificultad e impiden la circulación en los pequeños vasos.

Cuando la presión asciende por encima de 6 atmósferas, se producen los accidentes graves en los animales; a partir de 8 atmósferas son siempre mortales para los mamíferos; las aves resisten un poco más, hasta 10 atmósferas. Estos accidendentes son debidos principalmente a perturbaciones de los centros nerviosos, que se traducen por convulsiones o parálisis. Estos fenómenos no son de origen puramente mecánico, porque poniendo los animales en oxígeno puro, se les ve aparecer en cuanto la presión sube a 3 atmósferas aproximadamente. El oxígeno bajo presión es, pues, tóxico para el organismo: produce, en las condiciones indicadas, convulsiones clónicas y tónicas, a las que el animal concluye por sucumbir si la presión ha sido llevada demasiado lejos o mantenida durante un tiempo excesivamente largo.

Los animales acuáticos pueden soportar presiones mucho más considerables que los animales terrestres sin ser molestados. La experiencia de laboratorio prueba que un pez comprimido a 100 atmósferas en el agua no experimenta ningún mal-

estar; no muere más que a 300 atmósferas. Un hecho que concuerda con éste, es que las pescas en aguas profundas y los dragados arrastran peces vivos a la superficie, en las tomas hechas hasta 3,000 metros de profundidad; más allá, desaparecen. Estos 3,000 metros corresponden a 300 atmósferas. Pero la vida continúa a mucha mayor profundidad, y hasta en las mayores profundidades hasta el día exploradas, se encuentran diversos animales. En el laboratorio se han podido ver crustáceos que vivían hasta 600 atmósferas; los fermentos no son destruídos a 1,000 atmósferas. Por último, Roger ha demostrado que diversos bacilos son apenas atenuados y otros en manera alguna influenciados por presiones de cerca de 3,000 atmósferas.

XI. — **Tensión superficial y capilaridad**

La superficie de separación de un líquido en contacto con un gas, o de un líquido en contacto con otro líquido incapaz de mezclarse con él, presenta una particularidad muy notable. Todo ocurre como si esta superficie de separación estuviera constituída por una membrana elástica.

He aquí algunas experiencias elementales que ponen en evidencia este fenómeno.

Experiencia de Pasteur. — Si se espolvorea con licopodio la superficie del agua, y se introduce normalmente a la superficie libre una varilla de vidrio, ligeramente engrasada para que no se moje, se ve el licopodio formar alrededor de la varilla una verdadera funda que se deprime como una membrana elástica y recobra su forma plana cuando se retira la varilla; hace absolutamente la impresión de una lámina de caucho tensa en la superficie del agua.

Experiencia de Dupré (fig. 191). — Tomemos una cuba de fondo plano que tenga una pared *CD* movible alrededor del eje horizontal *C*, y cuyos bordes solamente estén ligeramente engrasados para evitar los escapes de agua entre ella y la pared fija. Vertamos agua en esta cuba: veremos, a pesar de la presión ejercida por el agua de dentro afuera, ser atraída la pared móvil de *D* hacia *D'* por efecto de la elasticidad de la superficie libre. Esta es la explicación, porque si se engrasa toda la superficie de la pared de manera que el agua no tome

Fig. 191

en ella su punto de fijación mojándola, esta retracción de *D* hacia *D'* no tiene lugar.

Esta misma influencia se manifiesta claramente en las láminas delgadas de líquido, en donde se tienen dos superficies de separación del líquido y del aire adosadas; en tal caso, se pueden realizar numerosas experiencias demostrando cómo la atracción elástica se produce en la superficie libre.

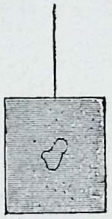


Fig. 192

Tomemos, por ejemplo, un pequeño marco metálico (fig. 192) y sumerjámoslo en el agua de jabón; se formará una lámina delgada de líquido. Lancemos sobre esta lámina fina un hilo de algodón cuyos dos extremos están unidos para formar un anillo; este anillo tomará una forma cualquiera, pero si perforamos la lámina fina del medio, desaparece por dentro del anillo que, sufriendo en todos sus puntos una tracción de dentro afuera solamente, tomará una forma circular. Ahora se comprenderá el mecanismo mediante el que se forman las burbujas de jabón: la membrana líquida desempeña el mismo papel que la membrana elástica de los pequeños globos de caucho, y si, después de haberlos hinchado, no se cierra la abertura por donde se ha introducido el aire, se deshinchan expulsando al exterior el gas que contenían. Esto es también el motivo por el que una gota de líquido sumergida en otro líquido no miscible con el primero toma una forma esférica.

¿Qué ocurre en el punto de contacto de la superficie libre de un líquido con la pared del vaso que la contiene? Pueden ocurrir dos casos.

Si (fig. 193) el líquido no moja la pared que supondremos

vertical, no podrá terminarse perpendicularmente a esta pared, la membrana elástica que forma su superficie y se continúa a lo largo de la pared del vaso tiene, en consecuencia, que redondear el borde, como indica la figura, y la superficie de separación del líquido y del aire encuentra la pared del vaso formando un ángulo α, llamado ángulo de encogimiento. Este

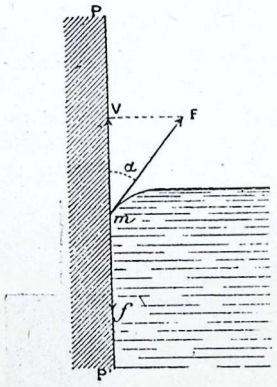


Fig. 193

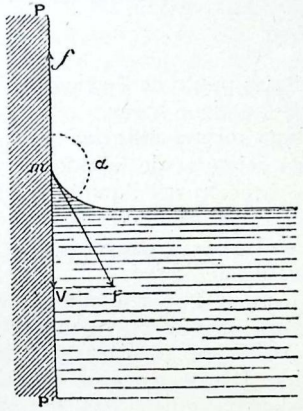


Fig. 194

ángulo de encogimiento es constante para un mismo líquido y una misma naturaleza de pared; es fácil de observar en un vaso de cristal que contenga mercurio, por ejemplo.

Si el líquido moja la pared (fig. 194), la membrana líquida ejerce sobre el borde una tracción de bajo arriba; existe en este punto una elevación del líquido, el ángulo de encogimiento es de sentido inverso al precedente.

Teniendo esto en cuenta puede explicarse fácilmente lo que ocurre en los tubos sumergidos en un líquido. Si (fig. 195) el líquido no moja la pared, la superficie libre en el tubo debe tomar la forma de un menisco convexo hacia arriba a consecuencia de la tracción elástica de la membrana que lo separa del aire, resulta una depresión, el líquido sube menos alto de lo que harían pensar las leyes de la hidrostática. A consecuencia de este fenómeno, se produce en los barómetros una

depresión que hay que tener en cuenta para tener la verdadera presión atmosférica. Cuando el líquido moja el tubo (fig. 196), existe, por el contrario, una tracción hacia arriba, ya que la fuerza ejercida por la membrana está naturalmente siempre dirigida hacia el lado de la concavidad; el líquido sube más alto de lo que debería.

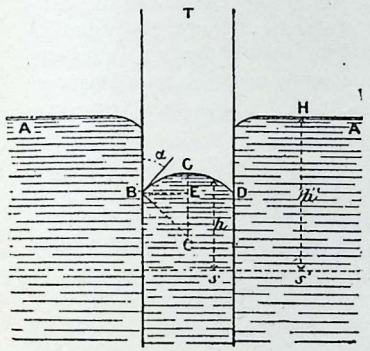


Fig. 195

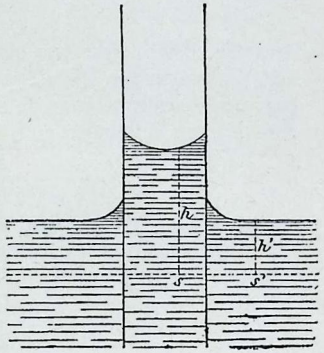


Fig. 196

La altura de ascensión o depresión del líquido en un tubo capilar varía con la naturaleza del líquido y del tubo. Además, depende del diámetro del tubo, y partiendo de este punto de vista se puede formular una ley muy sencilla:

Ley de Jurin. — *Las alturas de ascensión o de depresión de un líquido en tubos estrechos de la misma substancia, pero de diferentes diámetros, varían en razón inversa del diámetro de los tubos.* Así si pasando de un tubo a otro, se aprecia una ascensión doble, por ejemplo, se puede decir que el diámetro está reducido a la mitad.

La tensión superficial de los líquidos permite explicar diversos fenómenos, paradójicos a primera vista. Si se toma un pequeño hilo metálico o una aguja de coser delgada, basta pasarla entre los dedos para engrasarla ligeramente y poderla hacer flotar sobre el agua, como indica la figura 197. Esto depende de que está mantenida por la membrana elástica que

forma la superficie libre, no mojando el agua la aguja y dando lugar a un menisco convexo por arriba sobre los bordes, pero cóncavo bajo la aguja y ejerciendo una presión de bajo arriba. Si se lava la aguja con éter, inmediatamente queda mojada y cae al fondo del agua. Por este mismo mecanismo, ciertos insectos, más pesados que el agua (fig. 198), pueden, no obstante, mantenerse en la superficie y pasearse por ella. Es suficiente lavarles las patas con éter para desembarazarlos de su materia grasa para ver cómo estos insectos se hunden en el agua.

Fig. 197

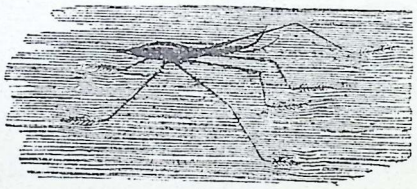


Fig. 198

Encontramos también así la explicación de los movimientos de las burbujas líquidas en los tubos capilares y de la resistencia de las embolias gaseosas.

Consideremos un tubo capilar cónico (fig. 199) y en este tubo una burbuja líquida; podrá ocurrir que este líquido moje o no moje el tubo. En los dos casos, la fuerza ejercida sobre cada menisco estará dirigida hacia su concavidad, pero la fuerza del menisco pequeño es superior a la del grande, como se ve en el caso de la ley de Jurin; es, pues, siempre la fuerza del menisco pequeño la que lo arrastrará. Si el líquido moja la pared, se ve que la burbuja será arrastrada hacia las partes más estrechas, si no lo moja, la burbuja será empujada hacia las partes más anchas.

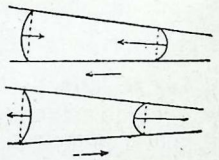


Fig. 199

Una burbuja de aire en un líquido que moje la pared,

dará lugar a dos meniscos y opondrá una resistencia a cualquier fuerza que tienda a empujarle hacia las partes estrechadas del tubo.

Hay que hacer notar, y se olvida con demasiada frecuencia, que estos fenómenos están localizados en las superficies de separación de los líquidos y de los gases o de dos líquidos no miscibles y que, aun en tubos muy estrechos, no puede ser cuestión de fenómenos capilares, en el sentido que acabamos de dar a este término, si el líquido llena completamente el tubo.

Así, tomemos un tubo estirado en su parte inferior y vertamos en él mercurio, que no lo moja, se formará en el tubo capilar un menisco cóncavo del lado del mercurio; resultará una presión de abajo arriba capaz de sostener una columna de líquido bastante elevada, un metro por ejemplo, si el tubo es bastante estrecho. Pero si, por un artificio cualquiera, conseguimos llenar todo el tubo sumergido por su punta en un baño de mercurio de modo que no tengamos menisco entre el mercurio A y el mercurio B, toda acción capilar quedará suprimida y el mercurio se derramará lenta, pero completamente de A a B. Este es el motivo porqué es algunas veces difícil, en la filtración del mercurio, cebar el derrame, pero una vez ha comenzado, se realiza completamente. De la misma manera, en un sistema capilar enteramente lleno de un líquido que moje la pared, no hay otras resistencias que vencer que las debidas al frotamiento; pero si se ha introducido aire, se forman burbujas, meniscos y resistencias, en ocasiones invencibles.

Otra aplicación interesante de la capilaridad se encuentra en el cuentagotas.

Cuando se hace derramar lentamente un líquido por un orificio cuyo plano es horizontal no se tiene un chorrillo continuo, sino, si el líquido moja la pared del orificio, una serie de gotas de peso sensiblemente constante. En efecto, el líquido adhiere alrededor del orificio que moja, y se forma un pequeño glóbulo cuya superficie funciona como una cubierta elástica (fig. 200); cuando el peso de este glóbulo se hace muy considerable, hay ruptura alrededor del orificio y cae una gota. Se concibe muy bien, según este mecanismo, que la gota debe destacarse por un peso, tanto mayor cuanto más considerable sea el contorno del orificio, puesto que esto aumenta la porción

de membrana que sirve para sostener la gota. Generalmente, el orificio está en la extremidad inferior de un tubo sostenido verticalmente; se puede prever, y la experiencia lo comprueba, que en estas condiciones el peso de las gotas para un mismo líquido es proporcional al contorno del tubo. En la práctica farmacéutica, se ha convenido adoptar un tubo determinado, de modo que las gotas tengan siempre el mismo valor para un mismo líquido; este tubo tiene 3 mm. de diámetro exterior, y en estas condiciones el agua destilada da 20 gotas por gramo.

En los formularios se encuentran unas tablas que indican cuántas gotas hay en un gramo de los diversos líquidos que se miden de esta manera, admitiendo que se haga uso del cuentagotas que acabamos de especificar.

El cuentagotas de Duclaux (fig. 201),

Fig. 200

Fig. 201

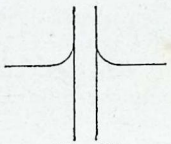


Fig. 202

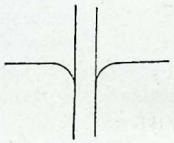


Fig. 203

de que se hace uso frecuente en los laboratorios, tiene, a partir de un trazo superior *b*, un volumen conveniente, y un diámetro del tubo de derrame tal que el agua destilada que contiene da 100 gotas a la temperatura ordinaria de los laboratorios. Si un líquido acuoso da un número de gotas mayor, es que se trata de agua que contiene en disolución un cuerpo que hace bajar la tensión superficial, el alcohol, por ejemplo, en cantidad tanto más importante cuanto mayor es el número de gotas.

Hay que hacer notar, por último, un hecho importante desde el punto de vista práctico, en lo que concierne a ciertos efectos de la capilaridad. Cuando se sumerge en un líquido una varilla mojada por el líquido, se forma en el punto de inmersión un menisco como el de la figura 202; el líquido ejerce una verdadera tracción de arriba abajo sobre la varilla.

Si la varilla no es mojada (fig. 203) el sentido del menisco cambia; el líquido ejerce sobre la varilla una acción de sentido contrario a la del caso precedente.

Se concibe que cuando se hace uso de un areómetro según que el tallo de este instrumento esté perfectamente limpio y mojado por un líquido o ligeramente engrasado, se podrán obtener indicaciones diferentes del aparato. Es, por lo tanto, conveniente vigilar esta causa de error, y si es preciso, lavar el areómetro con éter antes de utilizarlo.

XII. — **Viscosidad**

Se dice que un líquido es más viscoso que otro cuando, en igualdad de las demás circunstancias, se derrama con más dificultad a través de un tubo estrecho. La misma manera como se mide la viscosidad hará comprender mejor lo que se entiende con esta denominación.

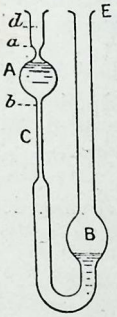


Fig. 204

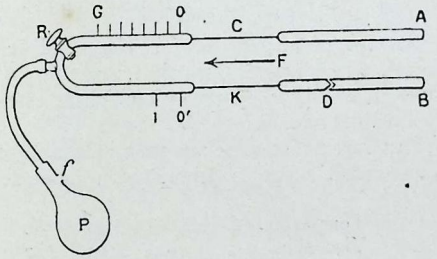


Fig. 205

Viscosímetro de Ostwald. — El aparato de cristal representado en la figura 204 sirve para medir la viscosidad de un líquido con relación a la del agua tomada como unidad.

Para esto se coloca el líquido que hay que estudiar en el aparato, de modo que se eleve hasta *d*, estando la bola *A* completamente llena, así como el capilar *C*, pero no conteniendo la bola *B* más que poco líquido. Basta para mantener las cosas en este estado tapar el orificio *E* con un dedo.

En un momento dado se destapa E, estando el aparato vertical. El líquido circula de A hacia B. En el momento en que el nivel pasa por la estrangulación a, en donde se encuentra un índice, se anota la hora. Se cuentan cuántos segundos son necesarios para que la bola A se vacíe hasta b, sea ϑ el número de segundos.

Este tiempo de derrame es tanto mayor cuanto mayor sea la viscosidad v del líquido. Está por el contrario, en razón inversa de la presión que produce el derrame, es decir, de la diferencia de nivel y de la densidad del líquido. Llamando K a un constante que depende del aparato, se tiene:

$$\vartheta = K\frac{v}{hd} \quad \text{o} \quad Kv = h.\,d.\,\vartheta. \qquad [1]$$

Si se vuelve a repetir la operación con el agua cuya viscosidad será, por definición, tomada como unidad, y se opera con la misma cantidad de líquido, de donde resultará el mismo valor de h, se tendrá, puesto que la densidad del agua es $= 1$ $K = h\vartheta'$. [2]. De donde por división de [1] por [2]: $v = d\frac{\vartheta'}{\vartheta}$

Bastará, pues, para tener la viscosidad de un líquido con relación a la del agua, tomar la relación de los tiempos de derrame en el mismo aparato y multiplicar este cociente por la densidad del líquido.

La temperatura tiene una gran influencia sobre el valor de la viscosidad, como lo demuestra la siguiente tabla:

Temperatura . .	0	30	60	70
Viscosidad. . .	100	45	27	23,5

Importa, por consiguiente, conocer la temperatura del líquido cuya viscosidad se mide, y para ello debe introducirse el aparato hasta por encima de la bola A en agua, en donde se introducirá también un termómetro.

El método de Ostwald no puede aplicarse a la sangre, en primer lugar, porque sería necesaria una gran cantidad, muchos centímetros cúbicos, y en segundo lugar porque la operación exige cierto tiempo, lo que acarrea coagulaciones en el capilar.

En ese caso, se hace uso del viscosímetro de Hess, para el que basta tomar una gota de sangre por una punción hecha en un dedo.

Viscosímetro de Hess. — El viscosímetro de Hess se compone esencialmente de dos capilares finos, C y K, prolongados por ambos lados por tubos notablemente menos capilares, que deben en suma servir de reservorios. La pera P permite, tapando el orificio f con el dedo, hacer aspiraciones y expulsiones de líquido. Se comienza por abrir la llave R, y, poniendo una gota de agua destilada en A, se hace penetrar el líquido hasta el trazo o; en este momento se cierra R. Se toma entonces el tubo movible BD, y, practicando una picadura en el dedo, se le llena de sangre.

Se coloca el tubo lo más rápidamente posible en su sitio, asegurando el contacto en D. Se aspira la sangre con la pera de modo que se la haga llegar hasta el trazo o. Después, abriéndo R, se aspiran los dos líquidos a la vez; se desplazan en el sentido F. La sangre va tanto más lentamente con relación al agua, cuanto más viscosa es. Cuando ha llegado a 1, se para el aspirador y se lee en la graduación empírica OG cuál es la viscosidad.

Una vez hecha la operación, es preciso, para evitar las coagulaciones, lo que inutilizaría el aparato, vaciar el capilar K, por compresión de la pera, y hacer penetrar amoníaco y lavarlo con agua destilada.

El viscosímetro de Hess tiene el inconveniente de ser frágil; además, si se produce una coagulación en el capilar K, el aparato queda inútil.

Viscosímetro de Denning y Watson. — Este viscosímetro consiste esencialmente en un pequeño tubo capilar como el representado en la figura 206. Lleva en A un pequeño ensanchamiento y en B un embudo capaz de contener una gota de líquido. De una vez para siempre se ha determinado el tiempo necesario para que una gota de agua destilada, depositada en B, llene el ensanchamiento de a a b. Para medir la viscosidad, se deposita una gota de sangre en B, con el hilo en el capilar, y se cuenta el tiempo necesario para que la sangre pase de a a b.

Tomando la relación de los tiempos de derrame para la sangre y el agua destilada, o refiriéndose a una tabla trazada de antemano, se tiene el valor de la viscosidad.

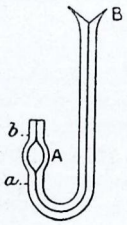


Fig. 206

El aparato no es frágil; el único temor que se puede tener es el de la coagulación en el capilar; la pérdida no es grande, dado el precio insignificante de estos tubos.

Debiendo ser tomadas las medidas de viscosidad sanguínea con rapidez antes de que tenga tiempo de producirse un principio de coagulación, nunca se conoce con certeza la temperatura de la sangre en el momento de la medición. Existe, pues, una causa de imprecisión que no puede ser despreciable.

XIII. — **Disolución de los sólidos y de los líquidos**

Un líquido puede disolver otro líquido o un sólido. Algunas veces, dos líquidos pueden mezclarse en proporción indefinida; es el caso del alcohol y el agua, por ejemplo. Pero en otros casos, como el del agua en presencia del éter o del cloroformo, el agua no disuelve más que cierta cantidad de estos líquidos. De la misma manera, los líquidos no disuelven los sólidos más que hasta cierto límite; en este momento se dice que la solución está saturada, aunque se añada más cuerpo no se disuelve.

Para cada uno de los cuerpos en cuestión existe un coeficiente especial que da la proporción de cuerpo disuelto; generalmente, esta proporción se da por 100 partes del disolvente medido en volumen. Así, se dirá que tal sal se disuelve a razón de 10 gr. por 100 cm.^{3} de agua. La temperatura tiene, por lo menos en general, una gran influencia sobre esta disolución. Cuando se eleva, la solubilidad aumenta; no existen más que algunas raras excepciones a esta regla. Para ciertos cuerpos, como el cloruro de sodio, el aumento de solubilidad con la temperatura es ligero, para otros es muy considerable. Las tablas de solubilidad dan para cada cuerpo la ley de variación con la temperatura.

Si se ha hecho disolver un cuerpo, una sal, por ejemplo, en un líquido caliente y se ha obtenido una solución saturada a elevada temperatura, en el momento del enfriamiento la sal se deposita en parte, no dejando en solución más que la cantidad de sal correspondiente a la saturación a baja temperatura. No obstante, se presenta con frecuencia un fenómeno notable. Se hace descender la temperatura, la sal no se deposita; la solución la contiene entonces en excesiva proporción para esta temperatura baja; se dice entonces que está sobresaturada. Es suficiente arrojar en ella un pequeño cristal de la sal, o hasta en ocasiones dar un ligero golpe contra el vaso que contiene la solución para ver precipitarse inmediatamente el exceso de sal, al mismo tiempo que la temperatura del líquido se eleva.

Mientras una sal se disuelve en un líquido, hay descenso de temperatura, en ocasiones considerable. A esta regla hay excepciones aparentes debidas a una reacción química que acompaña a la disolución, y algunas excepciones reales para las sales cuya solubilidad va disminuyendo cuando la temperatura se eleva.

XIV. — **Ionización de las soluciones**

La disolución de un cuerpo va acompañada con frecuencia de un fenómeno de gran importancia denominado *ionización*. Este fenómeno consiste en una descomposición, espontánea, por el solo hecho de ponerse en solución las moléculas del cuerpo que entra en esta solución. Así, si se disuelve en el agua cloruro de sodio, NaCl, la ionización de este cloruro consiste en una descomposición de la molécula NaCl en un Ion sodio Na, y un Ion cloro Cl.

Más adelante veremos que diversas propiedades de las disoluciones dependen de lo que se llama el número de moléculas que contienen. Si se diluye una solución, parece, a primera vista, evidente que cada unidad de volumen debe conducirse como si contuviera un número de moléculas que variara en razón inversa de la dilución. Esta es una consecuencia de la constancia del número de moléculas en el volumen total, sea

cual fuere el grado de dilución. La experiencia demuestra que para diversas substancias, el azúcar de caña, por ejemplo, la glicerina, etc., ocurre así; pero, para la mayor parte de los ácidos, de las bases, de las sales, se presenta una anomalía; el número de moléculas, parece que va aumentando en el volumen total, a medida que se les añade disolvente.

Se ha interpretado este hecho admitiendo que la molécula se divide en partículas denominadas *iones*, que, desde ciertos puntos de vista, por lo menos, desempeñan cada uno el mismo papel que la molécula entera.

Tomemos como ejemplo una solución acuosa de cloruro de sodio (NaCl), que contenga 5,8 gr. de sal por litro; se puede, siguiendo ciertos métodos cuya exposición no es de este lugar, determinar el número de moléculas ionizadas, y en el caso particular en que nos encontramos, se ve que hay 50 por 100 aproximadamente. Aumentemos el volumen a diez veces su valor primitivo: 80 por 100 de las moléculas serán ionizadas; repitiendo la misma operación, la casi totalidad de las moléculas serán ionizadas. Como cada NaCl da un ion Na y un ion Cl, la última solución contendrá dos veces más iones que moléculas se han puesto.

Veremos más adelante el papel desempeñado por esta ionización en diversos fenómenos, y encontraremos cuerpos que en lugar de dar por división de la molécula dos iones solamente, dan tres o cuatro.

Los cuerpos que disolviéndose en el agua no se ionizan, como el azúcar de caña, por ejemplo, no hacen al agua conductora de la electricidad. Los cuerpos que, por el contrario, se ionizan, confieren a la solución una conductibilidad tanto mayor, para un mismo peso de cuerpo disuelto, cuanto más pronunciada es la ionización. Estos últimos cuerpos se denominan *electrólitos*.

XV. — **Imbibición**

Ciertas substancias orgánicas, sumergidas en un líquido, no se disuelven, pero absorben cierta cantidad de este líquido hinchándose. Aumentando así de volumen pueden, si nos oponemos a su dilatación, ejercer una presión bastante considerable. Esta propiedad es bien conocida de los anatómicos, que, para desarticular los huesos de un cráneo, lo llenan de semillas secas, de habichuelas, por ejemplo, por el agujero occipital, sumergiéndolo después en el agua. El aumento de volumen de las habichuelas produce una presión de dentro afuera a la que las suturas de los diversos huesos del cráneo no pueden resistir. Se emplean también en cirugía fragmentos de esponja seca o de una madera llamada laminaria (1), de calibre bastante reducido, pero que, humedecidas, aumentan de volumen y pueden también servir para dilatar ciertas cavidades.

XVI. — **Difusión**

Si se pone agua en una probeta (fig. 207) y se hace pasar con precaución, utilizando una pipeta, una solución salina a la parte inferior de la probeta, se aprecia que los dos líquidos, aunque miscibles, presentan una superficie de separación horizontal muy clara. Poco a poco se esfuma, la sal de la solución penetra en el agua, y al cabo de cierto tiempo, si se saca una porción de esta agua, se aprecia que contiene tanta más sal cuanto más cerca de la superficie de separación primitiva se haga la toma de agua y desde cuanto mayor tiempo dure la experiencia. Tal es la experiencia fundamental de la difusión de los líquidos debida a Graham. Es fácil de repetirla con los objetos usuales; tomemos un vaso de agua y vertamos en él, con precaución, vino rojo; se puede, con un poco de paciencia, y haciendo caer las gotas de vino sobre un pequeño trozo de papel flotante sobre el agua, obtener dos capas separadas por una superficie limpia, quedando el agua en la parte inferior del vaso, el vino, más ligero, en la superior. Poco a poco se verá

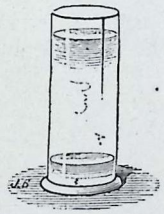


Fig. 207

(1) Es el pedicelo de la Laminaria digitata, L., Laminaria Cloustoni, Edm., alga laminariácea que habita en el Atlántico, costas de la Mancha y mar del Norte, llamada en castellano *correa*. (N. del T.)

esta superficie hacerse cada vez menos limpia, los dos líquidos se penetran por difusión, y gracias al color del vino se podrá seguir la marcha. Una condición indispensable para el éxito de estas experiencias, es que los dos líquidos sean solubles uno en el otro; no podría realizarse con el agua y el aceite, por ejemplo.

De sus experiencias, Graham ha sacado las tres leyes siguientes:

1.ª La velocidad de difusión varía con la naturaleza de la substancia en disolución.

2.ª Las cantidades de sal difundida en un mismo tiempo por soluciones diversamente concentradas de una misma substancia, son proporcionales a los grados de concentración.

3.ª La cantidad de sal difundida por una solución dada aumenta rápidamente con la temperatura.

Estudiando así los diversos cuerpos, se aprecia que pueden clasificarse en dos categorías: unos difunden en abundancia, los otros lo hacen con dificultad. Los primeros son los que son capaces de cristalizar; Graham los ha designado con el nombre de cristaloides, reservando el nombre de coloides a los segundos, que no cristalizan.

He aquí unas cifras que darán una idea de la diferencia que hay entre estas dos especies de cuerpos: representan el tiempo necesario para una misma difusión:

Cristaloides		Coloides	
Ácido clorhídrico. . .	1	Albúmina.	49
Sal marina.	2,33	Caramelo	98
Sulfato de magnesia. .	7		
Azúcar	7		

La difusión en el agua puede permitir la separación, parcial, por lo menos, de dos cuerpos desigualmente difusibles, por ejemplo, un cristaloide y un coloide, pero veremos que para esta operación es ventajoso modificar algo la experiencia. Durante la difusión pueden presentarse descomposiciones; así, si se hace difundir una solución de bisulfato potásico, se descompone en sulfato neutro y ácido sulfúrico, que difunde

con mayor rapidez. El alumbre de potasa se descompone, generalmente, en sulfato de alúmina y sulfato potásico.

En estas experiencias, es importante evitar las variaciones de temperatura de los líquidos, porque de ello resultan corrientes de convección que falsean completamente los resultados. Se evita esta causa de error añadiendo al agua un poco de gelatina, por ejemplo. La disolución de esta gelatina se hace en caliente, y por enfriamiento se tiene una masa sólida en la que la difusión se hace como en el agua pura, con la condición de que la cantidad de gelatina no sea excesivamente grande; ha de haber precisamente la suficiente para apoderarse del agua. Una vez la masa coagulada, se corta en cubos que se sumergen en la solución salina; al cabo de cierto tiempo se les retira y se toman fragmentos de ellos que se someten al análisis. Se puede también moldear la solución de gelatina en una probeta, y una vez coagulada, verter en la superficie libre la solución salina sobre la que se desea experimentar.

XVII. — **Estado coloidal**

Graham había distinguido los cristaloides de los coloides por la propiedad que poseen los primeros de difundir rápidamente, en tanto que los segundos no lo hacen sino con lentitud. En realidad, numerosos cuerpos pueden, según las circunstancias de su preparación, estar o no en estado coloidal, citemos, por ejemplo, numerosos metales; no obstante, no se dirá que son coloides.

El estado coloidal se distingue por el hecho de encontrarse el cuerpo, en estado de gran división, en suspensión estable en un líquido. Esta constitución puede comprobarse por medio de un dispositivo denominado ultramicroscopio, que permite apreciar granos completamente invisibles por los métodos microscópicos ordinarios.

Se ha podido apreciar de esta manera que los gránulos de las soluciones coloidales varían alrededor de 1 μμ, a 100 μμ, según la substancia estudiada; 1 μμ, representa 1 millonésima de milímetro. El número de estos gránulos varía según la naturaleza y concentración de las soluciones; nos bastará decir

que una solución que contiene 5 miligramos de oro coloidal en 100 cm.^{3} encierra aproximadamente mil millones de gránulos por milímetro cúbico (1).

Se aprecia también que todos estos elementos están animados de pequeños movimientos vibratorios que constituyen lo que se denomina "movimiento Browniano".

Cuando se hace pasar un haz luminoso a través de un líquido o una solución perfecta, que no contenga ni polvo ni corpúsculos en suspensión, el haz atravesará el líquido sin dejar huella luminosa; un observador colocado a un lado no puede, en manera alguna, darse cuenta de la extinción o de la reaparición de la luz. Tyndall ha expresado esto diciendo que este líquido está ópticamente vacío. Pero no ocurre lo mismo si contiene en suspensión partículas capaces de iluminarse y de difundir la luz. Se produce entonces un fenómeno análogo al que se observa cuando un rayo solar penetra en una habitación obscura, en donde el aire está lleno de polvo. Se ve el trayecto del haz luminoso. Es lo que ocurre con las soluciones coloidales, no están ópticamente vacías.

Entre las propiedades más notables de las soluciones coloidales, hay que citar el hecho de que los granos que los componen se desplazan bajo la acción del campo eléctrico, ya del polo + hacia el polo —, ya en sentido contrario. Las soluciones coloidales cuyos gránulos van hacia el polo + se llaman electronegativas; los gránulos van hacia el polo + porque están cargados negativamente. Las demás soluciones coloidales son electropositivas. Así, el oro y la plata coloidal, el glucógeno, el azul de anilina, son electronegativos; el cadmio, el aluminio, el rosa de Magdala, son electropositivos.

No es este lugar de describir los métodos que permiten preparar las soluciones coloidales.

Las soluciones coloidales son estables merced a la división extrema de la materia, porque entonces, siendo enorme la superficie de los gránulos con relación a su masa, no se desplazan sino difícilmente en el líquido. Los gránulos están mantenidos a distancia unos de otros por la repulsión de las cargas

(1) La superficie de éstos gránulos contenidos en 1 mm^3 sería de 625 metros cuadrados. (N. del T.)

eléctricas que llevan. Si se llega a descargarlos, se adosan unos a otros, forman una aglomeración más importante en la que la masa acaba por reunirse y se produce la precipitación o floculación. Para obtener este resultado, basta mezclar en una proporción conveniente dos coloides inversos, por ejemplo, el rosa Magdala y el azul de anilina. Las soluciones de electrolitos producen el mismo efecto; en particular los coloides electropositivos, son precipitados por las soluciones básicas y los coloides electronegativos por las soluciones ácidas.

XVIII. — **Osmosis**

Experiencias análogas a las de la difusión pueden realizarse interponiendo entre los dos líquidos un tabique, un septum, constituído por un trozo de vejiga o de cualquier otro cuerpo susceptible de ser mojado por los dos líquidos.

Dutrochet construyó un *endosmómetro* con una fiola cuyo fondo había sido reemplazado por una vejiga de cerdo formando tabique (fig. 208). En el cuello colocaba un tubo vertical dotado de una graduación y el todo sumergido por su parte inferior en un cristalizador. Cuando se colocaba alcohol en el interior del frasco y agua exteriormente, al cabo de cierto tiempo se apreciaba el paso de una parte de alcohol al agua y de una parte de agua al alcohol. Este último paso era hasta más abundante que el primero, porque el nivel se elevaba en el tubo graduado. Dutrochet designó estos dos pasos con los nombres de endosmosis y exosmosis, pero estas expresiones no tienen razón de ser, porque si se coloca alcohol exteriormente y agua interiormente, el fenómeno ocurre a la inversa, el nivel baja en el tubo graduado y cada uno de los dos líquidos pasa como precedentemente, pero en sentido inverso.

La naturaleza de la membrana tiene una influencia considerable; si se reemplaza la vejiga de cerdo por una lámina de caucho, el alcohol pasa más de prisa que el agua. Si se coloca a una parte de la vejiga de cerdo agua y al otro una solución salina, hay doble cambio, como para el alcohol y el agua, pero marchando la corriente del agua hacia la solución, la aca-

rrea; dicho de otro modo: el nivel se eleva en el tubo graduado si es la solución salina la que se encuentra en la fiola.

Existe, además, un punto notable que señalar: es que para ciertas membranas, las condiciones de osmosis se modifican cuando se vuelve esta membrana.

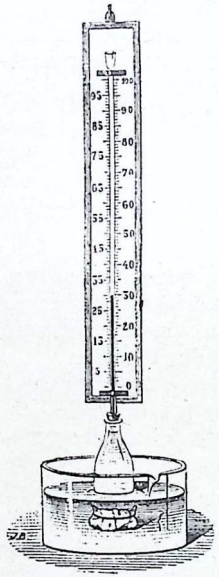


Fig. 208

Los fenómenos de osmosis a través de una membrana, tienen una aplicación práctica importante. Pasando las diversas substancias solubles en el agua con velocidades muy diferentes a través de las membranas, pasando, los cristaloides en particular, con gran rapidez con relación a los coloides, se pueden separar estas especies de cuerpos mediante lo que se llama diálisis. El dialisador se

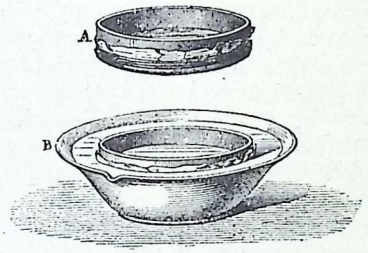


Fig. 209

compone esencialmente de un vaso de poca altura *A* (fig. 209), cuyo fondo ha sido reemplazado por una membrana, que de ordinario es una hoja de papel pergamino; es lo mejor que se ha encontrado. Se vierte en el interior del aparato el líquido que se ha de tratar y se coloca todo en un recipiente *B*, que contiene agua pura. Los coloides permanecen en el vaso *A*, los cristaloides pasan a *B*. Si no se desea recoger los cristaloides, se establece en el exterior del vaso *A* una corriente continua de agua, mediante la que se puede desembarazar completamente de cristaloides. En los casos en que no se cambia el agua que hay en *B*, se enriquece en cristaloides

hasta un estado de equilibrio del que no puede pasar; es preciso entonces quitar el agua de *B* y reemplazarla por agua nueva, y así sucesivamente hasta agotamiento de los cristaloides de *A*; la operación resulta más larga que con la corriente de agua.

No es preciso insistir sobre los demás resultados experimentales que se han obtenido operando de esta manera, ni sobre las teorías que se han hecho de los fenómenos osmóticos. La cuestión se ha presentado bajo un aspecto nuevo y ha tomado un interés capital gracias al empleo de membranas llamadas semipermeables y a la noción de presión osmótica.

Membranas semipermeables

Es posible confeccionar membranas que gocen de la propiedad notable de no dejarse atravesar más que por el agua y en manera alguna por los cuerpos en disolución en esta agua. Añadamos, no obstante, que esta impermeabilidad para los cuerpos disueltos no es absoluta, sino para algunos de ellos; para otros, solamente cuando la solución no es excesivamente concentrada; para otros, por último, pasa siempre un poco de cuerpo a través de la membrana. Pero lo importante es que se puedan encontrar cuerpos que no pasando del todo permitan hacer experiencias perfectas.

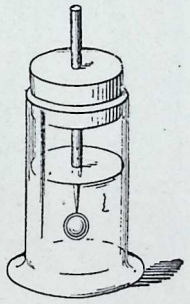


Fig. 210

Para obtener estas membranas, se ponen en presencia dos soluciones que den un precipitado. Traube, tomando con el extremo de una varilla de vidrio una solución de cola, la sumergía (fig. 210) en una solución de tanino. Se formaba en la superficie de separación de los dos líquidos una película de tanato de gelatina transparente, y se tenía una especie de célula que sumergida en el agua, aumentaba de volumen por paso del agua de fuera adentro, pero a través de la cual el tanino no pasaba.

Para obtener en mejores condiciones un aparato dotado de una membrana semipermeable que permita estudiar los cam-

bios entre dos soluciones, he aquí cómo se opera actualmente según las indicaciones de Pfeffer.

Se toma un vaso de pila de pasta fina, que se lava convenientemente, primero con álcalis, después con el ácido clorhídrico diluído. Hecho esto, se le imbibe cuidadosamente de agua destilada, de manera que se expulse todo el aire que pueda contener; por último, se vierte en el interior del vaso una solución de sulfato de cobre, y se le sumerge exteriormente en una solución de ferrocianuro de potasio. Las dos sales van al encuentro una de la otra a través de la pared del vaso, se ponen en contacto en su espesor, y forman allí una membrana de precipitado de ferrocianuro de cobre. Hecho esto, se le pone al vaso de pila una guarnición que permita cerrarlo y ponerlo en comunicación con un manómetro (fig. 211).

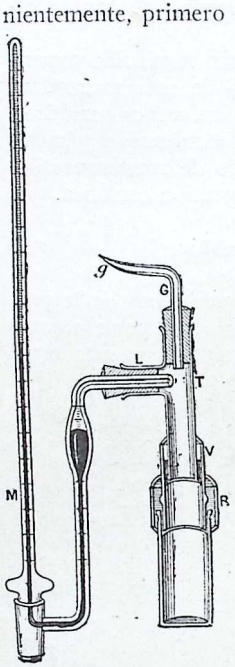


Fig. 211

Presión osmótica

Cuando se coloca en el interior del aparato de Pfeffer una solución de azúcar de una concentración inferior al 5 por 100, y se la sumerge en el agua, no pasa azúcar a través de la membrana semipermeable, pero el agua difunde del exterior hacia el interior haciendo subir la presión hasta un momento en que se establece el equilibrio. Esta presión es la presión osmótica.

He aquí ahora las notables leyes a que se sujeta esta presión osmótica límite.

1.ª Haciendo variar el título de las soluciones, la presión osmótica es proporcional a la concentración.

2.ª Para una misma solución, cuando varía la temperatura, la presión osmótica crece proporcionalmente al binomio de dilatación $(1 + \alpha\, t)$; veremos más adelante cuál es el valor de α.

3.ª La presión osmótica es la misma cuando se cambia la materia disuelta, con tal que el número de moléculas disueltas permanezca el mismo.

4.ª La presión osmótica es independiente de la naturaleza del disolvente.

Cuando se examinan estas leyes sorprende su analogía con las leyes que regulan la presión de los gases.

Tenemos, en efecto:

1.º La ley de Mariotte, que nos dice que la presión de un gas está en razón inversa de su volumen, o, lo que es lo mismo, que la presión o volumen constante es proporcional a la densidad del gas, lo que equivale a la concentración de una solución. En efecto, las dos dependen del peso del gas o de substancia que se encuentran en un volumen dado.

2.º La ley de Ampère, según la que a volumen constante la presión del gas crece como el binomio de dilatación $(1 + \alpha\, t)$ en donde α es igual a $\frac{1}{273}$. Esta misma ley se vuelve a encontrar para la presión osmótica, y, hecho notable, α tiene el mismo valor en los dos casos.

3.º La ley de Avogadro, según la que, todo gas contenido en un cierto volumen, ejerce la misma presión cualquiera que sea la naturaleza del gas, con tal que el número de moléculas sea el mismo. Es la tercera ley de la osmosis, y lo que es de notar es que esta presión gaseosa ejercida por un cierto número de moléculas es la misma que la presión osmótica ejercida por el mismo número de moléculas disueltas en el agua, si el volumen de agua es el mismo que el volumen gaseoso.

En resumen, la presión osmótica es absolutamente asimilable a la presión de los gases; los cuerpos en solución se conducen como si estuviesen transformados en gas en el mismo volumen, siendo reemplazada la presión osmótica por la presión gaseosa.

El paralelo va más lejos. Sabido es que las leyes deMariotte y de Ampère no son exactas más que para los gases alejados de su punto de licuefacción, es decir, que no contengan un excesivo número de moléculas en un volumen dado; cuanto más se aproxima a este punto de licuefacción, con tanta menos

precisión se aplican las leyes. Lo mismo ocurre para la presión osmótica. En cuanto se quiere operar con soluciones demasiado concentradas, fallan las leyes que hemos enunciado.

Por último, sabido es que ciertos vapores han parecido, durante mucho tiempo, estar en contradicción con las leyes de Avogadro, en particular los vapores de clorhidrato amónico, de pentacloruro de fósforo, de hidrato de cloral, etc. Cuando estos vapores tienen en un volumen dado las mismas moléculas que un gas, el oxígeno, por ejemplo, ejercen una presión mayor que la que indicaría la regla. Se ha demostrado después que esto no es debido a una excepción a la ley, sino a que estos vapores se disocian y el volumen contiene, en consecuencia, mayor número de moléculas que parece.

Lo mismo ocurre para la mayor parte de las sales en solución: se disocian, o, como antes hemos dicho, se ionizan más o menos, según el grado de concentración de la solución, completamente si esta solución es bastante diluída; y resulta que el líquido contiene mayor número de moléculas que parece *a priori;* tiene una mayor presión osmótica. Tomemos, por ejemplo el cloruro de sodio: si está en solución muy diluída, está completamente disociado, cada molécula da dos, y la presión osmótica es doble de la que se podría prever no contando con esta disociación.

Puesto que la presión osmótica no depende más que del número de moléculas en disolución, se concibe que hay aquí un medio de determinar el grado de concentración de una solución, comparando su presión osmótica con la de una solución conocida; pero este procedimiento exigiría una experimentación delicada. Además, necesitaría una gran cantidad de líquido y mucho tiempo; veremos más adelante otros procedimientos que conducen rápidamente al mismo resultado.

Isotonía

En el aparato de Pfeffer, se puede colocar una solución salina a cada lado de la membrana semipermeable y pueden ocurrir tres casos;

1.º El nivel se eleva en el tubo; esto prueba que pasa agua del exterior al interior, la solución interior es más concentrada que la solución exterior.

2.º El nivel desciende en el tubo por debajo del nivel exterior; es que la solución exterior es la más concentrada.

3.º El nivel es el mismo en el exterior que en el interior; la concentración es la misma a los dos lados de la membrana. Si es la misma sal la que se encuentra en las dos soluciones, no hay ninguna dificultad, las dos soluciones son idénticas, contienen por litro la misma cantidad de sal. Si se trata de sales o de cuerpos diferentes, decir que las dos soluciones tienen la misma concentración quiere decir que contienen, en igualdad de volumen, el mismo número de moléculas, según la tercera ley del capítulo precedente, porque en este caso es cuando tienen la misma presión osmótica; ninguna de ellas debe sobrepasar a la otra.

Dos soluciones que contengan el mismo número de moléculas se llaman isotónicas. De dos soluciones que no contengan el mismo número de moléculas, la más concentrada se denomina hipertónica con relación a la otra, que se llama hipotónica. Claro está que en esta concentración molecular hay que tener en cuenta la disociación o ionización que puede producirse como antes hemos visto.

Número de moléculas y concentración molecular

Hay que insistir sobre esas dos expresiones empleadas con frecuencia, con el fin de puntualizarlas bien y demostrar cómo se ha llegado a estas consideraciones.

Partamos de la ley de Avogadro, que dice que en un mismo volumen de gas o de vapor, a la misma temperatura y a la misma presión, hay el mismo número de moléculas. No hay necesidad de demostrar cómo se ha establecido esta ley; nos bastará admitirla.

Si tomamos un mismo volumen de hidrógeno, de oxígeno, de cloro, de vapor de azufre, de anhídrido carbónico, etc., estos volúmenes contendrán el mismo número de moléculas. Ahora bien; si tomamos el peso de este volumen de hidrógeno

como = 2, encontramos para los pesos de un mismo volumen gaseoso de los otros cuerpos:

Hidrógeno	2
Oxígeno	32
Cloro	71
Azufre	64
Anhídrido carbónico	44
Etc.	

Lo que equivale a decir, puesto que cada uno de estos volúmenes tiene el mismo número de moléculas, que si la molécula del hidrógeno pesa 2, las otras pesan respectivamente: 32, 71, 64, 44, etc.

Lo mismo ocurre con todos los cuerpos, ya se encuentren o no en el estado gaseoso; el número que se da como representando su peso molecular indica el peso de su molécula con relación a la del hidrógeno tomada como igual a 2. Si, por ejemplo, se dice que el peso molecular de la glucosa es 180, se quiere decir que su molécula pesa 90 veces más que la del hidrógeno. Resulta, pues, que tomando un peso de 180 de glucosa, se tienen tantas moléculas como tomando 2 de hidrógeno, 32 de oxígeno, etc.

En la práctica, para realizar pesadas, hay que adoptar una unidad práctica; se ha tomado el gramo. Se denomina molécula gramo de hidrógeno, a 2 gr. de hidrógeno. Una molécula gramo de oxígeno será 32 gr. de oxígeno, etc., una molécula gramo de glucosa será 180 gr. de glucosa.

Por convención, si se hace disolver una molécula gramo de un cuerpo en un litro de disolvente, se tiene la solución llamada *normal*. Así, la solución normal de glucosa contiene 180 gr. de glucosa por litro; la solución normal de cloruro de sodio, 58 gr. de sal, y así sucesivamente.

Estas soluciones son, en general, demasiado concentradas para los usos de la práctica; se utilizan entonces soluciones *decinormales*, que contienen una molécula decigramo por litro. Las soluciones 100 veces menos concentradas que la solución normal se llaman *centinormales*, y las que son 1000 veces menos concentradas, *milinormales*, etc.

Y vuelvo sobre un punto capital. Las soluciones de glucosa

no se disocian, y lo mismo ocurre con el alcohol, la glicerina y otros diversos cuerpos. Las soluciones normales de estos cuerpos contienen, pues, el mismo número de moléculas.

No ocurre lo mismo con un gran número de sales que se disocian más o menos, según el estado de concentración de su solución.

Tomemos como tipo el cloruro de sodio NaCl, hagamos una solución normal de esta sal. Esta solución contendrá moléculas de NaCl, pero una parte de estas moléculas se dividirá en lo que hemos denominado Iones Na y Iones Cl. Cada molécula disociada o ionizada se conducirá entonces como dos moléculas. Todo ocurre desde el punto de vista osmótico, y desde otros punto de vista que estudiaremos, como si se hubiese disuelto más de una molécula del cuerpo.

Esta disociación es proporcionalmente tanto más importante cuanto más diluída está la solución. Así, para las soluciones decinormales, que se aproximan, por su concentración, a los líquidos del organismo, la experiencia demuestra que 50 por 100 aproximadamente del NaCl está ionizado. Para las soluciones centinormales, 80 por 100. Para las milinormales, prácticamente hay ionización completa y la solución parece contener dos veces más moléculas que las que se han introducido. Poniendo 58 gr. de NaCl en un metro cúbico de agua, se tiene una solución cuya presión osmótica será doble de la que contiene 180 gr. de glucosa.

Hagamos notar también que una sal que tenga una fórmula análoga a la del cloruro de calcio, por ejemplo, $CaCl^2$, dará, por ionización, Ca y 2Cl, es decir, 3 iones, — K^3PO^4 da 4 iones, 3K y PO^4.

Una solución normal, decinormal, centinormal o milinormal, se conducirá, pues, diferentemente, según el cuerpo en solución. Tomemos 10 l. de agua y pongamos en ella una molécula de glucosa, de NaCl, de $CaCl^2$ o de K^3PO^4, como la mitad del cuerpo se ioniza, según lo que antes hemos dicho, el número aparente de moléculas en la solución, será:

Para la glucosa . . . . . 1.

» $NaCl\ \frac{1}{2}+\frac{1}{2}\times 2 = 1{,}5$

» $CaCl^2\ \frac{1}{2}+\frac{1}{2}\times 3 = 2.$

» $K^3PO^4\ \frac{1}{2}+\frac{1}{2}\times 4 = 2{,}5.$

Por no tener en cuenta este hecho se pueden cometer graves errores.

Investigaciones de la isotonía por el método de De Vries

Las células vegetales están provistas exteriormente de una cubierta rígida, la membrana celular, tapizada interiormente por la membrana limitante del cuerpo celular o membrana plásmica. Esta última es semipermeable como la membrana de ferrocianuro de cobre del aparato de Pfeffer, desempeñando la membrana celular el papel de sostén como el vaso de pila poroso. Si semejante célula se coloca en una solución acuosa muy diluída, el agua tiende a penetrar en su interior, la membrana plásmica, hinchada, se aplica contra la membrana celular (fig. 212 *A*). Por el contrario, si la solución acuosa es muy concentrada, una parte del agua de la célula tiende a pasar al exterior, hay disminución de volumen, la membrana plásmica tiende a separarse de la membrana celular (fig. 212 *C*). Existe un cierto grado de concentración molecular de la solución en que no hay cambio de agua con la célula (fig. 212 *B*). Para encontrarlo, se preparan una serie de soluciones de una sal, de concentraciones diversas, pero regularmente crecientes. En cada una de ellas se coloca un pequeño fragmento del vegetal que se emplee, y se investiga, al microscopio, al cabo de hora y media, por ejemplo, cuál es la solución en la que comienza a realizarse la separación de las dos membranas; esta solución es ya un poco concentrada, la isotonía se encuentra entre ella y la solución inferior. La separación de las dos membranas lleva el nombre de plasmolisis (fig. 212 *B*).

Para estas experiencias pueden servir diversos vegetales, siendo uno de los más cómodos el *Tradescantio discolor*, en el que se practicarán pequeños y finos cortes fáciles de observar al microscopio.

Operando con diversas substancias, se puede así encontrar cuáles son las soluciones isotónicas con el contenido celular y, por consiguiente, isotónicas entre sí. De Vries ha encontrado de este modo que las soluciones isotónicas entre sí tienen la misma concentración molecular.

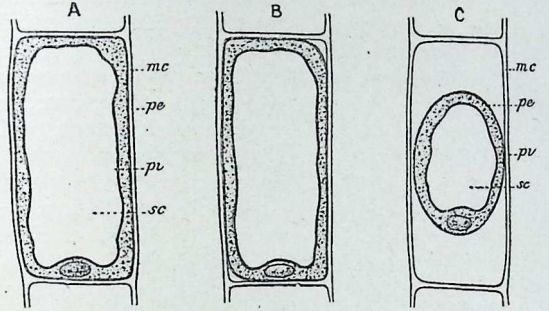


Fig. 212

Investigaciones de la isotonía por el método de Hamburger

Hamburger ha realizado investigaciones análogas a las de De Vries, pero empleaba como indicador glóbulos sanguíneos que no permanecen inalterados más que en soluciones isotónicas con el suero sanguíneo. Es preciso, claro está, hacer esta observación al microscopio. Se puede, operando con diversas sales, encontrar cuáles son las concentraciones isotónicas entre sí, y se ve también que son las que contienen el mismo número de moléculas. En estas experiencias se observa también otro fenómeno, además de la deformación de los glóbulos: es el paso de la materia colorante de los glóbulos al líquido que los baña. Este fenómeno, denominado hematolisis (o mejor, hemolisis) no se produce más que con so-

luciones bastante menos concentradas que las soluciones isotónicas con el suero sanguíneo. Así, si se opera sobre glóbulos de sangre de rana, es necesaria una solución de 0,21 por 100 aproximadamente para hacer aparecer la materia colorante en el líquido, mientras que la solución isotónica con el suero sanguíneo es 0'64 por 100. Existe en estas experiencias una causa de error que puede hacer variar el título de la solución para el que se produce la hematolisis: es la no esterilidad del líquido. Vaquez ha demostrado que aquí radica una condición indispensable para una buena experiencia: la materia colorante no aparece en una solución demasiado concentrada, si esta solución está hecha en condiciones de asepsia perfecta. Basta para ello preparar una solución madre concentrada, que se esteriliza en el autoclave, después, con agua destilada hervida, se preparan una serie de soluciones de diferente título gradualmente variable. En cada una de estas soluciones se coloca una o dos gotas de sangre desfibrinada y se busca cuál es, descendiendo la escala de las concentraciones, la primera de las soluciones que produce la hematolisis. Sobre este fenómeno se ha fundado un procedimiento destinado a investigar la resistencia de los glóbulos sanguíneos en diversos estados patológicos; pero, es preciso repetirlo, la hematolisis no se produce, como ciertos autores han dicho erróneamente, por un líquido de concentración molecular inmediatamente inferior al del suero saguíneo.

XIX. — **Tonometría**

Los cuerpos disueltos en el agua o en los otros líquidos modifican la tensión del vapor de estos líquidos y, por consiguiente, su punto de ebullición.

En particular, si se consideran las soluciones acuosas, las únicas que tienen, en suma, interés en biología y las solas de que nos ocuparemos en lo sucesivo, se encuentra que el descenso de la tensión del vapor es proporcional al número de moléculas del cuerpo en un mismo volumen del disolvente. Sobre este principio se puede fundar un procedimiento para determinar la concentración molecular de un líquido, ya midiendo directamente su tensión de vapor, ya buscando el punto de ebullición bajo una presión barométrica dada. Pero estos procedimientos son delicados y poco exactos; no se usan en la práctica.

XX. — **Crioscopia**

Así como la presencia de un cuerpo en solución en el agua hace descender la tensión del vapor, hace descender también el punto de congelación. El descenso del punto de congelación es proporcional al número de moléculas disueltas en un volumen de agua. Por consiguiente, haciendo descender la temperatura de una solución acuosa y observando la temperatura a que comienza a formarse el hielo, podemos determinar la concentración molecular de un líquido, como se puede hacer para el estudio de la presión osmótica o de la tensión del vapor. Este procedimiento de investigación es muy práctico y se emplea de manera corriente en biología; vamos a describirlo con algunos detalles e insistir sobre las precauciones que hay que tomar.

En primer lugar, hay un hecho que es importante conocer: cuando una solución se congela, el hielo formado es agua pura solidificada, los cuerpos en solución quedan en el líquido que se concentra cada vez más. Puede ocurrir, cuando se tiene una solución excesivamente concentrada, que cuando se enfría, una parte del cuerpo disuelto se separa en estado sólido y se mezcla mecánicamente con el hielo, o también que una parte de la solución quede aprisionada entre las laminillas de hielo; pero este hielo, en sí mismo, separado del líquido en que se baña o de los cuerpos sólidos depositados, da agua pura como el vapor de agua destilada.

Si se toma una solución más o menos diluída y se procede a su congelación, a medida que se forma el hielo, la concentración molecular del líquido que queda aumentará y el punto de congelación descenderá cada vez más. Es, pues, preciso para tener rigurosamente el punto de congelación de una solución, observar la temperatura en el momento en que aparecen los primeros cristales de hielo. De lo contrario, se mide el punto de congelación de lo que queda en estado líquido.

Es importante enfriar suavemente, con lentitud, agitando sin cesar la mezcla y observando el momento en que los cristales de hielo comienzan a aparecer.

Puede ser motivo de dificultad lo que se denomina fenómeno de la sobrefusión. Supongamos que se enfría agua; regularmente, debería congelar a 0°; pero en un tubo de cristal limpio puede descender la temperatura muchos grados por debajo de 0 sin congelarse. Si en este momento se forma un poco de hielo en un punto, la congelación se extiende a una masa más o menos grande de líquido y la temperatura sube a 0. Si operamos lo mismo con una solución salina, se presentará el mismo fenómeno: se formará de repente tanto más hielo cuanto más haya descendido la temperatura. En este momento, el termómetro subirá, no al punto de congelación de la solución primitiva, sino al punto de solidificación de lo que reste de la solución después de formarse el hielo. Tendremos así una temperatura demasiado baja.

Como la sobrefusión cesa tan pronto como aparece una parcela de hielo en un punto de la solución enfriada, bastará para cebar la formación del hielo introducir en el líquido cuya temperatura es un poco más baja que el punto de congelación una varilla de cristal que lleve en su extremo un poco de hielo.

He aquí ahora la manera más sencilla de operar en la práctica. Ante todo, es indispensable tener un excelente termómetro de mercurio, dividido en $\frac{1}{50}$ de grado, lo que permite leer la centésima, y del que se comprueba de vez en cuando la posición del 0 sumergiéndolo en hielo en fusión. Un desplazamiento de este cero, accidente frecuente, se comprende que daría lugar a los más funestos errores. El líquido que se desea estudiar se colocará en un tubo de ensayo, en donde se introducirá también el termómetro *th* y un agitador *a* (figura 213). No hay que tomar un agitador ordinario de cristal que, entre otros inconvenientes propios de su masa, se cuenta el de romper con facilidad, al menor choque, el fino reservorio del termómetro. Un fino y pequeño tallo metálico cumple bien su cometido. El pequeño tubo de ensayo está fijo en un vaso en el que se colocará la mezcla refrigerante destinada a

hacer descender la temperatura del líquido. Se agitará sin cesar y, en el momento en que la temperatura haya bajado aproximadamente un medio grado por debajo del punto crioscópico presumido, se sumergirá en el líquido una parcela de hielo que hará cesar la sobrefusión. Inmediatamente se formarán pequeñas agujas de hielo en el líquido, el termómetro remontará a un punto en que permanecerá fijo durante cierto tiempo; este punto es el que hay que leer.

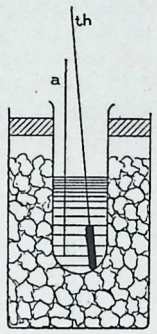


Fig. 213

El pequeño fragmento de hielo destinado a hacer cesar la sobrefusión es fácil de obtenerlo; en efecto, sobre la superficie exterior del vaso que contiene la mezcla frigorífica, se ve aparecer rápidamente una capa de escarcha. Basta, en el momento deseado, pasar la punta del agitador *a* sobre esta superficie, para arrastrar un pequeño cristal, introduciéndolo con el agitador en el líquido cesa la sobrefusión.

Hemos dicho que era preciso enfriar suavemente para permitir que a cada momento tenga lugar el equilibrio de temperatura. La mezcla de hielo y de sal marina es un refrigerante un poco demasiado enérgico, en manos poco ejercitadas conduce fácilmente a puntos crioscópicos excesivamente bajos. Pueden utilizarse con ventaja las mezclas siguientes:

Hielo y alumbre dan.	10°,47
» sulfato sódico crist	10°,70
» cromato potásico	11°,00
» sulfato potásico.	11°,50
» sulfato ferroso.	12°,00
» nitrato potásico.	13°,00

Se elegirá una mezcla que haga bajar la temperatura un poco por debajo del punto crioscópico presumido.

Se puede también, utilizando el hielo y la sal marina, hacer más lento el enfriamiento, dotando el tubo de ensayo de una doble cubierta con camisa de aire mal conductor (fig. 214). Se tiene entonces el aparato de Beckmann. A con-

secuencia del aire interpuesto entre el líquido y la mezcla frigorífica, el enfriamiento se hace muy lentamente. El tapón que lleva el termómetro debe estar dotado de otras dos aberturas: una, que permite arrojar un pequeño cristal de hielo en la solución para hacer cesar la sobrefusión en el momento deseado; la otra, para el paso del vástago de un agitador de anillo que se hace subir y bajar para asegurar la mezcla y uniformidad de temperaturas en el líquido.

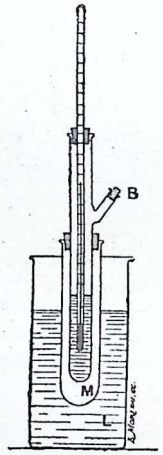


Fig. 214

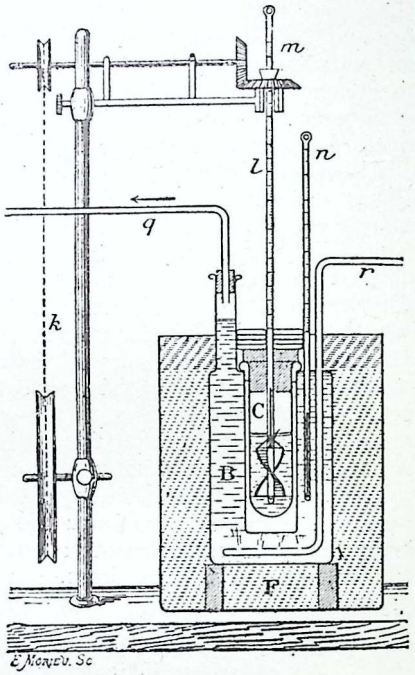


Fig. 215

Este aparato, muy sencillo, da excelentes resultados.

Se puede, por último, si se desean practicar investigaciones muy exactas, emplear el crioscopio de precisión de Raoult (fig. 215) dotado de un agitador rotatorio que asegura una mezcla perfecta y en el que el descenso de temperatura se regula admirablemente por la evaporación de éter. Es conveniente realizar cada vez dos determinaciones: una, para saber

aproximadamente el punto de congelación; la segunda, mejor regulada, en la que se baja lentamente la temperatura un poco por debajo de este punto para el punto crioscópico con formación de muy poco hielo, y, por consiguiente, sin variación de concentración del líquido restante.

Si consideramos una solución de un cuerpo, no disociado en esta solución, que contenga una molécula gramo por litro, apreciamos un descenso del punto de congelación de — 1°,85. Recíprocamente, si apreciamos que una solución acuosa se congela a — 1°,85 podemos decir que contiene una molécula gramo por litro, no estando disociada esta molécula. Si, por el contrario, la molécula se disocia, el punto de congelación desciende, y no volverá a ser — 1°,85 más que si el número total de moléculas y de iones es equivalente a una sola molécula. Supongamos, por ejemplo, que una sal en solución pueda disociarse completamente de manera que cada una de sus moléculas produzca dos; cuando el punto de congelación sea — 1°,85, no habrá, en realidad, en disolución más que media molécula de sal por litro.

Este principio nos permite, pues, calcular, dado un punto de congelación, cuántas moléculas gramos contiene la solución.

Ejemplo. — El suero sanguíneo se congela a — 0°,55, ¿cuál es su concentración molecular?

Será $\frac{0,55}{1,85} = 0,292$, puesto que la concentración molecular es proporcional al descenso del punto de congelación. La solución contiene, pues, una serie de cuerpos, disociados en parte o no, pero de los que la suma de partículas libres es equivalente a 0 mol. 292. Por este procedimiento se puede determinar, por diferencia, el número de moléculas orgánicas o inorgánicas de una solución.

Ejemplo. — Un suero sanguíneo da un descenso del punto de congelación de 0°,595. Contiene, por lo tanto, $\frac{0,595}{1,85} = 0$ moléculas 321 por litro. Se evapora, se incinera de manera que se destruyan las materias orgánicas y se redisuelve el residuo en el agua para que tenga el volumen primitivo. El punto de congelación es — 0,480; hay, pues, $\frac{0,480}{1,85} = 0$ mol. 259 por

litro; es la parte inorgánica. La parte orgánica será la diferencia entre 0 mol. 259 y 0 mol. 321, o sea: 0 mol. 062.

Este procedimiento permite también determinar fácilmente cuál es la cantidad de agua que ha podido ser añadida a un líquido.

Ejemplo. — El punto de congelación de la leche es — 0°,55; debe, pues, contener 0 mol. 292 por litro. Si el punto de congelación de una leche es — 0°,48, no contiene más que 0 mol. 259 por litro; se ha añadido, por lo tanto, agua en la siguiente proporción: Con un litro de leche se ha hecho $\frac{0,292}{0,259}$ = 1 l. 12 de líquido.

Se puede por este procedimiento también determinar muy fácilmente la concentración molecular de la orina y seguir la marcha de la eliminación de los productos disueltos en esta orina.

XXI. — **Filtración**

La filtración de los líquidos tiene por objeto desembarazarlos de las partículas sólidas que tienen en suspensión; para esto se les hace pasar a través de una substancia porosa que retendrá las partículas tanto más pequeñas cuanto más finos sean sus orificios. No hay que creer, no obstante, que un filtro obra sencillamente como una coladera sobre la que quedan los cuerpos de dimensiones mayores que los orificios, mientras que los cuerpos más pequeños pasan al través. Las paredes del filtro ejercen, en efecto, una atracción sobre las partículas en suspensión en los líquidos, y se ve a ciertos precipitados no pasar con el líquido que atraviesa un cuerpo poroso, aún cuando los poros sean ciertamente más grandes que los elementos del precipitado.

En los laboratorios se utilizan generalmente filtros de papel de grano más o menos apretado, según el fin que se proponga. Algunas veces, también se emplean tejidos, franela o fieltro. Estos mismos cuerpos se emplean en la industria para la clasificación de los vinos, de la cerveza o de los jarabes.

Cuando se trata de desembarazar el agua de los micro-

organismos que pueda contener, no bastan las substancias precedentes; es necesario el empleo de filtros de grano más apretado. Durante mucho tiempo se han utilizado las fuentes filtrantes consistentes en una caja (fig. 216) de dos comparti-

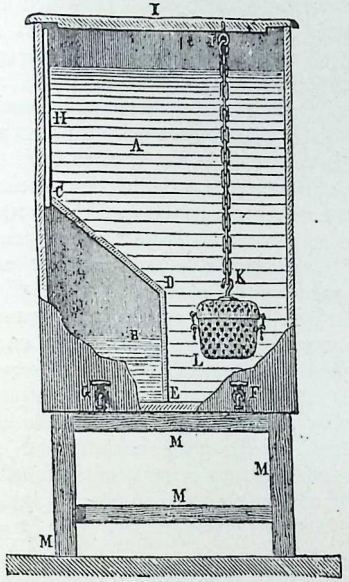


Fig. 216

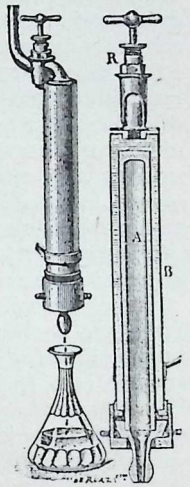


Fig. 217

mientos. Se vertía el agua que se quería filtrar en la parte *A*, poco a poco pasaba a *B*, a través de una pared de piedra porosa, y se la extraía por una espita *G*. Cuando la piedra estaba sucia y no dejaba pasar el agua más que con dificultad, a consecuencia de un depósito muy abundante en su superficie, se la limpiaba con un cepillo, se la lavaba en abundancia y se sacaba el agua sucia por *F*. Muchas veces se suspendía en *A* por medio de una cadena, un cesto de hierro que contenía carbón de madera destinado a impedir la putrefacción del agua en *A*.

En nuestros días, el agua se conduce y distribuye en nuestros domicilios por medio de cañerías y, unidos a éstas, se colocan directamente los filtros. Uno de los más generalizados es el filtro Chamberland (fig. 217), que consiste en una bujía hueca de porcelana porosa, colocada en un tubo en comunicación con la cañería. El agua llega bajo presión al exterior de la bujía, pasa a través de la pared y se derrama a medida que se necesita. Siendo la filtración bastante lenta, es necesario recoger el agua purificada en un reservorio limpio con el fin de hacer provisión de ella. Existen aparatos provistos de un número mayor o menor de bujías y, claro está, el rendimiento aumenta con este número. Las bujías se ensucian como la piedra de los antiguos filtros, por lo que el aparato se desmonta con facilidad para hacer la limpieza; pero, además, es muy conveniente hacer hervir la bujía de vez en cuando, cada ocho días, por ejemplo, para esterilizarla. En efecto, los microorganismos pueden, por cultivo, propagarse paso a paso a través de la pared de la bujía, y es preciso, con bastante frecuencia, proceder a la destrucción de estos cultivos.

En el comercio se encuentran un gran número de otros filtros que no hay sitio para describir aquí; únicamente el estudio particular de cada uno de ellos puede informar sobre su valor, pero, en general, deben, en una primera experiencia, desembarazar el agua de los microorganismos, lo que revelará un análisis bacteriológico y, además, deben ser fáciles de limpiar y de esterilizar.

Ciertas poblaciones, para evitar la filtración a domicilio, se alimentan con aguas purificadas en gran escala por su paso a través de terrenos especialmente preparados. Con este fin, sobre una superficie convenientemente drenada y canalizada, se extiende en primer lugar una capa de grava o de piedras groseramente rotas. Después grava cada vez más fina para acabar por arena. El agua se conduce encima de la arena. Al principio, la filtración se hace con bastante rapidez; depende, en igualdad de circunstancias, de la presión, es decir, de la altura del plano de agua, que se regula de manera apropiada para hacer pasar un volumen de agua determinado. Desde este punto de vista, la experiencia ha demostrado que rinde 4 m.^{3} por metro cuadrado en un día, se encuentra en buenas condiciones. Claro está que una velocidad menor no perjudica, si se pasa mucho de esta cifra, se corre el riesgo de no filtrar sino imperfectamente. Al cabo de cierto tiempo, el filtro se obstruye cada vez más; llega un momento en que un aumento de presión no basta para hacerlo funcionar convenientemente, es necesario limpiarlo. La duración de un filtro varía, claro está, según el estado de las aguas que hay que purificar; hay poblaciones en que la limpieza es necesaria dos veces al mes.

Algunas veces, en lugar de filtrar pura y sencillamente el agua, se comienza por esterilizarla químicamente. Uno de los procedimientos más generalizados y que da excelentes resultados, consiste en añadir al agua permanganato cálcico o de potásico hasta el momento en que el agua conserve un tinte rosa permanente. En este momento se filtra sobre carbón de madera, que desembaraza el agua del permanganato en exceso que absorbe y retiene al mismo tiempo que el óxido de manganeso precipitado. De esta manera se tiene un agua perfectamente pura; es uno de los procedimientos más recomendables por sus resultados y por lo fácil que es emplearlo en todas partes.

Se emplean otros medios para la purificación química de las aguas en gran escala, antes de la filtración, pero no podemos insistir en ello.

TERCERA PARTE

CALOR

I. — Termometría

La unidad de variación de calor adoptada en Francia es el grado centígrado.

El intervalo que existe entre la temperatura del hielo en fusión y la del vapor de agua hirviendo a la presión de 760 mm., ha sido dividido en 100 partes, de las que cada una constituye 1 grado. El origen de las medidas está en la temperatura del hielo en fusión, es el cero, de donde resulta que el agua hierve a 100 grados bajo la presión de 760 mm.

Es cuestión convencional; en ciertos países o en ciertas industrias se utiliza todavía la escala Réaumur, en la que el intervalo entre la temperatura del hielo en fusión y la del vapor de agua hirviendo está dividido en 80 partes. Por último, en los países de lengua inglesa se hace uso de la escala Fahrenheit, en la que la temperatura del hielo en fusión es 32° y la del vapor de agua a 760 mm. 212°; es decir, que en este sistema se eleva 212 — 32 = 180°, pasando de la temperatura del hielo en fusión a la del vapor de agua hirviendo.

El empleo de operaciones aritméticas sencillas, indicadas por lo demás en todos los libros elementales, permiten pasar de un sistema a otro; con todo, en lo que sigue no nos ocuparemos más que de la escala centígrada.

Resulta de consideraciones que no pueden encontrar aquí lugar, que el único termómetro que da realmente la temperatura definida por la escala centígrada es el termómetro de

hidrógeno de volumen constante. Es decir, que se encierra en un recipiente análogo al de la figura 218, cierta cantidad de hidrógeno aislado de la atmósfera por una columna de mercurio. Se lleva este globo al hielo en fusión y se nota la presión correspondiente a un volumen determinado. Después se nota el aumento de presión que hay que ejercer para conservar el volumen constante cuando se pasa al vapor de agua hirviendo a 760 mm. La centésima parte de esta variación de presión corresponde a un grado centígrado y si en condiciones determinadas de variación de temperatura es preciso ejercer $\frac{25}{100}$ por ejemplo, de esta presión, para conservar constante el volumen de hidrógeno, se dice que se está a la temperatura de 25°, centígrados.

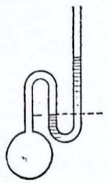


Fig. 218

Este aparato es de un manejo difícil, y en la práctica se utilizan generalmente termómetros de mercurio o de alcohol, en donde se leen variaciones de volumen en lugar de leer variaciones de presión. Estos instrumentos deberán estar graduados con cuidado por comparación con el termómetro de hidrógeno. Los termómetros de alcohol deben rechazarse para las mediciones exactas; la dilatación del alcohol sigue una ley completamente diferente que la del mercurio, y si dos instrumentos, uno de alcohol y otro de mercurio, concuerdan a cero y a 50 grados, por ejemplo, pueden, no obstante, entre estos dos límites dar indicaciones completamente diferentes.

De la misma manera, si nos limitáramos a llevar un termómetro de mercurio al hielo en fusión, y después al vapor de agua hirviendo y a dividir el intervalo así marcado en el tallo en 100 partes, se tendrá un instrumento exacto a 0 y a 100°, pero que en el intervalo no concordaría con el termómetro de hidrógeno. Por este motivo, hay que graduar estos instrumentos por comparación, comprobando los puntos intermedios, cuando se quieren tener indicaciones verdaderamente exactas. En general, esto es negocio del fabricante, y existen casas conocidas por no entregar más que excelentes termómetros. Se puede, en lugar de servirse del termómetro de hidrógeno, como

instrumento de comparación, emplear un termómetro de mercurio de muy buena calidad, llamado patrón, comprobado de una vez para siempre y con el que se compararán fácilmente todos los instrumentos de uso corriente. De todos modos, hay una comprobación que es preciso siempre poder hacer por sí mismos: es la de la constancia del cero. Aún en los mejores instrumentos, ocurre con el tiempo que el cero de los termómetros se desplaza, es decir, que la parte alta de la columna de mercurio no se encuentra frente al cero de la graduación; todas las lecturas están en tal caso plagadas del mismo error. Se está en las mismas condiciones que aquellas en que se encuentra uno para la determinación del tiempo con un reloj que adelante o retrasa, es preciso conocer el avance o retardo. Para determinar el desplazamiento del cero de un termómetro, basta sumergirlo en hielo en fusión finamente pulverizado; debe haber gran cantidad, de modo que el termómetro sumergido en medio esté completamente substraído a la acción de la radiación exterior. Al cabo de algún tiempo, cuando se aprecia que el termómetro permanece fijo, se lee y se tiene su avance o retraso. Es raro tener un instrumento que no presente este pequeño defecto que, como se ve, es fácil de remediar.

Los termómetros médicos deben estar graduados en décimas de grado y ser de máxima, es decir, que la columna no debe nunca bajar espontáneamente; es empujada hacia los altos valores de la escala en el momento de la elevación de temperatura, y debe quedar allí fija cuando se retira el instrumento para leerlo. Un ligero choque hace descender la columna cuando se desee hacer una nueva experiencia.

Es bueno hacer comprobar estos termómetros médicos; sin embargo, los instrumentos entregados al comercio por los constructores conocidos son generalmente de calidad aceptable, aparte, claro está, del desplazamiento del cero. Cuando se trata de medidas más delicadas, como las que se han introducido después del empleo de la crioscopia, no se pueden usar más que los termómetros especiales construídos con este fin, que indican, por lo menos $\frac{1}{50}$ de grado y llevan la marca de determinadas casas.

Temperaturas absolutas. — Consideraciones diversas han hecho introducir en la ciencia otro cero que el del hielo en fusión, sin que en nada se cambie el valor del grado. En la escala centígrada, este cero se encuentra a 273° por encima de la temperatura del hielo en fusión; es preciso, pues, añadir sencillamente 273° al valor de las temperaturas centígradas para tener las temperaturas absolutas. Así, en temperaturas absolutas, el hielo funde a 273°, el agua hierve a 373°, etc.

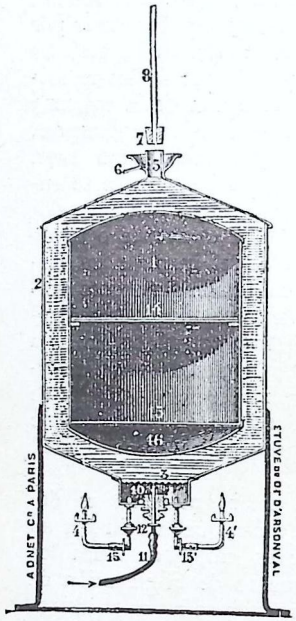


Fig. 219

II. — Estufas

Las estufas empleadas en medicina y en las ciencias biológicas son de temperatura constante, es decir, que están dotadas de un mecanismo regulador destinado a impedir que la temperatura se eleve o descienda por debajo de cierto grado.

Las estufas más generalizadas en los laboratorios son las de d'Arsonval, de Pasteur y de Wiesnegg.

La estufa de d'Arsonval se compone de un cilindro de cobre (fig. 219) cerrado en la parte superior e inferior por dos conos de poca altura. Esta cubierta contiene una cámara y entre las dos paredes se encuentra una capa de agua. El gas que sirve para calentar esta agua, llega primero a un depósito colocado en la parte inferior del aparato por un tubo que viene a terminarse en las inmediaciones del techo de esta cámara, constituído por una lámina elástica sobre la que reposa el agua del depósito. Después, el gas va a los mecheros. Estando el aparato lleno de agua, se encienden los mecheros, y cuando se ha alcanzado la temperatura que se desea fijar, se introduce en un orificio practicado en la parte superior del instrumento un tapón atravesado por un agujero por el que pasa un tubo vertical de vidrio. Desde este momento si el agua

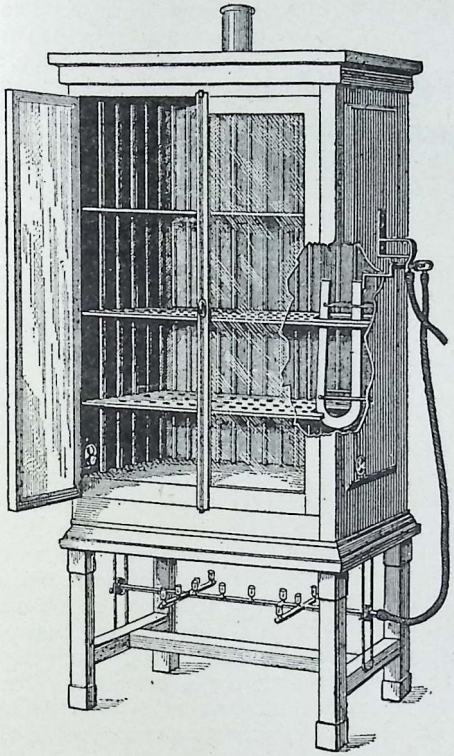


Fig. 220

aumenta de temperatura, se dilata, sube en el tubo de cristal, la presión, en la parte baja del aparato, aumenta, y la membrana elástica se deprime, disminuye la admisión del gas, obstruyendo el orificio de llegada. La temperatura no puede, pues, subir por encima del grado que se ha fijado. En el uso ordina-

rio, se ha renunciado al regulador de d'Arsonval. Se le reemplaza por el regulador de Roux, que más adelante describiremos.

La estufa de Pasteur se compone de un armario de madera (fig. 220) en cuyas paredes interiores se han fijado tubos de latón delgado. La frontera está cerrada por una puerta acristalada, y debajo del suelo se encuentran los mecheros cuyos gases calientes subirán por los tubos de latón y calentarán la estufa. Un regulador de Roux, que después describiremos, asegura la constancia de la temperatura. Este modelo está muy generalizado, es cómodo en extremo. La estufa de Weisnegg, de doble cubierta de aire, tiene el mismo fin y las mismas ventajas.

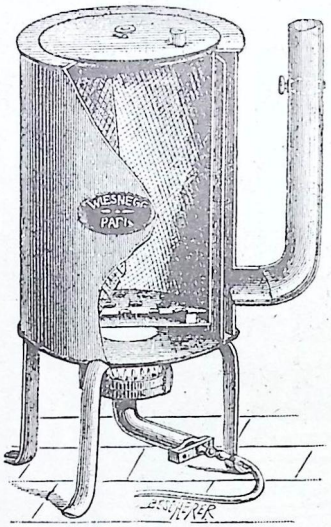


Fig. 221

Cuando se trata de esterilizar instrumentos o líquidos, no bastan las estufas precedentes; se recurre entonces al horno Pasteur o al autoclave de Chamberland, que permiten pasar de 120°.

En el horno Pasteur (fig. 221), los objetos son esterilizados en seco en un recinto metálico calentado al gas. Actualmente se prefiere, en general, esterilizar en el vapor de agua bajo presión. La figura 222 representa el autoclave de Chamberland cuyo principio se encuentra en la marmita de Papin. Un reservorio resistente contiene, en su parte inferior, agua calentada por cierto número de mecheros de Bunsen. Sobre una placa de cobre perforado o en un cesto de tela metálica se colocan los objetos que hay que esterilizar, que estarán bañados por el vapor de agua. Estando el recinto herméticamente cerrado, la presión del vapor de agua, en él contenido y,

por consiguiente, la temperatura, se elevan, un manómetro indica cuál es la presión y la temperatura correspondiente. El aparato está, claro es, dotado de una válvula de seguridad. Se calienta generalmente a 120° ó 130° durante un cuarto de hora o 20 minutos, después se deja enfriar y se sacan los objetos esterilizados.

Cuando se trata de desinfectar cuerpos voluminosos, como camas, muebles, etc., se recurre a grandes cámaras que funcionan como las estufas precedentes.

La experiencia ha demostrado que la esterilización por el vapor de agua sobrecalentado es muy superior a la esterilización por el aire seco. Esta última, para llegar a los mismos resultados, exige una temperatura más elevada y penetra peor los objetos. Puede ocurrir que los colchones, almohadas, etc., queden infectados en su interior, a pesar de una permanencia prolongada en el aire seco caliente.

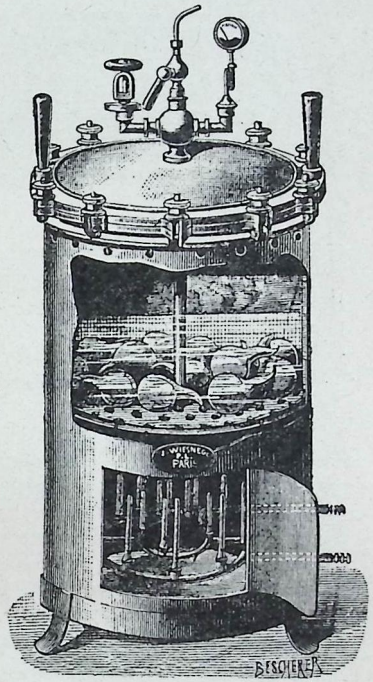


Fig. 222

Por estos motivos, el tipo de estufa de desinfectar de Geneste y Herscher (figura 223) es la que está más en boga en Francia. Consiste esta estufa en un gran cilindro horizontal de palastro, cerrado por sus dos extremos, y en la que se introducen los objetos por medio de un carretón sobre raíles. Se cierra y se calienta, introduciendo vapor de agua en la cámara

y en dos baterías de superficie caliente. Se hace subir la temperatura a 108°-109° durante un cuarto de hora, pues que la

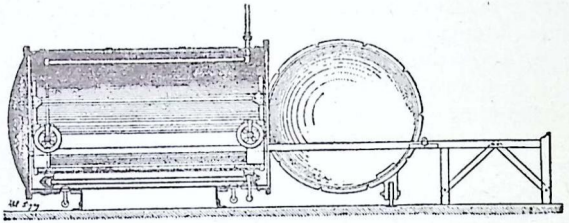


Fig. 223

experiencia ha demostrado que esta es suficiente; después, se impide la llegada de vapor y se continúa calentando para conseguir el secado, lo que no tarda más de un cuarto de hora.

Termostatos

Ocurre con frecuencia que hay que mantener ciertos medios a una temperatura más o menos elevada. En este caso puede resultar cómodo sumergirlos en un baño a la temperatura deseada. Tal dispositivo se denomina Termostato. Se compone, en principio, sencillamente de una caja metálica, llena de agua, cuyas paredes laterales son dobles y protegidas por un gran espesor de madera. Debajo de la caja se dispone una rampa constituída por mecheros de Bunsen. Un regulador de gas mantiene el agua a la temperatura deseada. Es necesario agitar constantemente la masa líquida por medio de un agitador, de preferencia automático, para asegurar la igualdad de temperatura en los diversos puntos del líquido. La ventaja de este dispositivo, además de su extrema sencillez, reside en la facultad que se tiene de poder fácilmente vigilar los instrumentos sumergidos sin que varíe su temperatura, teniendo el agua en que se encuentran una gran capacidad calorífera. Basta con levantar la cubierta de la caja.

Incubadoras

Las incubadoras no son más que estufas; no nos ocuparemos más que de las incubadoras para niños.

La incubadora de Tarnier consistía en una caja de madera, dividida en dos compartimientos superpuestos mediante un tabique horizontal incompleto. El de arriba, cerrado por una tapa acristalada, estaba destinado a recibir el niño; en el de debajo se introducía un calorífero que contenía aproximadamente 10 litros de agua caliente. Una esponja mojada aseguraba al aire cierto grado higrométrico; una abertura en la cubierta, provista de un ventilador, permitía apreciar que la renovación del aire se realizaba en buenas condiciones. Se vigilaba la temperatura por medio del termómetro, y si descendía, se renovaba el agua del calorífero.

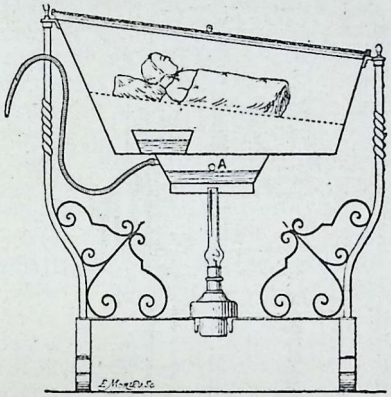


Fig. 224

La vigilancia del calorífero supone una gran sujeción; en la incubadora de Diffre se remedia el inconveniente por medio de la calefacción continua con la lámpara de petróleo (figura 224). El niño está acostado sobre una sencilla tela metálica, fácil de mantener limpia. En la parte inferior de la cámara se encuentra una cubeta destinada a sostener el aire húmedo. La calefacción no se hace directamente; la lámpara sirve para mantener el agua de un depósito *A* colocado debajo de la incubadora a una temperatura próxima a la de la ebullición;

el vapor, obligado a pasar por un tubo bastante largo, se condensa en él y entra de nuevo en el depósito *A*, que queda así alimentado. Se regula fácilmente la temperatura subiendo o bajando la mecha de la lámpara. La aireación está asegurada por dos aberturas practicadas en la cámara.

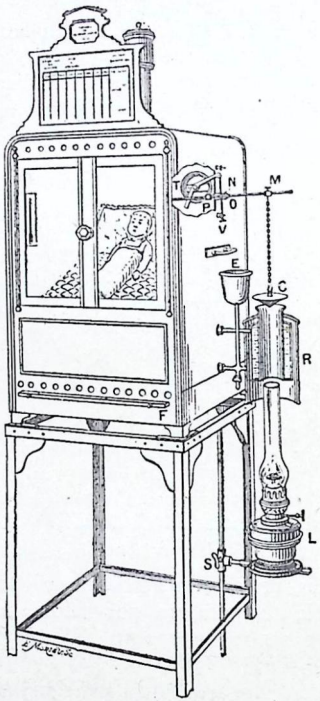


Fig. 225

Uno de los modelos más perfectos parece ser la incubadora Lion (fig. 225). Es toda ella de plancha galvanizada, con una puerta acristalada que permite vigilar al niño. El aire entra por una cuarentena de agujeros practicados en la parte inferior, se calienta al contacto de un serpentín de cobre y se escapa por la parte superior. La calefacción se realiza mediante un termosifón *R*, al contacto del que se calienta el agua para ir a circular por el serpentín de cobre. Este termosifón está provisto de un regulador de temperatura que funciona de la manera siguiente. El aire caliente de una lámpara atraviesa el tubo vertical que pasa por medio del agua; si la temperatura es demasiado alta, se eleva el cono *C*, el aire pasa rápidamente y cede poco calor al aparato; si baja, a consecuencia de un sistema de dilatación *P*, desciende el cono *C*, obtura la chimenea y la calefacción se realiza en las mejores condiciones. Actuando sobre el tornillo *V* se arregla de manera que la obturación se realice para la temperatura que se desea mantener constante en la incubadora.

Reguladores de temperatura

Los buenos reguladores de temperatura funcionan con gas o con electricidad: he aquí el principio que sirve de base a su construcción.

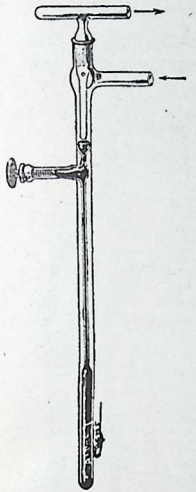


Fig. 226

Reguladores de gas.— El gas llega por un tubo de conducción a un espacio cerrado y sale por un segundo tubo que le lleva a los mecheros.

Bajo la influencia del aumento de temperatura, un cuerpo se dilata y obstruye el orificio de llegada o de partida del gas, a consecuencia de lo que los mecheros disminuyen la llama. Si, por el contrario, la temperatura desciende, los orificios se destapan más y los mecheros reciben más gas. Se establece así un régimen del que se regula a voluntad el punto por diversos procedimientos, que más adelante estudiaremos.

Es importante que exista siempre una ligera fuga permanente para evitar la extinción completa del gas, aun en el caso de que por una causa accidental la temperatura llegase a elevarse anormalmente.

Reguladores eléctricos. — En los reguladores eléctricos la calefacción se efectúa por el paso de la corriente por resistencias apropiadas. Si la temperatura se eleva demasiado, la corriente se interrumpe en totalidad o en parte; si la temperatura baja, el circuito se cierra.

Vamos ahora a describir los modelos más usados.

Regulador de Chancel. — El aparato tiene la forma representada en la figura 226; está basado en la dilatación del mercurio; las flechas indican la marcha de la corriente gaseosa. Este regulador está colocado en la estufa; en el momento

en que se alcanza la temperatura que deba fijar, se rueda el tornillo colocado a la izquierda de la figura y se conduce el mercurio hasta tocar el tubo de salida del gas; en este momento queda hecha la regulación, porque si la temperatura se eleva, el orificio de salida queda tapado, si desciende, se destapa completamente y deja más fácilmente paso al gas.

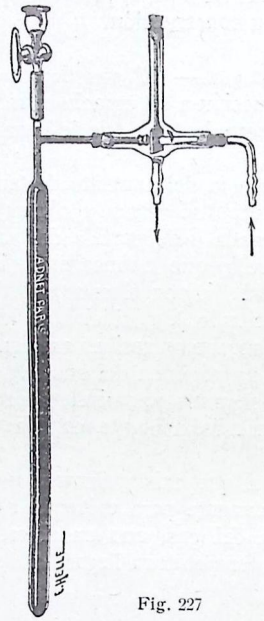


Fig. 227

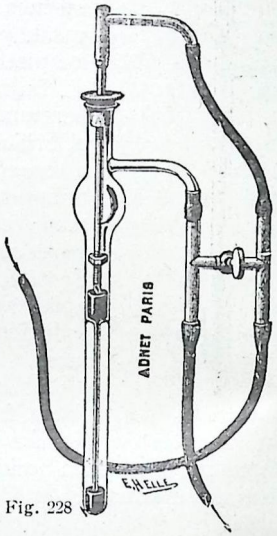


Fig. 228

Regulador de Schlœsing. — Representado en la figura 227. El tubo de mercurio lleva una rama horizontal cubierta en su extremidad por una membrana de caucho; cuando se alcanza la temperatura deseada, se cierra la llave y se aprisiona el mercurio. Desde entonces, si la temperatura se eleva, la pequeña membrana de caucho se hincha y repele una lámina metálica que obstruye el orificio de entrada del gas.

Regulador de Raulin. — Aquí el cuerpo dilatable es el aire (fig. 228), que repele el mercurio y obstruye así la llegada

del gas. El tubo de llegada del gas y el tubo de partida pueden comunicar directamente, y es preciso tener cuidado de no cerrar completamente la llave que sirve para separarlos, para que en el caso en que se produzca una oclusión completa a

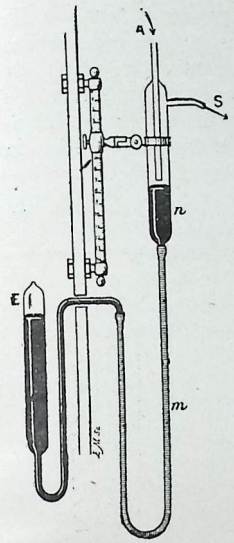


Fig. 229

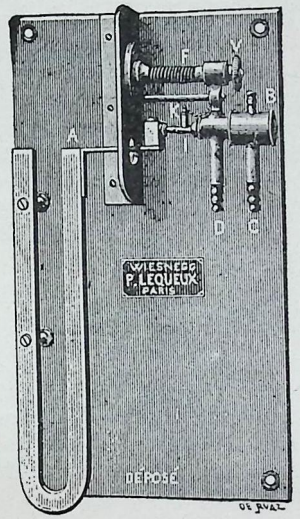


Fig. 230

nivel del mercurio, los mecheros no se apaguen; es necesario que persista una llama muy pequeña.

Regulador de Chauveau. — En este aparato, representado en 229, un líquido, colocado en *E*, ejerce su presión de vapor sobre el mercurio. Según el líquido elegido, el vapor rechazará el mercurio a una temperatura; es necesario, por lo tanto, hacer esta elección para el punto en que se la deba fijar. Por lo demás, se puede, para un mismo líquido, modificar en una decena de grados la temperatura de la estufa elevando o descendiendo el reservorio por donde pasa el gas. El vapor

tendrá así, para obturar el tubo *A*, que vencer una presión tanto más elevada cuanto más alto esté el reservorio y, por lo tanto, la temperatura de fijación será mayor.

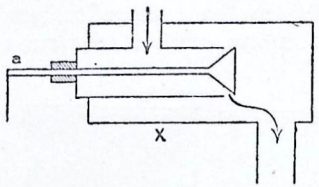


Fig. 231

Regulador de Roux. — Es uno de los más generalizados actualmente (fig. 230). Se compone esencialmente de una pieza de forma de herradura alargada *A*, hecha de dos metales desigualmente dilatables, de suerte que, por efecto de las variaciones de temperatura, las dos ramas se separan o se aproximan. Una de las ramas, la de la izquierda en la figura, está fija, la otra tropieza contra un tallo metálico *a* (figura 231) que tapa o destapa, según el sentido en que se mueve, un orificio por donde pasa el gas. Con ayuda del tornillo *V* (fig. 230), se aproxima o aleja más o menos de *A* la pieza representada aparte en *X* y se hace variar por consiguiente, la temperatura a que se regula.

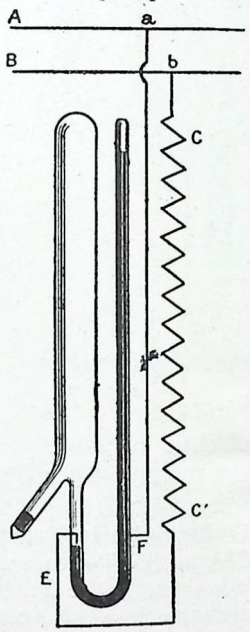


Fig. 232

Regulador eléctrico de Regaud. — Un tubo que tiene la forma de la figura 232 contiene en su parte izquierda hidrógeno enrarecido que se dilatará más o menos bajo la influencia de las variaciones de temperatura; en el tubo de la derecha existe el vacío. Una corriente eléctrica pasa por la resistencia *CC'* destinada a dar lugar al desprendimiento del calor, y por la columna de mercurio. Si la temperatura se eleva, el hidrógeno se dilata, repele el mercurio y se produce una ruptura de circuito en *E*, cesa la calefacción y no se restablece sino cuando la temperatura desciende. Para regular el punto en que se deberá fijar, se hace pasar primero mayor o menor cantidad de mercurio al divertículo de la izquierda y se inclina el aparato para hacer variar la presión soportada por el hidrógeno.

III. — Fusión y vaporización

Cuando la temperatura de un cuerpo sólido se eleva, llega generalmente un momento en que este cuerpo funde, se transforma en líquido. Algunas veces, esta transformación es gradual, pasando el cuerpo por el estado pastoso, haciéndose cada vez menos viscoso y dando finalmente un verdadero líquido. Otras veces, el tránsito es brusco, se tiene un cuerpo duro que posee todas las propiedades características del sólido y que pasa directamente al estado líquido, perfectamente flúido. El tipo de esta transformación es la fusión del hielo. En este caso se presenta un fenómeno muy notable, que se puede resumir en las dos proposiciones siguientes:

1.ª El cuerpo funde a una temperatura siempre la misma, y esta temperatura permanece constante durante todo el tiempo en que quedan juntos líquido y sólido.

Así, hagamos fundir hielo; la fusión comenzará en cuanto la temperatura del hielo alcance 0° y la mezcla de hielo y de agua permanecerá a 0° mientras quede hielo que fundir. Una vez fundido todo el hielo, la temperatura puede elevarse.

2.ª Si se enfría un líquido, se solidifica siempre a la misma temperatura; esta temperatura es la misma que la de la fusión de dicho cuerpo cuando estaba en estado sólido, es decir, de la operación inversa, y no cambia mientras existen sólido y líquido juntos.

Así, si se hace congelar el agua, la formación del hielo comienza a 0° y la temperatura no baja mientras queda agua que congelar. Una vez está congelada toda el agua, la temperatura puede descender.

Hay que advertir que estas proporciones no son rigurosamente verdaderas más que en ausencia de toda variación exterior. En realidad, cuando la presión varía, la temperatura de fusión

o de solidificación varía también, pero estas acciones son muy poco acentuadas; son necesarias variaciones de presión enormes para producir diferencias apreciables en la temperatura de fusión; en la práctica, no hay ocasión de tenerlas en cuenta.

Puede ocurrir también que un sólido se transforme directamente en vapor, cuando se le calienta, sin pasar por el estado líquido; es lo que ocurre con el yodo, por ejemplo, pero es una excepción.

La mayor parte de los líquidos emiten vapor a cualquier temperatura.

Si el vapor se encuentra en presencia del líquido que lo ha emitido, se dice que está saturado. En estas condiciones, permaneciendo constante la temperatura, si se le quiere comprimir como un gas, la presión no aumenta, cierta cantidad de vapor se liquida; si se quiere aumentar su volumen, la presión no disminuye, una parte del líquido se vaporiza. Por lo tanto, en estas condiciones, la tensión del vapor tiene un valor constante, dependiente, claro está, de la temperatura. Esta tensión del vapor saturado crece con la temperatura, y el valor de esta tensión se encuentra, para cierto número de líquidos, en tablas construídas al efecto.

Si se ha vaporizado todo el líquido y se continúa aumentando el volumen del vapor, la presión disminuye, el vapor se conduce entonces como un gas. En este caso, el vapor tiende cada vez más a seguir las leyes de Mariotte y de Gay-Lussac, y tanto más se aproxima a ellas cuanto más lejos está de su punto de licuefacción.

Hay que advertir que el vapor de un líquido se conduce lo mismo en el vacío o en presencia de un gas. Así, introduzcamos agua en una cámara barométrica a 20°, veremos bajar el mercurio; indicando que el vapor que se ha formado tiene una presión de 17,4 mm. de mercurio, con la condición de que quede un pequeño exceso de líquido con el fin de que el vapor esté saturado. Si, de la misma manera, se introdujera, a 20°, agua en cierto volumen de aire seco, se formaría vapor de agua saturado, que aumentaría en 17,4 mm. de mercurio la presión del aire.

Si se calienta intensamente un líquido, llega un momento en que la transformación en vapor se realiza con desprendimiento rápido de burbujas, en medio del líquido, o antes, sobre las paredes del vaso; se dice que hay ebullición.

La ebullición de un líquido se produce a una temperatura constante para una misma presión soportada por este líquido. Así, bajo la presión de 760 mm., el agua hierve a 100°; si la presión varía, el punto de ebullición varía; se eleva cuando la presión sube, baja cuando la presión desciende. Esta influencia es muy notable; es preciso tenerlo en cuenta para la determinación del punto 100 de los termómetros.

Existe una cosa importante que indicar: es que la ebullición se produce en las mismas condiciones cualquiera que sea la manera de ejercerse la presión en la superficie del líquido. Así, en las condiciones ordinarias, es el aire atmosférico el que produce la presión de 760 mm. para que el agua hierva a 100° Si colocamos el agua en un recipiente vacío de aire, entrará en ebullición a 100° cuando la tensión de su vapor ejerza sobre las paredes del vaso y la superficie del líquido una presión de 760 mm. de mercurio.

IV. — **Higrometría**

El estado higrométrico del aire es la relación que existe entre la presión del vapor de agua en este aire y la presión que tendría el vapor, si estuviera saturado.

Como a volúmenes iguales, los pesos de los gases son proporcionales a la presión, se puede decir así:

El estado higrométrico del aire es la relación entre el peso del vapor de agua que existe en cierto volumen de aire y el peso que existiría si el aire contuviese el vapor de agua saturado.

Los procedimientos empleados para determinar con precisión el estado higrométrico del aire están descritos en los tratados generales de física; para las aplicaciones biológicas, se emplean generalmente aparatos de lectura directa, verdaderamente poco exactos.

El higrómetro de Saussure (fig. 233) está basado en el alargamiento que experimenta un cabello en el aire cada vez más húmedo. Este cabello, sujeto en *A*, se arrolla alrededor de una

pequeña polea P y se mantiene tenso mediante un pequeño peso. La polea, provista de una saeta que se desplaza sobre un cuadrante graduado, gira sobre su eje cuando el cabello se alarga o se encoge. Este aparato hay que graduarlo por comparación con un aparato que dé con precisión el grado higrométrico del aire, o colocándole debajo de una campana que contenga aire, del que se conoce el estado higrométrico por cualquier artificio; es poco exacto. El psicrómetro es preferible; consiste (fig. 234) en dos termómetros idénticos, recubierto uno de ellos por una mecha de algodón continuamente mojada por imbibición en un depósito lateral que contenga agua. Evaporándose el agua en la superficie del termómetro así mojado, tanto más rápidamente cuanto más seco está el aire, el termómetro mojado señala una temperatura más baja que el termómetro seco, y la diferencia es tanto mayor cuanto menos saturado esté el aire. Se lee la temperatura en los dos termómetros, y se aplica una fórmula que da el estado higrométrico del aire.

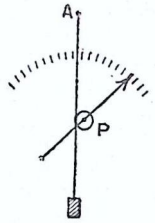


Fig. 233

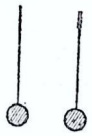


Fig. 234

$$e = 1 - \frac{A}{F}(t - t').$$

En esta fórmula, A es una constante equivalente a 0,53. F la tensión máxima del vapor, a la temperatura del aire; por consiguiente, a t, expresada en milímetros, t', es la temperatura indicada por el termómetro mojado.

El más superficial examen basta para hacernos comprender que el estado higrométrico del aire tiene una influencia considerable sobre los fenómenos de la vida; pero esta acción no ha sido bastante estudiada.

Existe, no obstante, un hecho notable que hay que mencionar. Ciertos animales colocados en una atmósfera con débil estado higrométrico se deshidratan sin morir por ello, adquieren un estado de vida latente. El ejemplo más conocido de este fenómeno se encuentra en los tardígrados que, desecados, pueden permanecer mucho tiempo en estado de muerte aparente, pero basta mojarlos para verlos revivir. Lo mismo ocurre con otros animales inferiores.

V. — Temperatura de los animales

A consecuencia de las combustiones que se realizan en los tejidos de los animales, su temperatura se mantiene más o menos por encima de la del aire ambiente. Hay, no obstante, que hacer una distinción muy importante. Para algunos animales, la diferencia de temperatura entre el interior de su cuerpo y el medio en que están sumergidos es muy ligera, las variaciones del aire y del agua se hacen sentir con rapidez, el cuerpo del animal tiende a ponerse en equilibrio térmico con el medio ambiente, pero manteniéndose en general ligeramente por encima. Estos animales han sido designados, durante largo tiempo, con el nombre de animales de sangre fría, expresión incorrecta y que es preferible reemplazar por la de animales de temperatura variable o heterotermos. Este grupo comprende la inmensa mayoría de los seres vivos.

Otros animales, llamados impropiamente "de sangre caliente", se mantienen a una temperatura sensiblemente constante, de dónde su nombre de homeotermos. Si se encuentran en una atmósfera muy fría, y si pierden, por consiguiente, más calor, fabrican también más, aumentando sus combustiones. Si, por el contrario, el medio en que se encuentran es demasiado caliente, pueden, mediante un mecanismo que más adelante indicaremos, aumentar las pérdidas de calor, y, por consiguiente, luchar contra una elevación de temperatura que les sería nociva. Este grupo comprende la mayor parte de los mamíferos y de las aves adultas.

Podemos ventajosamente adoptar la división propuesta por Richet, y que se resume en el siguiente cuadro:

ANIMALES QUE TIENEN UNA TEMPERATURA SENSIBLEMENTE INVARIABLE (HOMEOTERMOS)

Mamíferos y Aves adultos, además los Invernantes.	de 42° aproximadamente.	Aves.
	de 39° —	Mamíferos
	de 37° —	Hombres

ANIMALES QUE TIENEN UNA TEMPERATURA VARIABLE (HETEROTERMOS)

α.	Que mueren cuando su temperatura desciende por debajo de 20°.	Mamíferos y Aves recién nacidos.
β.	Que se aturden cuando su temperatura desciende por debajo de 20°	Invernantes.
γ.	Que todavía están activos cuando su temperatura desciende por debajo de 20°	Reptiles, Batráceos, Peces, Moluscos, Insectos, etc.

1.° **Homeotermos.** — El estudio de la temperatura de los animales se realiza por medio del termómetro. Deberá tener un índice de máxima con el fin de indicar con certeza la temperatura más elevada que se haya alcanzado; las causas de error dan, en efecto, casi siempre una temperatura demasiado baja. Será superfluo decir que este instrumento debe estar perfectamente graduado y comprobado de vez en cuando; de este modo, la ciencia no estaría repleta de documentos falsos, dependientes, por lo menos en parte, de un aparato de medidas imperfecto. Nunca se repetirá bastante que es indispensable, aun cuando se tenga certeza de poseer un buen termómetro, comprobar de vez en cuando que no hay desplazamiento del cero.

Aun en estas condiciones, la determinación de la temperatura de un animal no es cosa tan sencilla como a primera vista puede parecer.

Tómese, en efecto, un perro, un conejo, un hombre o cualquier otro mamífero; se podrán encontrar resultados muy diferentes según la manera cómo se haya operado.

La temperatura no es la misma en todos los puntos del cuerpo; no es la misma en la boca que en la axila y en el recto. En general, el termómetro se introduce en el recto, pero diversas causas, en particular la presencia de materias fecales, que no se ponen rápidamente en equilibrio térmico con los tejidos vecinos, pueden inducir a error al observador. Si, en el momento de la experiencia, por cualquier causa, la temperatura interna del cuerpo llega a modificarse, estas variaciones podrán no ser indicadas por el termómetro sumergido en

medio de las materias fecales. Es fácil poner en evidencia este hecho colocando a un animal dos termómetros, uno en el hígado y otro en el recto, y provocando por cualquier medio variaciones de temperatura. Estas variaciones serán mucho mejor indicadas por el termómetro del hígado que por el del recto, que las sigue más lentamente y no indica toda la amplitud.

Cuando se realizan estudios sobre la temperatura, hay que operar siempre de la misma manera, y no comparar nunca temperaturas obtenidas por procedimientos diferentes. La introducción del termómetro en el recto es, en la mayor parte de los casos, el único procedimiento practicable; es necesario introducirlo bastante lejos para que la cubeta no esté en la proximidad de la margen del ano, en donde la temperatura es siempre más baja, y esperar que la columna termine de subir, lo que exige, en ocasiones, bastante tiempo. Ciertos autores recomiendan calentar previamente el termómetro o, por lo menos, no introducirlo sino progresivamente para no producir el enfriamiento de la región en donde será tomada la temperatura definitiva.

Algunos animales, cuyo tipo es el conejo, dan generalmente una temperatura demasiado baja; en efecto, en cuanto se les sujeta, permanecen inmóviles y se ve que su temperatura desciende con rapidez; dos o tres minutos bastan para esto, y la diferencia puede fácilmente llegar a 1° al cabo de unos diez minutos. Por el contrario, otros animales, como el perro, no cesan de agitarse, y su temperatura se eleva; más adelante veremos las causas.

Todos estos motivos son suficientes para explicar las diferencias entre los resultados de los diversos observadores; es preciso hacer un estudio crítico serio de las experiencias antes de considerarlas como válidas. Sería un grave error tomar el término medio de los resultados esparcidos en la ciencia, para tener la temperatura de una especie animal; es mucho mejor adoptar las de un buen experimentador.

De esta manera consideraremos, por ejemplo, como temperatura normal del perro 39,28°. Esto no quiere decir que todo perro normal tenga 39,28° de temperatura rectal; aún suponiendo bien practicada la medición, esta temperatura puede variar por muchas circunstancias.

Efectivamente, hay perros de pelo corto y perros de pelo largo; estos últimos, mejor protegidos contra las pérdidas de calor, tienen, en general, una temperatura un poco más elevada que los primeros; esta diferencia puede alcanzar cerca de 1°. Esta influencia del pelaje es muy importante; un conejo afeitado lucha difícilmente contra el descenso de temperatura y al cabo de algunos días se puede ver bajar esta temperatura hasta provocar la muerte del animal. El estado de inanición hace descender también la temperatura de los animales.

Cuando la temperatura exterior desciende, el calor radiado por el organismo aumenta, y es necesario, para que su temperatura sea constante, que las combustiones del organismo aumenten; al mismo tiempo hay una vasoconstricción de los vasos cutáneos para restringir las pérdidas. Los homeotermos pueden, de este modo, luchar contra los grandes fríos. Se les ve conservar sensiblemente la misma temperatura en las regiones polares, en donde, en ocasiones, hay una diferencia de 80° entre la temperatura del cuerpo y la de la atmósfera. No obstante, en estas condiciones, hay ligeras variaciones, pues la temperatura del medio ambiente no está en absoluto sin influencia sobre la del cuerpo de los homeotermos.

Cuando la temperatura del medio se eleva, las combustiones del organismo languidecen y se produce una vasodilatación de los vasos cutáneos. Además, los animales todavía tienen otro medio a su disposición para luchar contra el calentamiento del cuerpo: evaporan mayor cantidad de agua. Sabemos que cada kilogramo de agua necesita para pasar al estado de vapor un absorción de más de 500 calorías. Cuanto más importante sea esta evaporación, más calor absorberá, permitiendo así que los tejidos se refrigeren. Este fenómeno se producirá tanto más fácilmente cuanto más seco sea el aire. En una atmósfera saturada no puede tener lugar, y esta es la causa de que, elevándose la temperatura del aire, la permanencia en él resulta tanto más penosa cuanto más próximo está del punto de saturación.

Algunos animales, como el perro, no transpiran. Cuando su temperatura tiende a elevarse, como cuando se realiza una carrera o una sencilla exposición al sol, evapora el agua por la superficie pulmonar. Se ve entonces aumentar mucho la

frecuencia respiratoria y dar lugar a lo que Richet ha denominado polipnea térmica.

Como la temperatura del hombre se ha estudiado con mucho más detalle que la de los animales, ha revelado numerosas particularidades interesantes.

La temperatura del hombre se toma habitualmente en la axila o en el recto. Se puede considerar, tomando la media de las buenas observaciones, que la primera es aproximadamente

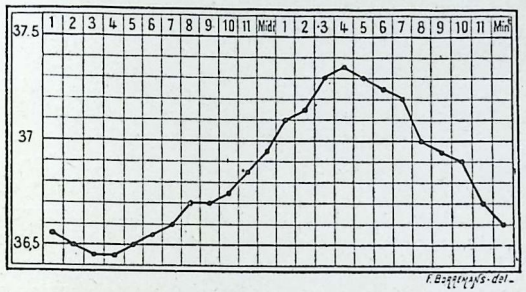


Fig. 235

de 37°, la segunda de 37,5. Estas cifras no indican más que un valor medio; durante el día, la temperatura sufre sin cesar oscilaciones de las que la figura 235 da una buena idea. En general, hay un mínimo hacia las cuatro de la mañana y un máximo hacia las cuatro de la tarde. La amplitud de la oscilación es aproximadamente de 1° y puede alcanzar 2°, estando el sujeto en plena salud.

El ayuno o el reposo no suprimen estas variaciones, pero en las personas que habitualmente trabajan de noche y descansan de día, como los obreros panaderos, por ejemplo, ocurre lo contrario: el máximo se produce hacia la mañana y el mínimo por la tarde.

En el momento del nacimiento, el niño tiene una temperatura superior a la de la madre, comienza a bajar rápidamente, después se eleva de nuevo, para alcanzar, durante o al cabo del primer día, un valor un poco superior al del adulto. A partir de la edad adulta, la temperatura no varía más normalmente, ni

aún en la edad avanzada. Sin embargo, según ciertos autores, habría un ligero descenso en la vejez; este hecho ha sido impugnado.

He aquí un cuadro que da aproximadamente las variaciones de la temperatura en las diversas épocas de la vida:

Al nacimiento	38'8°
Media hora después	36'6°
Durante los 10 días siguientes	37'6°
Infancia y adolescencia	de 37,6° a 37°
Edad adulta	37°
Vejez	37°

Ni el sexo ni la raza parecen tener influencia. Si las mediciones realizadas en los indígenas de países cálidos dan un valor un poco superior al que se admite para el blanco, esto depende de las condiciones de temperatura en que se han hecho estas observaciones, porque determinaciones realizadas simultáneamente en el mismo sitio en los blancos, los negros, los indios, etc., no han mostrado diferencia imputable a la raza. Está, por el contrario, bien establecido que, según la temperatura del medio, la del cuerpo del hombre puede variar alrededor de 1°.

El ejercicio físico puede provocar una elevación de temperatura de 0,5° a 1°, y aún más.

El trabajo intelectual no carece de influencia, como lo demuestra la curva de la figura 236.

Desde el punto de vista práctico, se puede decir que normalmente, aparte de una causa especial, se puede adoptar para la temperatura del cuerpo humano, los siguientes valores:

En la axila	36,2° noche.		37,5° al fin del día
En el recto	36,6° »		37,8 —

En los casos de enfermedad, la temperatura puede elevarse notablemente; se han citado hechos en que habría alcanzado hasta 50°, pero indudablemente hay en ello un error. El límite de 42° es ya grave en extremo, y no se conocen más que dos casos, al parecer auténticos, en que se haya observado la de 44° sin que la muerte haya sido la consecuencia.

El límite inferior es mucho más extenso; se ha podido

ver en los embriagados que se duermen al frío bajar la temperatura hasta 24°, habiéndose podido volver a la vida. Esto no es inverosímil, porque, experimentalmente, en el laboratorio se puede enfriar un conejo a 18° sin que sobrevenga la muerte fatalmente. El perro es un poco más sensible, no soporta menos de 20° a 21°.

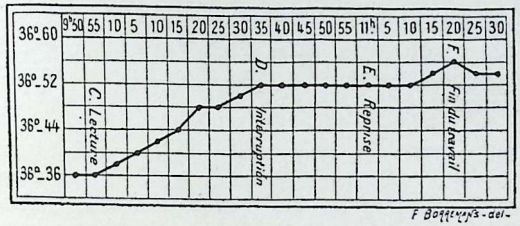


Fig. 236

Vese, pues, que el descenso de temperatura es, por sí mismo, mucho menos grave de su elevación.

2.° **Heterotermos. Mamíferos y aves recién nacidos.** — Los mamíferos y aves recién nacidos, no están todavía organizados para defenderse contra las variaciones de temperatura exterior. En cuanto están separados de su madre, tienen una gran tendencia a enfriarse, pero como, desde el punto de vista de su salud, son tan sensibles a estos cambios de temperatura como los adultos, cuando su temperatura desciende por debajo de 20°, mueren. Este efecto es tanto más rápido cuanto que los animales son más jóvenes y se deja sentir principalmente entre los que nacen antes de término. Por estos motivos, es preciso proteger a los recién nacidos contra el enfriamiento por medio de cubiertas y hasta con recipientes de agua caliente. En cuanto a los que nacen antes de término, es necesario colocarles en una incubadora.

Invernantes. — Los animales invernantes, cuyo tipo más conocido es la marmota, se conducen habitualmente como los mamíferos, salvo que su temperatura normal es más baja (29° marmota).

Cuando la temperatura exterior desciende a las inmediaciones de 8° entran en invernación, su propia temperatura desciende y no excede a la del exterior más que en algunos grados (1°-6°). Si embargo, si este descenso es excesivo, cuando el animal no tiene más que 6° aproximadamente, hay peligro para su vida. Está protegido contra este accidente por el notable hecho de que despierta entonces, y hace subir su temperatura agitándose.

Existen falsos invernantes, el oso, por ejemplo, que duerme durante el invierno, pero cuya temperatura no baja como la de la marmota.

Reptiles, batracios, peces, etc. — En los demás heterotermos, la temperatura puede variar dentro de límites muy extensos, no solamente sin que sobrevenga la muerte, sino sin que dejen de vivir normalmente. Siguen las fluctuaciones de la temperatura exterior. Como, a consecuencia de las combustiones de su organismo producen un poco de calor, cuando están en un medio constante su temperatura es ligeramente superior a la de este medio. Parece que esta diferencia de temperatura esté en relación directa con el grado de desarrollo de su sistema nervioso; está más acentuado para los reptiles, en los que se le ve en ciertas circunstancias adquirir una gran importancia.

Este hecho resalta del cuadro siguiente, que ciertamente no es de una rigurosa exactitud, pero da una idea del conjunto del fenómeno.

EXCESO DE LA TEMPERATURA DEL CUERPO SOBRE LA DEL MEDIO AMBIENTE

Reptiles	3,13°
Batracios	1,51°
Peces	1,20°
Articulados y Anélidos	0'86°
Moluscos, Crustáceos	0'35°

Cuando estos animales se encuentran expuestos a una temperatura variable, siguen estas variaciones con cierto retardo, ocurre, pues, que están tan pronto por encima como por debajo, según el sentido de la variación. Es un hecho que es importante tener en cuenta en las medidas.

Límites extremos de temperatura compatibles con la vida

Estos límites son muy extensos. Por el frío más riguroso no se pueden matar ciertas esporas que, en las temperaturas elevadas, necesitan más de 100° para ser destruídas. Para organismos más elevados, P. Broca ha visto tardígrados desecados resistir a 98°; se encuentran confervas en fuentes por encima de 60°. Para los vertebrados, de los que conocemos los límites superiores de temperatura, se han podido congelar peces y batracios, llevarlos hasta — 15° y verlos revivir si se toma la precaución de recalentarlos lentamente.

VI. — Cantidades de calor

Cuando 1 kg. de agua pasa de 0° a 1°, se dice que absorbe una caloría. Para las necesidades de la práctica, se admite que pasando de 0° a n°, 1 kg. de agua absorbe n calorías, y, en general que, elevándose en 1°, 1 kg. de agua absorbe una caloría, cualquiera que sea la temperatura inicial. La caloría es la unidad que sirve para medir las cantidades de calor; se utiliza también la pequeña caloría, mil veces más pequeña que la gran caloría, es decir, correspondiente al calor necesario para elevar en 1° 1 gr. de agua.

Si en lugar de calentar el agua se calienta otro cuerpo, habrá que consumir menos calor para el mismo peso y la misma variación de temperatura. Por ejemplo, calentamos 1° 1 kg. de cobre, no emplearemos más que 0,095 calorías aproximadamente. Se dice que 0,095 es el calor específico del cobre.

El calor específico de los tejidos del cuerpo del hombre y de los animales es mal conocido, es próximo a 0,8 ó 0,9, es decir, un poco inferior al del agua, que es 1 por definición.

Cuando un cuerpo cambia de estado, es decir, pasa del estado sólido al líquido, o del estado líquido al gaseoso, hay ab-

sorción o desprendimiento, según el sentido del cambio, sin que la temperatura varíe.

1 kg. de hielo a 0° al pasar al estado de agua a 0° absorbe 79,25 calorías. Por el contrario, al pasar del estado de agua al estado de hielo desprende igual número de calorías.

1 kg. de agua a 100° al pasar al estado de vapor de agua a 100° absorbe 537 calorías aproximadamente, y a la inversa, el vapor, al condensarse, desprende 537 calorías.

El conocimiento de las cantidades de calor es importante en extremo para un gran número de problemas biológicos; pero, además de la cuestión de cantidad de calor, hay otra consideración sumamente importante: es la de la temperatura del calor. Esta noción de la temperatura a la que se encuentra cierta cantidad de calor, tiene una importancia capital, como más adelante veremos. Una misma cantidad de calor no tiene las mismas propiedades, según la temperatura a que se encuentra. Un ejemplo nos bastará para hacerlo comprender. El plomo funde a 326° C.; si tenemos a nuestra disposición 1.000 calorías a 1000° C. podremos fundir cierta cantidad de plomo, pero una cantidad aun infinita de calorías no nos permitirá fundir ni una partícula, si estas calorías estaban por debajo de 326°.

Si nosotros queremos hacer una comparación, tomemos aire a la presión de 10 atmósferas; podremos con este aire, que dejaremos distender, repeler un pistón y producir trabajo. Supongamos que, sin perder, hayamos dejado el aire distenderse a una atmósfera, tendremos siempre la misma cantidad pero no la podremos utilizar como en el caso precedente. Lo mismo ocurre con el calor; veremos que una cantidad determinada de calor no nos permite producir el mismo trabajo cualquiera que sea la temperatura a la que se encuentra.

VII. — **Propagación del calor**

Cuando dos regiones de un cuerpo sólido están a temperaturas diferentes, el calor se propaga paso a paso de los puntos más calientes hacia los más fríos. La importancia de esta propagación depende de diferentes factores, entre otros, de la

diferencia de temperatura y de lo que se llama conductibilidad del cuerpo. No se puede formular regla sencilla más que en un caso particular. Consideremos una lámina de caras paralelas (fig. 237) cuyas caras están respectivamente a las temperaturas t y t'; la cantidad de calor que pasa, por segundo, de una cara a otra, a través de la unidad de superficie, está sometida a las leyes siguientes:

Es proporcional a la diferencia de temperaturas t y t'.

Es inversamente proporcional al espesor de la lámina.

Depende de un coeficiente determinado para cada natura-

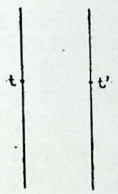


Fig. 237

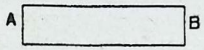


Fig. 238

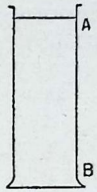


Fig 239

leza de substancia, llamado conductibilidad específica de esta substancia.

Esta conductibilidad es muy grande para ciertos metales, como la plata o el cobre, es muy pequeña para los cuerpos llamados aisladores, el cristal, la ebonita, la parafina, etc.

Cuando en lugar de tomar una lámina de caras paralelas, se lleva a dos temperaturas diferentes las extremidades A y B (fig. 238) de una barra, la ley precedente no subsiste en su simplicidad. El calor se propaga también de la parte caliente a la parte fría, tanto más rápidamente cuanta mayor es la diferencia de temperatura, cuanta menor es la distancia AB y la conductibilidad es más elevada; pero la ley no conserva la forma sencilla de la proporcionalidad, es decir, por ejemplo, si la longitud de la barra se duplica no pasa la mitad menos de calor de A a B. Esto depende de la pérdida que hay en el trayecto por la superficie lateral; cuanto más importante sea esta superficie lateral con relación a la sección de la barra, más se apartará de la sencilla ley enunciada para la lámina de caras

paralelas, que es preciso hasta suponerla sin bordes, es decir, indefinida, para que la ley sea rigurosamente exacta.

La propagación continua del calor de los puntos más calientes a los más fríos, se complica con otro fenómeno en los líquidos o en los gases.

En estos cuerpos, las moléculas se calientan en las partes calientes, después son arrastradas por las corrientes hacia las partes frías y transportan así con ellas cierta cantidad de calor. Este género de propagación es llamado por convección. Se concibe que pueda adquirir una importancia preponderante en los flúidos que tienen una mala conductibilidad.

Tomemos, por ejemplo, una probeta que contenga aceite (figura 239). Si calentamos la parte superior *A*, el calor se transmite poco a poco de *A* hacia *B*, por simple conductibilidad. Pero si se calienta en *B*, dilatándose, el líquido disminuye de densidad en *B*, y tiende a subir hacia las partes superiores, se producen corrientes de convección y un transporte más rápido de calor. Lo mismo ocurre con todos los flúidos, las partes calientes tienden a subir por medio de las partes frías. Gracias a este fenómeno se produce el tiro de las chimeneas, la ascensión de los mongolfiers, el movimiento del agua o del aire en los caloríferos.

Consideremos (fig. 240) agua contenida en un espacio cerrado compuesto de un primer recipiente *C*, del que parten dos tubos, uno *B*, que viene de la parte superior y va a un aparato llamado radiador y vuelve a la parte inferior de *C*. Si se calienta el agua de *C*, las porciones calentadas suben a la parte superior de *C*, se introducen por *B* para ir al radiador en donde se enfrían, cediendo una parte de su calor al mencionado radiador. A medida que el agua caliente llega por *B* al radiador, el agua más fría vuelve por *A* a la caldera; así se produce una circulación y un transporte continuo de calor de *C* a *R*. El radiador es una pieza metálica que tiene un gran desarrollo de superficie, de modo que pueda ceder fácilmente su calor al medio exterior. *D* es una cavidad que contiene aire; en el momento de la calefacción, el agua puede así dilatarse sin ejercer sobre las paredes del conducto una presión excesiva que podría deteriorarla.

En los caloríferos de aire caliente, el aire calentado sube

por un conducto (fig. 241) y se esparce en los departamentos por una boca *B*, lo que tiene el inconveniente de lanzar mucho polvo. La toma de aire frío tiene lugar en la parte inferior por *P*, y el foco está dispuesto para calentar la región inferior de la canalización que el aire debe atravesar.

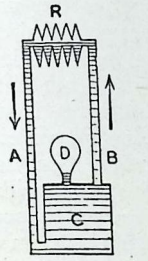


Fig. 240

Fig. 241

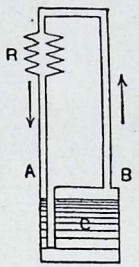


Fig. 242

Se hacen también caloríferos de vapor de agua. Tomemos el esquema de la figura 242 y supongamos que la caldera no contenga agua más que hasta cierto nivel, estando hecho el vacío en el resto del aparato. Si se calienta en *C* el agua se vaporizará, habiendo absorbido cada kilogramo de vapor 537 calorías. Este vapor subirá al radiador, en donde se condensará, restituyendo las 537 calorías y el agua de condensación redescenderá a la caldera por *A*. Este es un excelente medio de transporte de calor; si se produce una fuga en los conductos, se tiene una pérdida de vapor, pero no se corre el peligro de inundación causada algunas veces por los caloríferos de agua.

Propagación del calor por radiación. — El calor puede también pasar de un cuerpo caliente a un cuerpo frío sin intermedio de un cuerpo material. Así, nos llega el calor del sol a través del vacío interplanetario. Puede ponerse este hecho en evidencia por medio de una experiencia muy sencilla. Un termómetro está soldado a un globo, de modo que su reservorio ocupe el centro; en este globo se ha hecho el vacío.

Si se coloca ahora un cuerpo caliente *A* en las inmediaciones del globo, inmediatamente se ve subir la columna del ter-

mómetro sin que se pueda incriminar a la conductibilidad por las paredes del globo y el tallo del termómetro, la cual no habría tenido tiempo de obrar. Esta radiación desempeña un gran papel en los fenómenos naturales, no solamente nos llega de este modo el calor solar, fuente de toda vida sobre la tierra, sino que por este mecanismo se transmite en gran parte de un cuerpo a otro, con el que no está en contacto directo. La cantidad de calor que pasa por radiación de un cuerpo A a otro cuerpo B más frío, está determinada por la fórmula $Q = M\ (T - t)$, conocida con el nombre de fórmula de Newton; T y t son las temperaturas de los dos cuerpos; la cantidad de calor irradiado de uno a otro es proporcional a su diferencia de temperatura y a un coeficiente M dependiente de las condiciones de la experiencia, es decir, de la naturaleza de los cuerpos, de su superficie, de los medios interpuestos, etc.

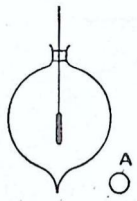


Fig. 243

Claro está que, en igualdad de circunstancias, la cantidad de calor irradiada por un cuerpo crece proporcionalmente a su superficie; pero el estado mismo de esta superficie tiene una importancia considerable. Los metales en general, y sobre todo los metales pulidos, irradian poco, tienen, como se dice, un débil poder emisivo del calor. De la misma manera tienen un ligero poder de absorción, el calor pasa muy mal a través de su superficie, ya trate de entrar, ya de salir del cuerpo. El poder emisivo y el poder absorbente marchan paralelamente. Las superficies mates irradian mucho. Tomemos, por ejemplo, un vaso de metal pulido y vertamos en él agua caliente en la que se sumerge un termómetro; veremos que este termómetro baja lentamente. Pero este descenso se acelerará más si recubrimos la superficie del vaso de negro de humo; este es el cuerpo que tiene el mayor poder emisivo y el más intenso poder de absorción.

El calor radiante no atraviesa todos los cuerpos con igual facilidad. Si consideramos dos cuerpos A y B a temperatura diferente, pasarán cantidades de calor diferentes del uno al otro, según el medio interpuesto, es decir, que el coeficiente M de la fórmula de Newton depende de la naturaleza de este

medio interpuesto. A través del vacío es por donde más rápidamente pasa el calor por radiación, todos los cuerpos materiales atravesados absorben una cantidad mayor o menor. Para el aire puro y seco esta absorción es ligera, pero se eleva cuando el estado higrométrico aumenta. Las nubes se oponen bastante a la radiación; he aquí porqué, en las noches serenas, los cuerpos colocados en la superficie de la tierra se enfrían rápidamente, irradiando hacia el espacio. Esta pérdida de calor es, por el contrario, muy reducida cuando el cielo está cubierto.

Por lo demás, hay que establecer una distinción según la temperatura del cuerpo que emite el calor. Cuando está muy caliente, luminoso, las radiaciones caloríferas atraviesan con bastante facilidad ciertas substancias, como el cristal, que son casi opacas para el calor emanado de un cuerpo a temperatura más baja, es decir, para las radiaciones sombrías. Ocurre aquí un fenómeno análogo al que se encuentra en la transparencia de los cuerpos para las radiaciones luminosas. Tal cuerpo dejará pasar la luz roja, tal otro la luz verde, aquél la luz azul, etc. De la misma manera, existen cuerpos transparentes para las radiaciones caloríferas llamadas infrarrojas, que estudiaremos con motivo del espectro, otras para las radiaciones luminosas únicamente. Así, una solución de alumbre es tan transparente como un cristal blanco para las radiaciones luminosas, mientras que es muy opaca para las radiaciones caloríficas infrarrojas. Por el contrario, una solución de yodo en el sulfuro de carbono es muy transparente para las radiaciones infrarrojas y opaca para las radiaciones luminosas.

Resumen de la propagación del calor. — En general, un cuerpo no pierde o no gana calor exclusivamente por conductibilidad, por convección o por irradiación; de ordinario estas tres causas obran simultáneamente. Coloquemos un vaso que contenga agua caliente sobre una mesa, ¿cómo se enfriará ese vaso?

1.º Por conductibilidad: el calor del agua pasa a través de las paredes del vaso y se propaga de la misma manera al soporte.

2.º La superficie externa del vaso irradia calor hacia todos los cuerpos que le rodean.

3.º El aire se calienta al contacto de las paredes del vaso y arrastra calor por convección.

4.º Añadamos, en fin, puesto que hay agua, que esta agua se evapora sin cesar, roba 537 pequeñas calorías por gramo de agua que evapora; ésta es una fuente importante y en ocasiones hasta preponderante de enfriamiento.

Conclusiones prácticas. — Dos casos extremos pueden presentarse: *a.* Se desea que un cuerpo no varíe de temperatura.

Es preciso reducir las cuatro fuentes de pérdida que acabamos de indicar.

1.º Evitar la evaporación; en particular es preciso que la superficie del cuerpo no esté húmeda.

2.º Envolverlo con un cuerpo mal conductor del calor para impedir que éste llegue rápidamente al contacto del aire.

3.º En lo posible, arreglar que su superficie tenga un débil poder emisivo.

4.º Alejar los cuerpos fríos de las inmediaciones, puesto que tienen un gran poder absorbente; si no se les puede alejar, recubrirlos de una superficie de débil poder absorbente.

Las mismas reglas se aplican a los cuerpos que se quiere impedir que se calienten, en general a todos los cuerpos que se quiere preservar de los cambios de temperatura. Por esto se cubren con mantas los cuerpos que se desea conservar calientes, así como el hielo que se desea preservar de la fusión. Por esto, también se fabrican en metal bien pulido los calorímetros que no deben, en el límite de lo posible, cambiar de calor con el medio ambiente.

El tipo del aparato que se encuentra al abrigo de los cambios de temperatura es el vaso imaginado por d'Arsonval y destinado a la conservación del aire líquido, que no permanece en este estado sino con la condición de no ser calentado por la atmósfera ambiente.

Es un globo de cristal A (figura 244), plateado en la superficie para tener un débil poder emisivo. Este globo está soldado en otro globo más grande, plateado en su superficie externa de modo que forme espejo hacia el interior y tenga hacia este

interior un débil poder absorbente. Entre los dos globos se hace el vacío, por lo que resulta que la convección y la conductibilidad están suprimidas entre las dos cubiertas.

En un aparato de este género no hay, por decirlo así, cambio de calor entre el interior y el exterior, el aire se mantiene líquido en él durante largo tiempo.

b. Se quiere favorecer el enfriamiento de un cuerpo.

1.º Se mojará el cuerpo exteriormente, si es posible, de manera que se provoque una evaporación y, por lo tanto, una absorción de calor.

2.º Se podrá recubrir de negro de humo, cuerpo de gran poder emisivo.

3.º En ciertos casos, se le sumergirá en el agua fría, que robará mucho calor por conductibilidad y por convención. Teniendo el agua un gran calor específico, absorberá mucho calor para calentarse al contacto del cuerpo. El mercurio, que en igualdad de volumen tiene un calor específico superior al del agua y una conductibilidad mayor, le es superior en ciertos casos en que es necesario un enfriamiento muy rápido, por ejemplo, en el temple de ciertos utensilios.

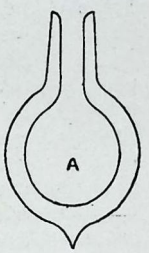


Fig. 244

4.º Cuando no se pueda hacer otra cosa, se agitará el aire en las inmediaciones del cuerpo para acelerar la pérdida por convección.

Estos pocos principios bastarán para encontrar, en cada caso, la manera de preservar un cuerpo de los cambios de temperatura o de favorecer estos cambios; con un poco de ingenio, se imaginará fácilmente en cada caso particular cómo hay que conducirse para llegar a una solución satisfactoria.

VIII. — Transformación de trabajo mecánico en calor y conservación de la energía

Consideremos un cuerpo que cae desde cierta altura; esta caída tiene lugar por el efecto de la atracción terrestre que desarrolla una fuerza determinada. El cuerpo recorre cierto camino que, multiplicado por la fuerza, es decir, por el peso

del cuerpo, da la expresión del trabajo gastado. Sabemos que este trabajo no se pierde, que se almacena bajo la forma de fuerza viva en el cuerpo en movimiento y que, mediante ciertos artificios, podemos hacerle reaparecer y disponer de él. Supongamos que el cuerpo, en su caída, llega a chocar contra el suelo y detenerse así; no hay fuerza viva, el trabajo consumido se ha perdido; ¿ha sido destruído sin provecho alguno? La experiencia demuestra que en el momento del choque el cuerpo se ha calentado, han aparecido un cierto número de calorías. Este fenómeno es absolutamente general, como está demostrado por numerosas experiencias. Siempre que veamos desaparecer el trabajo mecánico, sea por choque, sea por rozamiento, aparace el calor. Entre este calor que aparece y el trabajo mecánico desaparecido existe cierta relación constante: 425 kilográmetros dan una caloría. Esto equivale a decir, por ejemplo, que un cuerpo de 1 kg. de peso, cayendo desde 425 m. y bruscamente detenido en su carrera produce una caloría. De la misma manera si un cuerpo es arrastrado sobre el suelo y es necesaria una tracción de 1 kg. para desplazarlo, al cabo de 425 m. el roce habrá desprendido una caloría.

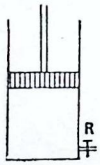


Fig. 245

Inversamente, si una máquina de vapor produce trabajo, si, por ejemplo, eleva un peso por medio de una cabria, se puede apreciar, mediante medidas delicadas, que por cada producción de 425 kilográmetros ha desaparecido una caloría.

Estas transformaciones inversas pueden ponerse en evidencia por el mecanismo siguiente. Consideremos un cuerpo de bomba cerrado (fig. 245). Si comprimimos el aire depositando un peso creciente sobre el pistón, hay consumo de trabajo por el descenso del pistón, pero el aire del cuerpo de bomba se calienta y por medio de mediciones se podría ver que aparece una caloría por cada 425 kilográmetros gastados en el descenso del pistón.

Descarguemos ahora poco a poco el pistón, remontará; a cada descarga parcial elevará un poco los pesos restantes, habrá producción de trabajo y el aire del cuerpo de bomba, en su parada, se enfriará en la misma proporción que cuando se hacía la operación inversa.

Se ve, pues, que si el trabajo mecánico produce calor desapareciendo, a la inversa, el calor produce trabajo mecánico. Se dice que la energía mecánica se transforma en energía calórica y recíprocamente. No hay pérdida, puesto que 425 kilográmetros producen 1 caloría que, por su parte, reproduce los 425 kilográmetros. Es lo que se llama principio de la equivalencia del trabajo mecánico y del calor.

La transformación de la energía puede ser mucho más compleja de lo que es en los ejemplos precedentes. Tomemos un salto de agua, el peso del agua que cae desde cierta altura da lugar a una producción de trabajo, que se evalúa en kilográmetros. Utilicemos este salto para hacer girar una turbina que actúa sobre una máquina dinamoeléctrica. La corriente producida por esta máquina podrá servir para calentar conductores o, por ejemplo, para descomponer el agua. El hidrógeno y el oxígeno procedentes de esta descomposición podrán ser quemados y dar calor. En fin de cuenta, si totalizamos todo el calor producido por las combustiones de hidrógeno y de oxígeno, el calentamiento de los hilos conductores, de los cojinetes de la dinamo y de la turbina, encontraremos tantas calorías cuantas veces haya consumido el salto de agua 425 kilográmetros. Es el principio de la conservación de la energía.

Este principio de la conservación de la energía es tan absoluto como el de la conservación de la materia; siempre que veamos aparecer energía, sea mecánica, sea calorífica, sea eléctrica, podemos afirmar que procede de una transformación de una energía presente bajo otra forma. Algunas veces esta fuente de energía está enmascarada para el que principia en la ciencia, pero siempre existe.

No es este lugar de exponer los diversos métodos que han permitido determinar el número 425, llamado equivalente mecánico del calor; se han instituído numerosas experiencias con este fin, todas han consistido en consumir una cantidad conocida de trabajo mecánico y en medir el calor aparecido. Se hacía, por ejemplo, girar un molinillo, o frotar dos superficies planas debajo del agua; se medía el trabajo desaparecido durante el movimiento del aparato. Por otra parte, se determinaba la elevación de la temperatura del agua, lo que permitía

calcular el número de calorías que aparecían. Siempre se apreciaba que la desaparición de 425 kilográmetros correspondía a la aparición de una caloría.

En un solo caso se ha intentado hacer la operación inversa: se ha producido trabajo a expensas de la desaparición de calor; pero, a consecuencia de dificultades experimentales enormes, el resultado no ha sido muy satisfactorio en cuanto a exactitud.

Energía potencial y energía cinética

Si un cuerpo pesado se encuentra a cierta altura por encima del suelo, es capaz, descendiendo, de producir determinado trabajo utilizable. Se dice que posee cierta *energía potencial.* Naturalmente, a medida que el cuerpo desciende, su energía potencial disminuye; si se le eleva de bajo arriba, su energía potencial aumenta. Una mezcla de cuerpos capaces, en su reacción química, de desprender calor, posee también cierta energía potencial; lo mismo ocurre con un trozo de carbón con el oxígeno necesario para quemarlo.

Cuando un cuerpo cae, o se produce una reacción química desprendiendo calor, la energía potencial en reserva disminuye y da lo que se denomina *energía actual o cinética,* directamente utilizable. Inversamente, la energía cinética puede ponerse en reserva en el estado de energía potencial.

Tomemos un ejemplo sencillo. Un cuerpo a cierta altura posee energía potencial. Cae, poco a poco la energía potencial disminuye mientras que la energía cinética aparece bajo la forma de fuerza viva, del cuerpo en caída. Inversamente, lancemos un cuerpo de bajo arriba. El cuerpo parte con cierta velocidad, tiene una determinada fuerza viva; pero, poco a poco, a medida que el cuerpo sube, su energía cinética disminuye, mientras que su energía potencial aumenta hasta que la velocidad queda reducida a cero, y toda la energía cinética está almacenada en el cuerpo en el estado de energía potencial, y así permanecerá hasta que se deje caer el cuerpo de nuevo.

Rendimiento de los motores

Consideremos un salto de agua que alimenta una turbina; esta turbina sirve para accionar una cabria que eleva un peso. Toda la energía mecánica consumida por el salto de agua deberá encontrarse de nuevo. Como los aparatos de que se compone esta instalación no son perfectos, sino que hay roces y otras causas de pérdidas diversas, para cada kilográmetro consumido en la caída, no dispondremos de un kilográmetro en la cabria, sino que, por ejemplo, no podremos levantar más que 0,6 kg. a 1 m., lo que da 0,6 kgm. La diferencia, o sea, 0,4 kgm., se habrá empleado en vencer los roces, perdido en escapes de agua, etc. Se ha consumido, pues, 1 kilográmetro y no se ha utilizado más que 0,6 kgm. Se dice que $\frac{0{,}6 \text{ kgm.}}{1 \text{ kgm.}}$ es el rendimiento del motor.

Ningún motor es perfecto; el rendimiento es, por consiguiente, siempre más pequeño que la unidad: será de 0,4, 0,5, 0,6, etc., según que por cada kilográmetro consumido se recoja 0,4, 0,5, 0,6, etc. kilográmetros utilizables. Con frecuencia se expresa el rendimiento refiriéndose a un consumo de 100 kilográmetros, para evitar los números fraccionarios, y se dice que un motor tiene un rendimiento de 40 por 100, 50 por 100, 60 por 100, etc.

Rendimiento de los motores térmicos

Hemos visto que en las transformaciones de trabajo en calor o de calor en trabajo, se encuentra siempre al final de la operación la misma cantidad de energía que antes; no obstante, hay una diferencia capital en los dos modos de operar.

Para hacer comprender esto, consideremos una máquina esquemática reducida a un cuerpo de bomba provisto de un pistón que por sí mismo no tenga ningún peso (fig 246). Vamos a poder, a voluntad, utilizarla para transformar el trabajo mecánico en calor o el calor en trabajo mecánico. En primer lugar, supongamos el pistón en lo alto de su carrera y el cuerpo de bomba lleno de aire. Coloquemos pesos cada vez mayores sobre

el pistón, descenderá y tendrá cierto consumo de trabajo. Durante este tiempo, el aire comprimido se habrá calentado por el hecho mismo de la compresión; abriendo la llave R podremos recoger aire caliente que habrá adquirido un número de calorías equivalente al trabajo consumido, y que podremos utilizar haciendo volver el aire a su temperatura primitiva. Podremos repetir esta operación un gran número de veces y transformar siempre integralmente el trabajo en calor, durante tanto tiempo cuanto tegamos pesos a nuestra disposición al nivel superior del pistón elevado. No habrá, pues, ninguna energía mecánica disponible al fin; todo habrá sido transformado en calor.

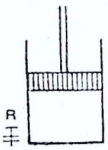


Fig. 246

Procuremos ahora realizar la operación inversa. Coloquemos una pequeña cantidad de aire en el cuerpo de bomba y calentemos; la presión aumentará y podremos levantar un peso, es decir, producir un trabajo mecánico. Una vez llegado el pistón a lo más alto de su carrera y levantado el primer peso, para poder recomenzar, nos será necesario enfriar el aire del cuerpo de bomba a su temperatura primitiva, le quitaremos cierta cantidad de calor. Por lo tanto, el calor suministrado para ejecutar el trabajo, se ha repartido en dos fracciones: una ha sido transformada en trabajo, otra ha permanecido en estado de calor y será perdida para la operación siguiente. Podremos recomenzar esta maniobra todo el tiempo que tengamos a nuestra disposición calor para calentar el aire, pero siempre que no transformemos en trabajo mecánico más que una parte de este calor; no habrá transformación integral como en el caso de la transformación de energía mecánica en calor.

Siempre nos encontraremos con la misma dificultad. Cuando se quiera, por medio de una operación que se volverá a repetir un número de veces mayor o menor, transformar calor en trabajo, únicamente se podrá transformar una cierta proporción de este calor.

La proporción de calor que se puede transformar depende de los límites de temperatura en que se opera; Sadi-Carnot ha formulado la ley que regula el límite de rendimiento del que no se puede pasar, sea cual fuere la perfección del

mecanismo empleado, cuando se quiere por una operación repetida, transformar el calor en trabajo. Esta ley puede resumirse de la manera siguiente:

Cuando se tiene calor para transformarlo en trabajo, estando este calor a la temperatura T_1 al principio de la experiencia y T_2 al final, el límite de rendimiento del que no se puede pasar, lo da la expresión

$$r = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Si, por ejemplo, se tiene calor a la temperatura de 120° C., es decir, $120^\circ + 273^\circ = 393^\circ$ en temperatura absoluta; si, por otra parte, el calor no transformado en trabajo está a la temperatura de 20° C., es decir, $20^\circ + 273^\circ = 293^\circ$, en temperatura absoluta, al final de la operación, la relación entre el calor transformado y el calor total empleado, es decir, el rendimiento, no podrá ser superior a

$$r = \frac{393^\circ - 293^\circ}{393^\circ} = \frac{100^\circ}{393^\circ} = 0{,}25^\circ$$

Este es un límite superior, notémoslo bien; en general, a consecuencia de la imperfección de los métodos, el rendimiento será inferior a este valor.

Resumen de los dos principios fundamentales

1.° **Principio de la conservación de la energía** (cuyo descubrimiento debe remontar a Meyer, Joule y Colding). — La energía mecánica puede transformarse en energía calorífica y viceversa. Esta energía puede encontrarse bajo otras distintas formas: química, eléctrica, etc., pero no hay pérdida en estas transformaciones. Si, al principio de una serie de operaciones se tiene un cierto número de calorías, después de pasar por las varias formas de energía, terminando todo en calor al fin, se encuentra el mismo número de calorías que al principio.

2.° **Principio de Sadi-Carnot.** — Cuando se produce trabajo mecánico repitiendo una operación que consume calor, no

hay más que una parte de este calor que sea transformable en trabajo; el resto persiste siempre bajo forma de calor; es como una excreción. La relación del calor transformable con el calor total está limitada por las condiciones de temperatura de las operaciones y, en las condiciones más favorables, no puede pasar jamás de

$$r = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Siendo T_1 la temperatura absoluta más elevada de que se dispone, T_2 la temperatura más baja.

IX. — Calorimetría

La calorimetría o medida de las cantidades de calor es, entre todas las especies de medidas, la más difícil de realizar con exactitud. Esto depende de que experimentamos una dificultad extrema en aislar la cantidad de calor que queremos medir, en no perder nada ni añadir nada.

Supongamos, por ejemplo, que queremos medir la cantidad de calor necesaria para hacer pasar cierto volumen de agua 0° a 100°. Esta agua no tiene la misma temperatura que el medio ambiente y que los cuerpos de las inmediaciones, perderá calor durante la experiencia y todas nuestras mediciones estarán falseadas. En casi todas las operaciones, en ocasiones bastante largas, que nos vemos obligados a realizar para medir las cantidades de calor, es imposible evitar las pérdidas y, por lo tanto, los errores.

Los métodos calorimétricos empleados para el estudio del calor específico de los cuerpos, de los calores de fusión o de vaporización, de la producción de calor en las reacciones químicas y, de una manera general, de los fenómenos caloríficos de los cuerpos no organizados, se encuentran en los tratados generales de Física y de Termoquímica, a los que remitimos para ello. Estos métodos no son, en general, aplicables al calor animal; ahora vamos a describir los principales de los que son utilizables en estos casos. Por lo demás, nos contentaremos con exponer el principio sobre un modelo esquemático sin entrar en los detalles, en ocasiones extremadamente delicados, cuyo estudio traspasaría los límites que nos hemos impuesto.

Método de Laplace y Lavoisier (fig. 247). — El animal cuya producción de calor se quiere estudiar es colocado en un recinto *A* rodeado de hielo machacado *B*. Se evaluará el calor desprendido pesando o midiendo la cantidad de agua producida por fusión. Cada gramo corresponderá a 79,25 pequeñas calorías. Para proteger el aparato contra el calor aportado o sustraído por la atmósfera ambiente, todo el aparato se encuentra colocado en un recipiente que contiene también hielo machacado *C*. En general, se encontrará una temperatura exterior superior a 0°; una parte del hielo *C* será fundido, pero el agua que resulte se derramará por *c* y no entrará en el cálculo; ningún calor procedente del exterior podrá llegar hasta *B*. Toda el agua que sale por *b*, es producida por la fusión de *B* y provendrá, por consiguiente, del calor producido por *A*.

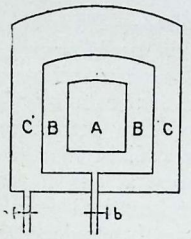


Fig. 247

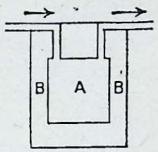


Fig. 248

El inconveniente de este procedimiento estriba en que es poco sensible; es necesario, en efecto, mucho calor para fundir un poco de hielo; por otra parte, nunca se está seguro de que toda el agua se derrama por *b;* una parte adhiere a la superficie de los trozos de hielo. En fin, no se puede operar más que a 0°, y a esta temperatura muchos animales, reducidos a la inmovilidad, sufren; se está en condiciones anormales.

Método de Dulong. — El animal se encuentra en un recinto *A* (fig. 248) recorrido por una corriente de aire y rodeado de agua *B*. Se mide la elevación de la temperatura del agua cuyo peso se conoce. Este método ha sido empleado de nuevo en estos últimos años, y considerablemente perfeccionado. En su forma primitiva, estaba, en efecto, sujeto a importantes errores, procedentes de los cambios de tempera-

tura del aparato con el medio ambiente. Se puede, para tener conocimiento de estos cambios, realizar una experiencia colocando en la cavidad A un cuerpo que desprenda una cantidad de calor conocida; al realizar la medida no se encontrará todo este calor. La diferencia entre lo que se debía haber encontrado y lo que se encuentra en realidad, da la pérdida. De ello se deduce la corrección que hay que hacer cuando se realiza la experiencia con un animal.

Método de Hirn. — Un calorímetro que ha sido muy empleado, con o sin modificaciones, es el de Hirn. El animal es colocado en un recinto, al que cede el calor y del que, por consiguiente, la temperatura se eleva. Llega un momento en que esta temperatura permanece estacionaria; esto ocurre cuando el calor suministrado por el animal al calorímetro, es precisamente igual al que el aparato pierde por radiación. Para evaluar esta cantidad de calor en calorías, se reemplaza el animal por una fuente de calor conocida, mechero de gas, lámpara de alcohol que consuma una cantidad conocida de alcohol por minuto, resistencia eléctrica recorrida por una corriente, etc., y se ve en qué condición se encuentra un equilibrio. Si, en el primer caso, la pérdida del calorímetro era $Q = A\ (T - t)$ dada por la ley de Newton, siendo T y t las temperaturas del calorímetro y del medio ambiente, en el segundo esta pérdida será $Q' = A\ (T' - t')$. La segunda fórmula, en que todo es conocido menos A, permite calcular A. Llevando el valor de A a la primera se tendrá el valor de Q.

Estos diversos procedimientos tienen todos un inconveniente: no se dispone a voluntad de la temperatura en el interior del calorímetro, esta temperatura varía durante la experiencia. Los mecanismos que vamos a indicar ahora no tienen este inconveniente.

Método de d'Arsonval. — En el calorímetro de d'Arsonval (figura 249) el animal se encuentra en una cámara A de doble pared. El espacio anular está lleno de agua a la temperatura de la atmósfera ambiente. Además, un serpentín atraviesa este espacio anular. Supongamos que se tenga en A un desprendimiento de cierta cantidad de calor, la temperatura del agua tiende a

elevarse, pero inmediatamente funciona un regulador sobre cuyo mecanismo no es ocasión de insistir, cierta cantidad de agua a 0° se derrama en el embudo y, pasando a través del serpentín, baja la temperatura del espacio anular. En cuanto se ha alcanzado la temperatura primitiva, el derrame de agua a 0° se detiene. Ahora bien; como la temperatura del agua del calorímetro permanece constante, si la temperatura del medio ambiente no cambia, el derrame del agua a 0° ha bastado para compensar el calor suministrado por el animal solo. Basta, por consiguiente, conocer el peso o el volumen del agua derramada para tener en cada instante la cantidad de calor desprendido en A. Este calorímetro es muy bueno; la única dificultad en su empleo consiste en mantener constante la temperatura del aire ambiente, porque, evidentemente, si la atmósfera cede o substrae calor al calorímetro, el derrame de agua a 0° es muy abundante o muy escaso; no es la exacta compensación del calor suministrado por A sólo.

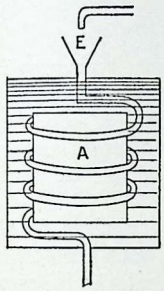


Fig. 249

Sobre este mismo principio, con algunas modificaciones y perfeccionamientos, se construyen los calorímetros de Rübner, de Atwater y de Lefèvre.

Calorímetro de Atwater. — El calorímetro de Atwater es una verdadera cámara en donde un hombre puede permanecer muchos días acostándose en ella, tomando en ella sus comidas y haciendo la vida habitual. Esta cámara es de doble pared, para evitar las pérdidas; se evalúa el calor desprendido por la cantidad de agua fría necesaria para mantener constante la temperatura del calorímetro.

Además, esta cámara calorimétrica está atravesada por una corriente continua de aire, cuyo análisis a la salida permite determinar los cambios respiratorios del sujeto. Por último, todos los alimentos y excreciones son cuidadosamente analizados y pesados.

Los resultados obtenidos con ayuda de este magnífico aparato figuran entre los más importantes de la fisiología.

Estas ligeras nociones sobre los calorímetros bastan para hacer comprender los diversos métodos que han sido empleados, no siendo los restantes dispositivos más que variantes de los que acabamos de describir rápidamente.

X. — Calor animal

El calor desprendido por los animales es la consecuencia de las combustiones que se realizan en sus tejidos. Este principio, enunciado por primera vez por Lavoisier, ha sido, después de muchas e infructuosas tentativas de diversos experimentadores, definitivamente establecido por Rübner en el perro y por Atwater en el hombre.

Se producen en el organismo reacciones químicas de diversa índole, que desprenden o en ocasiones pueden absorber calor; pero, en último término, si se hace el cálculo del calor susceptible de ser desprendido por la combustión de los alimentos ingeridos y se resta el residuo de calor que podrían aún desprender, los excreta, se tiene una diferencia que corresponde precisamente al calor producido por el animal en experiencia. El hecho de respirar en el oxígeno puro, no modifica la cantidad de calor desprendido en el mismo tiempo.

La importancia de este hecho, que ha abierto una nueva era a la fisiología, exige que insistamos un poco sobre él.

Después que Lavoisier hubo mostrado el mecanismo de las combustiones, el papel del oxígeno y la naturaleza del anhídrido carbónico, se preguntó si el calor animal no era también la consecuencia de una combustión análoga a la que se producía para el carbón en el aire. Sus experiencias sobre este asunto, las de Dulong, de Despretz y otros no bastaron para establecer que todo el calor animal es debido a las combustiones intraorgánicas. Después de mediados del siglo último, existían todavía fisiólogos que dudaban que se pudiera llegar nunca a eso, o se preguntaban si una parte del calor no provenía del roce de la sangre en los vasos, de alguna acción nerviosa, o de otros fenómenos de los que no podemos actualmente comprender la misteriosa influencia.

Berthelot fué el primero que planteó claramente el problema. He aquí en qué consiste en principio.

En primer lugar, es preciso medir con el calorímetro todo el calor suministrado por un sujeto en un tiempo determinado, 24 horas, por ejemplo. En segundo lugar, evaluar el calor producido en el mismo tiempo por las reacciones químicas de que el organismo es asiento. Sobre este segundo punto es sobre el que todos los autores se habían equivocado, creyendo poder hacer esta evaluación según el oxígeno consumido y el anhídrido carbónico producido. En realidad, la termoquímica nos enseña que para saber la cantidad de calor desprendido por un cuerpo que arde, es preciso conocer lo que se llama calor de combustión de los cuerpos. Si se miden los pesos y el *calor de combustión* de todas las substancias ingeridas en 24 horas, se puede deducir lo que la alimentación proporciona a este organismo, pero hay que descontar lo que es eliminado por los excreta, pesando estos excreta, analizándolos y determinando el calor de combustión de las substancias que en ellos se encuentran. La diferencia entre el calor que pueden proporcionar los ingesta y el calor que queda en estado potencial en los excreta, debe dar el calor liberado en el organismo. La experiencia ha demostrado que ocurre así. En las hermosas experiencias de Atwater, no hubo más que una diferencia de 1/20.000 entre el calor directamente medido en el calorímetro y el calor calculado por el método que acabamos de indicar.

Hay que hacer notar que esta experiencia supone que al cabo de 24 horas el sujeto sobre quien se opera ha vuelto al estado primitivo, que no hay en él ni retención ni eliminación de materia; éstas son dificultades sobre las que no hay que insistir aquí.

Se puede, pues, afirmar actualmente que todo el calor producido por los animales procede de combustiones y transformaciones químicas análogas a las que apreciamos *in vitro* en el laboratorio.

Los alimentos que sirven de combustible al organismo se componen de hidratos de carbono, de grasas y de albuminoideos. Los dos primeros no dejan como residuo de su combustión más que agua y anhídrido carbónico; para los albumi-

noideos queda, además, la urea. Rübner, mediante experiencias realizadas con gran cuidado, ha determinado el número de calorías producidas por la combustión en el organismo de estas tres series de cuerpos; he aquí las cifras consideradas por él como dignas de ser adoptadas en la práctica, por 1 gr. de substancia:

Grasas	9,3 calorías
Albúmina	4,1 —
Hidratos de carbono	4,1 —

Podrán utilizarse, para calcular el valor calorífico de un alimento cualquiera, cuya composición, en grasa, albúmina e hidratos de carbono sea conocido.

El calor así producido en el organismo tiene diferentes destinos; para dar de ello una idea, vamos a reproducir el cuadro, trazado por Richet, de la pérdida térmica en 24 horas de un hombre de talla media, de 70 kg. de peso, suponiéndole en reposo.

Durante estas 24 horas el hombre produce y pierde, aproximadamente, 2.400 calorías, distribuídas así:

Calefacción de las bebidas y de los alimentos	50 calorías
Calefacción del aire inspirado	100 —
Disociación del CO^2	100 —
Evaporación cutánea	250 —
— pulmonar	350 —
Radiación cutánea	1550 —

Veremos más adelante lo que se produce durante el trabajo.

Estas cifras nos demuestran la influencia predominante de la radiación cutánea, y se comprende que todas las condiciones que hagan variar esta radiación tendrán una considerable influencia sobre la calorificación de los animales.

Es evidente que esto no se aplica más que a los homeotermos. En primer lugar, cuanto más grande sea el animal, más pierde y, por lo tanto, más calor produce para mantenerse a temperatura constante, porque su superficie aumenta al mismo tiempo que la talla, y la radiación cutánea aumenta con la superficie.

Si se quiere referir la cantidad de calor producido por las combustiones en los tejidos a la unidad de peso del animal, a 1 kg., por ejemplo, se encuentra que la calorificación disminuye a medida que el animal es más voluminoso. He aquí, a título de ejemplo, para los conejos, algunas cifras, dadas por Richet con este fin; representan el número de calorías producidas por kilogramo de animal en un mismo tiempo:

Conejos de 200 a 800 gramos	7,50
— de 2000 a 2200 —	4,73
— de 3400 a 3800 —	2,69

El hecho es de los más claros. Esto depende de que el animal no produce más que el calor que pierde, y las pérdidas son proporcionales a la superficie y no a su peso. Si referimos la calorificación a la unidad de superficie y no a la de peso, he aquí lo que encontramos:

Conejos de 500 gramos	11,8 calorías
— de 2100 —	11,3 —
— de 3100 —	10,1 —

Es decir, sensiblemente la misma cifra.

Considerando este último punto como establecido, se comprende fácilmente porqué la calorificación por unidad de peso disminuye cuando la talla aumenta; basta, en efecto, demostrar que en estas condiciones la superficie disminuye también. Tomemos ahora un cuerpo cualquiera, un pilón de azúcar, por ejemplo, y cortémosle en dos partes; no habremos cambiado el peso, pero habremos aumentado la superficie de contacto del azúcar con el aire. Siempre que hagamos una nueva sección para fragmentar el azúcar, aumentaremos la superficie sin cambiar el peso. Por lo tanto, en igualdad de peso, la superficie de los cuerpos es tanto mayor cuanto más pequeños son los fragmentos. Lo mismo ocurre en los animales: un hombre de 70 kg. de peso tendrá una superficie menor que el conjunto de siete perros de 10 kg. cada uno. Estos perros, a su vez, tendrán una superficie menor que 35 conejos de 2 kg. cada uno, y así sucesivamente; dicho de otra manera: en igualdad de peso, los animales tienen una superficie tanto mayor cuanto más pequeños son y, por consiguiente, como antes hemos visto,

pierden y producen más calor. De ello resulta que, en los animales pequeños, las combustiones son más activas, la respiración es más rápida y el corazón late más aprisa.

Otro elemento importante en la pérdida de calor es el estado de la superficie, en particular la naturaleza de la piel, el espesor y la conductibilidad de los vestidos.

Si comparamos, por ejemplo, los animales de piel desnuda, de piel de poco pelo y de piel de mucho pelo, este hecho resalta claramente. He aquí la cantidad de calor desprendida en estos tres casos, por unidad de superficie:

Niños	16,2 calorías
Perros	14,4 —
Conejos	10,5 —

Lo mismo ocurre si comparamos los conejos normales con conejos afeitados:

Conejos normales	9,96 calorías
— afeitados	15,86 —

El hecho de barnizar un conejo o embadurnar su piel de aceite de linaza, acelera mucho la pérdida de calor, hasta el punto de que se enfría y acaba por morir de frío si no se les coloca en lugar calentado. Hasta el mismo color del pelaje tiene cierta influencia; Richet ha demostrado que los conejos blancos pierden menos calor que los conejos grises y éstos menos que los conejos negros.

En lo concerniente a los vestidos del hombre, para demostrar su influencia considerable como protector contra la pérdida de calor, nos bastará citar una experiencia de d'Arsonval, refiriéndose a una hora:

En ayunas, derecho y desnudo . .	125,4 calorías
— — y vestido . .	79,2 —

Según Lefèvre, el calor irradiado crece a medida que la temperatura desciende (1904).

El efecto producido por las variaciones del medio ambiente es extremadamente importante y los resultados de la experiencia no concuerdan con lo que el razonamiento podía hacer prever. Teniendo en cuenta la ley de Newton, según la cual la pérdida de calor experimentada por un cuerpo es tanto mayor

cuanto mayor es la diferencia que existe entre su propia temperatura y la del medio ambiente, se debía creer que los animales pierden tanto más calor cuanto más baja es la temperatura. Ahora bien; no ocurre esto más que dentro de cier-

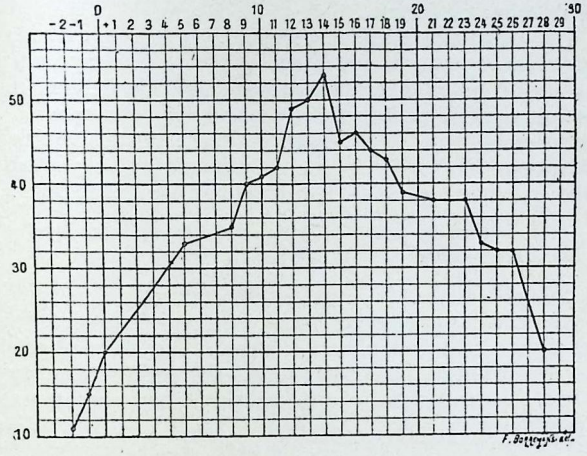


Fig. 250

tos límites, y d'Arsonval ha sido el primero en señalar ciertas discordancias.

La curva (fig. 250) trazada por Richet, según sus experiencias sobre los conejos, nos muestran que bajando la temperatura de 28° a 14°, la irradiación aumenta como se preveía, pero a partir de este momento ocurre un hecho extraño: continuando el descenso de la temperatura, el conejo pierde cada vez menos calor, se defiende cada vez más contra esta pérdida. Parece, pues, haber un óptimo de irradiación a 14° para estos animales; lo mismo ocurre para el conejillo de Indias, y probablemente para todos los mamíferos; pero no se le encuentra en las aves, o, por lo menos, si este óptimo existe, es mucho más bajo y fuera de los límites de temperatura en los que se ha podido operar.

En realidad, el no cumplimiento de la ley de Newton no

es más que aparente. Cuando la temperatura exterior desciende mucho, la piel puede enfriarse, desde entonces la diferencia de temperatura entre esta piel y el aire ambiente puede disminuir y, conforme a la ley de Newton, las pérdidas de calor restringirse.

Hay que decir, además, que durante las investigaciones recientes, Lefèvre no ha encontrado el óptimo de temperatura. Según este autor, la irradiación iría aumentado de una manera constante, a medida que la temperatura desciende.

En el baño no se encuentra el óptimo de temperatura; cuanto más frío está el baño, más grandes son las pérdidas, como lo demuestra la siguiente serie tomada en el hombre:

Temperatura del baño . .	5°	12°	17°	22°	26°	30°
Calorías perdidas en 12' .	300	200	130	80	40	15

Sabemos que en la fiebre la temperatura del cuerpo se eleva, según nos manifiesta el termómetro; pero este efecto podría depender de dos causas diferentes. O bien la pérdida de calor está reducida, o las combustiones del organismo son más activas. La experiencia ha demostrado que hay que atenerse a la segunda explicación.

Influencia del trabajo muscular sobre la calorificación

Cuando un músculo pasa del estado de reposo al de actividad, las combustiones intramusculares aumentan. Este hecho ha sido puesto en evidencia por primera vez por Cl. Bernard. Analizando, en efecto, los gases de la sangre de la arteria que va a un músculo y de la vena que de él parte, ha podido determinar la proporción de oxígeno consumido y el anhídrido carbónico producido en los diversos casos. Ha visto también que en el músculo normal, en relación con los centros nerviosos, pero en reposo, los cambios son más activos que en el músculo privado de todo tonus por la sección del nervio motor, y menos activo que en este músculo produciendo trabajo. No obstante, esta experiencia, que no está al abrigo de la crítica, está falseada por el hecho de que las combustiones intramusculares no dependen solamente de las proporciones de gas que se encuentra en la sangre, sino también de la cantidad

de sangre que atraviesa el músculo. Ahora bien; cuando se pasa del estado de reposo al de actividad, la velocidad de la corriente sanguínea aumenta mucho, tanto que la respiración del músculo puede estar muy activada aunque en el mismo volumen de sangre sólo hubiera poca diferencia entre el estado de los gases durante el reposo y durante la actividad.

Chauveau ha continuado estas experiencias en un músculo particularmente favorable para esta clase de investigaciones: el elevador del labio superior del caballo, que se puede hacer trabajar en condiciones fisiológicas dando de comer al animal, y que tiene la gran ventaja de no tener más que una sola vena eferente, lo que permite fácilmente conocer el débito en cada caso, midiendo el volumen de la sangre que se derrama por esta vena. Los análisis de los gases se han hecho con el mayor cuidado y Chauveau ha podido demostrar así, de una manera absolutamente cierta, el aumento considerable de las combustiones durante el trabajo.

He aquí el resumen de estos resultados:

	Reposo	Trabajo	Alimento
Volumen de sangre que atraviesa el músculo	12 l. 229	56 l. 321	1 a 4,6
Oxígeno consumido	0 l. 307	6 l. 207	1 a 20,21
Anhídrido carbónico producido.	0 l. 221	7 l. 835	1 a 35,5

Podía preverse este aumento de las combustiones con el trabajo, porque se produce energía mecánica que no puede crearse de cualquier manera y debe tener su origen en alguna parte; ésta no puede estar más que en las combustiones del organismo. Como ni aún en el estado de reposo están paralizadas estas combustiones, habrían podido, sin aumento, ser la fuente del trabajo exterior, pero entonces habría un déficit de calor, el cuerpo se habría enfriado. Este enfriamiento es contrario a la experiencia; se sabe, por el contrario, por la más superficial observación, que el cuerpo del animal se calienta durante el trabajo. Resulta que cuando se pasa del estado de reposo al de actividad, no solamente las combustiones au-

mentan para proporcionar la energía necesaria para el trabajo exterior, sino que se acrecen en mayor proporción que sería necesario, puesto que la cantidad de calor libre desprendido aumenta también.

El calor desprendido por los músculos durante el trabajo ha sido objeto de numerosos estudios; pero, a consecuencia de las considerables dificultades que rodean este género de experiencias, en lugar de medir en calorías el calor producido, se ha debido, en general, contentarse con determinar la elevación de temperatura en los diversos casos. De este modo, no se han podido hacer más que comparaciones, es decir, reconocer que el calor desprendido en ciertas condiciones es superior al que se desprende en otras, pero no se han podido establecer relaciones numéricas entre la calorificación y las condiciones del trabajo.

Heidenhain ha demostrado en la rana que, en ciertos límites, durante la contracción, la temperatura del músculo se eleva tanto más cuanto más grande es el peso que se le hace elevar. Se eleva también más cuando se impide al músculo que se acorte, es decir, cuando da una contracción isométrica, que cuando da una contracción isotónica.

En el hombre, Chauveau ha hecho ver que en el sostén del peso, el calor desprendido en el músculo contraído es tanto mayor cuanto más grande es el peso y el músculo se encuentra en mayor grado de acortamiento.

Es preferible contentarse con estas indicaciones sumarias para no caer en el detalle de cuestiones todavía muy difíciles.

Rendimiento de los motores animados

Hemos visto antes lo que se entiende, en general, por rendimiento de un motor. En el hombre y en los animales la consideración del rendimiento se complica un poco, a consecuencia del hecho de que aún en reposo absoluto, el organismo tiene necesidad de ser alimentado.

Estudiemos un trabajador que produce durante la jornada 212,500 kilográmetros. Sabemos que 425 kilográmetros equivalen a 1 caloría; por consiguiente, 212,500 kilográmetros

equivaldrán a 500 calorías, que deberán ser suministradas por la alimentación del trabajador.

Ahora bien; podemos considerar, que término medio, un hombre robusto tiene necesidad, en reposo, de una ración de sostén capaz, por su combustión, de proporcionar aproximadamente 2,500 calorías.

Cuando este hombre se entregue a un trabajo, será preciso, para mantenerle en equilibrio de nutrición, aumentarle su ración. Podría uno preguntarse si no sería suficiente añadir a su ración de reposo las 500 calorías necesarias para el trabajo. La experiencia demuestra que no es así. Cuando el hombre o un animal pasa del reposo al trabajo, el exceso de las combustiones no es completamente empleado a la producción de este trabajo. Para realizar un trabajo equivalente a 1 caloría, por ejemplo, es preciso, en realidad, producir 5 calorías más que en reposo. Para el sujeto que hemos tomado para ejemplo, sería necesario, pues, cuando pase del reposo al trabajo, dar un aumento de ración de $500 \times 5 = 2{,}500$ calorías. Este hombre tendría entonces necesidad de una ración diaria de 5,000 calorías.

¿Entonces, cuál sería el rendimiento de este hombre? Desde el punto de vista práctico, comercial, se puede decir, como es necesario un consumo de 5,000 calorías y produce un trabajo equivalente a 500 calorías, su rendimiento es de 1/10 ó 10 por 100.

Desde el punto de vista fisiológico, podemos razonar de otro modo. Cuando funcionan los órganos, en particular cuando entran los músculos en actividad, hay un acrecentamiento en el gasto del organismo; solamente debemos tomar en consideración este acrecentamiento para saber cuál es el rendimiento. Lo que cuesta el reposo sería gastado de todas maneras. En el ejemplo estudiado antes, cuando queremos hacer producir trabajo al obrero, esto no nos cuesta, en realidad, más que 2,500 calorías, puesto que las calorías del reposo deben ser inevitablemente suministradas.

Es, pues, con 2,500 calorías proporcionadas de más con lo que producimos 500 calorías útiles; el rendimento será 1/5 o sea, 20 por 100.

Se ha buscado también, operando sobre un solo músculo,

evaluar lo que puede producir este músculo, y cuáles son las combustiones y acrecentamiento de combustión que en él se producen; es decir, determinar el rendimiento de este órgano aislado para decir lo mismo del resto del organismo. Estas determinaciones no tienen ningún alcance práctico, pero sí un gran interés teórico, puesto que tienen por fin estudiar la naturaleza misma de la contracción muscular y los orígenes inmediatos de la energía necesaria para el trabajo.

En estas investigaciones, extremadamente delicadas, se han obtenido rendimientos variables, en general, superiores al 20 por 100.

Regulación del calor en los animales

El problema de la regulación del calor no se plantea más que en los homeotermos, porque en los heterotermos esta regulación no existe, se ponen sensiblemente a la temperatura del medio ambiente. En los mamíferos y las aves, hay sin cesar un desprendimiento de calor suficiente para subvenir, en las condiciones habituales, a las diversas causas de pérdida y mantener el cuerpo del animal a temperatura sensiblemente constante.

La producción de calor resulta de las transformaciones de los alimentos ingeridos y de las combustiones que tienen lugar en el interior del organismo, principalmente en los músculos. La energía puesta en libertad por estas transformaciones químicas, intraorgánicas, no es más que en pequeña parte utilizada en trabajo exterior, sobre todo en las condiciones ordinarias de la vida; es casi por completo irradiada en el estado de calor, o sirve para la vaporización del agua en la superficie de la piel y de los pulmones.

A una temperatura media, la que se tiene habitualmente en las habitaciones, las pérdidas de calor de un hombre o de un animal en reposo son exactamente compensadas por las ganancias, de modo que la temperatura de este hombre o de este animal permanece constante. Para mayor sencillez, supongámosle en ayunas; vive de sus reservas, en particular de sus grasas, que, después de una serie de transformaciones, sobre las que falta hacer bastante luz, son eliminadas en

estado de agua y de anhídrido carbónico. Ya he dicho que una parte importante de estas transformaciones y combustiones tienen lugar en los músculos. El hombre pierde toda su energía así puesta en libertad, en estado de calor irradiado y de calor latente de vaporización. Despreciemos, por ahora, las otras pérdidas.

Si la temperatura del aire ambiente desciende, parecería a primera vista que, como para todo cuerpo caliente, la temperatura interna del sujeto debe disminuir igualmente; pero entonces interviene la regulación.

Los vasos de la piel disminuyen su calibre por vasoconstricción, de modo que se disminuya la actividad de la circulación periférica, el aporte del calor interno a la piel y, por consiguiente, la irradiación de este calor. La evaporación es también menos activa y como consecuencia de estos dos fenómenos las pérdidas están disminuídas.

Al mismo tiempo, a consecuencia de una excitación producida por el frío en la superficie de la piel y por vía refleja, las combustiones intraorgánicas, son aceleradas, y si es preciso, el escalofrío interviene para exagerar la actividad de los músculos.

Por lo tanto, por estas dos razones: disminución de las pérdidas y aumento de los ingresos de calor, la temperatura del cuerpo no bajará.

Las circunstancias pueden hacer que la temperatura del aire ambiente, en lugar de descender, se eleve. En estas circunstancias, las combustiones intraorgánicas, siempre por vía refleja, pueden retardarse, al menos dentro de ciertos límites; pero sobre todo las pérdidas están exageradas. Los vasos periféricos se dilatan, la circulación cutánea se hace muy activa, hay un gran aporte de calor a la superficie del cuerpo para favorecer la irradiación. Al mismo tiempo, se establece una sudación más o menos importante, y como la vaporización del agua necesita un gran número de calorías, se concibe el papel capital de esta sudación en la producción de las pérdidas de calor.

He equí, pues, cómo estos diversos factores, combustiones intraorgánicas y pérdidas por irradiación o vaporización, pueden intervenir para mantener constante la temperatura del

cuerpo en los homeotermos. Estos fenómenos están bajo la dependencia de un sistema regulador que obra por vía refleja, encontrándose el punto de partida del reflejo en las terminaciones nerviosas de la piel. No disponemos de lugar para entrar en el estudio detallado de este reflejo y de los centros nerviosos en los que se produce.

Tampoco diré nada de la manera cómo la regulación de la temperatura puede ser modificada o trastornada por la ingestión de los alimentos.

CUARTA PARTE

RADIACIONES

I. — Constitución de las radiaciones

La luz que nos llega del sol o de las diversas fuentes luminosas no es una cosa simple. Newton demostró antes que nadie que haciendo caer un haz luminoso procedente del sol sobre un prisma de cristal, el haz era no solamente desviado de su dirección primitiva, sino que sufría modificaciones de color según una ley constante. La luz incidente era blanca y daba una mancha de este color sobre una pantalla interpuesta en el trayecto del haz. Al pasar a través del prisma se producía, por refracción, una desviación hacia la base de este prisma, al mismo tiempo que una extensión perpendicular a la arista. Vista de frente la mancha sobre la pantalla, presentaba, antes del prisma, el aspecto *A*, y después del prisma, el aspecto *B*. La mancha *B*, en lugar de ser uniformemente blanca, como *A*, tenía una serie de coloraciones comenzando por el rojo en la parte menos desviada y terminándose por el violeta en la parte más desviada. Newton clasificó la serie de los tintes que él observó en siete colores que se suceden siempre en el orden siguiente: Rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, añil, violado. Esta clasificación es absolutamente arbitraria, porque hay una variación continua de tinte del rojo al violeta; se podría adoptar otro número cualquiera.

La experiencia de Newton es fácil de repetir con la luz de una fuente natural o artificial, un mechero de gas, una lámpara. Se forma lo que se denomina un espectro luminoso.

Cabe preguntarse cuál es el motivo de este fenómeno: ¿la luz ha sido modificada en sus propiedades, o estas diferentes radiaciones coloreadas que nosotros observamos a la salida del prisma existían en la luz blanca incidente? Newton ha resuelto completamente la cuestión de la manera siguiente. La luz blanca es una mezcla de radiaciones coloreadas que, por refracción, se separan unas de otras, por efecto de su índice de refracción, diferente para cada una de ellas en una misma substancia. Se puede, en efecto, después del paso de la luz a través del prisma, aislar una radiación de cualquier color y, por los procedimientos conocidos en óptica, medir el índice de refracción de esta radiación. Se aprecia tomando una parte limitada del espectro, es decir, un fascículo bastante puro, que este fascículo no se dispersará al pasar a través de un prisma como lo hacía un haz blanco; no contiene, pues, más que una radiación simple, su índice de refracción aumenta gradualmente para los colores que van del rojo al violeta. Por lo tanto, la luz blanca ha sido verdaderamente descompuesta en radiaciones simples, es decir, no descomponibles ellas mismas. Estas radiaciones que tienen índice diferentes, son tanto más desviadas por su paso a través del prisma cuanto mayor es el índice y esto es lo que explica su separación. Si ahora, por medio de cualquier artificio, y son numerosos, se mezclan de nuevo las diferentes radiaciones simples, se reproduce el blanco; se puede, para ello, colocar, por ejemplo, sobre el haz descompuesto un prisma en sentido inverso que el primero.

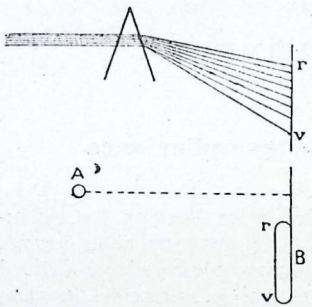


Fig. 251

No es indispensable para obtener la luz blanca mezclar todos los colores del espectro; la experiencia prueba, en efecto, que se llega a este resultado por diversas combinaciones de radiaciones. Así, basta tomar, en conveniente proporción, el rojo y el verde, o bien el azul y el amarillo, o también el anaranjado y el violeta, etc. Dos colores que por la mezcla dan el blanco se llaman complementarios; en particular, se obtendrán siempre dos tintes complementarios dividiendo el espectro en dos partes. Así, tomando de un lado el rojo, el anaranjado, el amarillo y el verde, su mezcla dará un cierto tinte complementario de la mezcla formada por el azul, el añil, el violeta, puesto que todo junto da el blanco. A primera vista, parece extraño que una mezcla de luz amarilla y azul dé blanco, se está habituado a verles formar el verde; veremos más adelante que en este caso no se mezclan en realidad los dos colores en cuestión.

En general, la mayor parte de las fuentes luminosas de que disponemos emiten una multitud de radiaciones simples, del rojo al violeta sin interrupción; veremos que se pueden producir focos que no emiten más que una radiación absolutamente simple; se tiene entonces una luz llamada monocromática, o bien puede haber en una luz, dos, tres, un número cualquiera, pero medible de radiaciones simples.

Los cuerpos de la naturaleza no nos envían más que la luz que reciben del sol. Colocándose en una habitación obscura, sin ventana ni abertura de ninguna clase, ni fuente luminosa o artificial alguna, no se ve nada. Si se introduce en la habitación una luz monocromática, todo toma el color de esta luz, no hay diferencias de intensidad, todos los lápices de una caja de pasteles, por ejemplo, parecen grises, más o menos obscuros, un artista que los utiliza para ejecutar un dibujo cree hacerlo de color gris; pero la sorpresa es grande cuando se deja entrar la luz del día; todos los colores han sido confundidos. A la luz del día, los cuerpos absorben una parte de esta luz y no difunden hacia nosotros más que lo que no absorben; tienen, pues, el color complementario de esta luz absorbida, y se concibe que según la fuente luminosa empleada el color variará. Sabido es cuán difícil es obtener una iluminación artificial que respete el valor de los colores ejecutados en un cuadro durante el día, o a la inversa. Esto depende de que la luz del día y las fuentes luminosas que podemos fabricar no tienen absolutamente la misma composición. Contienen las mismas radiaciones simples, pero su proporción varía; generalmente, las luces artificiales contienen

más amarillo que la luz solar; los colores de los cuerpos estarán falseados por un exceso de amarillo.

Cuando se toma un cuerpo transparente y se le interpone en el trayecto de un haz de luz, solamente le atraviesa una parte de luz, el resto es absorbido; además, por transparencia el cuerpo toma el color complementario del que es absorbido. Con este motivo, vamos a explicar cómo, aunque el amarillo y el azul sean complementarios, se obtiene el color verde por superposición de cristales amarillos y azules. Un cristal amarillo se deja atravesar generalmente por toda la parte del espectro inferior al azul, es decir, por el rojo, anaranjado, amarillo y verde; la mezcla de todo esto da una coloración amarilla. Un cristal azul se deja atravesar por el verde, azul, añil y violeta, cuya mezcla da una coloración azul. Superpongamos los dos cristales, uno se encarga de retener el azul, añil y violeta; el otro el rojo, anaranjado y amarillo, únicamente pasa el verde y, sin embargo, si se hubiesen mezclado mediante cualquier artificio las radiaciones que atraviesan los dos cristales coloreados colocados uno junto a otro, se hubiera podido tener el blanco.

Veamos ahora en qué consisten las radiaciones simples. La naturaleza de estas radiaciones ha provocado una de las discusiones más célebres en la historia de la ciencia, en las que están mezclados los nombres de los sabios más eminentes. Durante mucho tiempo se creyó, con Newton, que los cuerpos luminosos emitían pequeñas partículas que atravesaban el espacio y los cuerpos transparentes en línea recta, para herir la retina e impresionarla. Por el contrario, demostró Fresnel que un punto luminoso es el asiento de un movimiento vibratorio que se transmite en todas direcciones a su alrededor, como la ondulación en la superficie de un agua tranquila se propaga a partir del punto en donde se ha tirado una piedra. En el caso de la piedra que cae en el agua, únicamente se propaga así una ondulación, en ocasiones, dos; en el caso del punto luminoso, el fenómeno se repite periódicamente con una frecuencia que varía según el color de la luz, frecuencia tanto mayor cuanto más nos separamos del rojo hacia el violeta. Es como si, en lugar de arrojar una piedra al agua, se dejase caer una serie ininterrumpida, con intervalos iguales.

En suma, en la teoría de Newton, llamada de la emisión, las partículas materiales se propagan desde la fuente luminosa hasta los diversos puntos iluminados. En la teoría de Fresnel, llamada de las ondulaciones, no hay transporte de materia; cierto medio, interpuesto entre la fuente luminosa y los puntos iluminados, se pone en vibración, de la misma manera que el aire vibra bajo la influencia de un sonido que lo atraviesa.

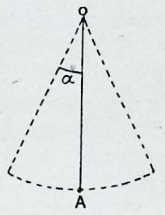


Fig. 252

La demostración de Fresnel tiene por base lo que se denomina interferencia de la luz, y su experiencia crucial es llamada de los dos espejos. En biología, se dan muchas veces las interferencias, por lo que puntualizaremos aquí la naturaleza de este fenómeno, con frecuencia mal interpretado; vamos, pues, a exponer con algunos detalles la experiencia de los dos espejos.

Movimiento pendular. — Supongamos un péndulo suspendido en un punto *o*, separémosle un ángulo α de su posición de equilibrio y abandonémosle (fig. 252). Sabemos, admitiendo que no ha experimentado ninguna resistencia, que describirá a una parte y a otra de su posición de equilibrio una serie de oscilaciones isócronas de amplitud constante.

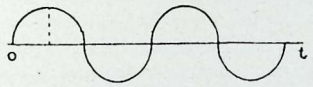


Fig. 253

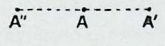


Fig. 254

Se dice que el punto *A* está animado de un movimiento pendular. Podemos representar este fenómeno por una curva, llevando los tiempos en abscisas a partir de un origen *o*, y en ordenadas las distancias del péndulo a la posición de equilibrio *A* (fig. 253); estas ordenadas serán llevadas por encima de *ot* para los desplazamientos a la derecha de *oA*, y por debajo para los desplazamientos a la izquierda, por ejemplo. La curva así obtenida es lo que se llama una *sinusoide*. Naturalmente, las ordenadas máximas serán tanto mayores cuanto más am-

plias sean las oscilaciones del péndulo; pero, para un mismo péndulo, la distancia entre dos entrecruzamientos de la curva con *ot* permanecerá constante, puesto que se sabe que las duraciones de las oscilaciones de un péndulo son constantes.

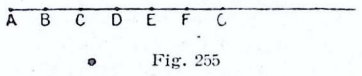


Fig. 255

Se llega a las mismas conclusiones cuando, en lugar de tomar un péndulo, se toma la extremidad de un diapasón que vibra, o si se considera un punto A (fig. 254) que separado de su posición de equilibrio, tiende a volver a ella merced a las fuerzas elásticas u otras, y que vibrará entre $A'A''$ a una y otra parte de A.

Supongamos que semejante punto, vibrante en el espacio, transmite, por un procedimiento cualquiera, sus movimientos a los puntos vecinos; paso a paso cada punto tomará un movimiento pendular, el espacio será atravesado por un movimiento vibratorio, que será continuo si el punto de origen continúa vibrando. Este movimiento se transmitirá sin intervalos con una velocidad dependiente de la naturaleza del medio atravesado.

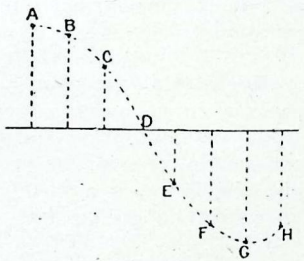


Fig. 256

Sea A (fig. 255) el origen del movimiento, B, C, D, E, etc. los puntos sucesivos a los que es transmitido el movimiento; como este movimiento se ha transmitido sucesivamente, los diversos puntos considerados no están en las mismas condiciones, el desplazamiento actual de B es el que A tenía un momento antes, porque ha sido necesario cierto tiempo al desplazamiento para transmitirse de A a B; dicho de otro modo: B está un poco atravesado sobre A, lo mismo que C sobre B, y así sucesivamente. Si nosotros dibujamos las posiciones de los diversos puntos en un momento dado, se tendrá una disposición como la de la figura 256; sería también una sinusoide.

Por lo tanto, en cada instante los diversos puntos de la trayectoria recorrida por un movimiento vibratorio se encuentran sobre una sinusoide. Para tener la representación del movimiento en cada punto, es preciso que nos imaginemos que esta sinusoide se desplaza en el sentido de la propagación de la vibración con una velocidad dependiente de la naturaleza del medio.

Así, en resumen, tenemos en A (fig. 257) un movimiento vibratorio pendular y queremos tener la representación de la propagación de este movimiento según AX; tracemos sobre AX una sinusoide cuya amplitud, es decir, la ordenada máxima y la distancia entre dos puntos análogos, depende, en el medio en el que se opera, de la naturaleza del movimiento en A, y supongámosla animada, en el sentido F de la propagación, de una velocidad dependiente de la naturaleza del medio; se tendrá una imagen de lo que pasa. Fácilmente se da uno cuenta del movimiento vibratorio perpendicular a AX que tomará un punto tal como B, entre B' y B''. Se ve también que B y C tienen los mismos movimientos, pero estos dos movimientos no son simultáneos; uno se retarda con relación al otro.

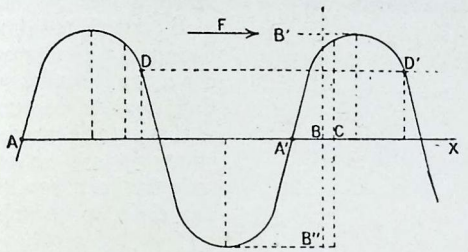


Fig. 257

Se observa también que existe una serie de puntos que se conducen de idéntica manera: así ocurre con los puntos D, D', etcétera. Para cada punto basta buscar los demás puntos que se encuentren colocados de la misma manera con relación a la curva; es evidente que cuando se mueven todos estos puntos se conducen de la misma manera. Además, se observa que para todos estos puntos, las distancias tales como DD' contadas paralelamente a AX, son las mismas y son iguales a

AA'. Esta longitud AA' es lo que se denomina longitud de de onda del movimiento vibratorio en el medio que se considera.

Superposición de los movimientos vibratorios. — Supongamos que se produzca en uno o en dos puntos muy próximos A y A' dos movimientos vibratorios idénticos (fig. 258), veamos lo que se producirá sobre la línea XY, estando A y A' bastante próximos a esta línea para poder ser considerados como colocados sobre ella. Cada uno de los puntos AA' es el asiento de un movimiento vibratorio que se puede representar por una sinusoide. Con el fin de no embrollar la

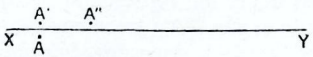
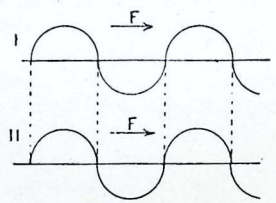


Fig. 258



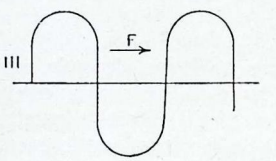


Fig. 259

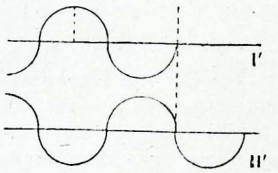


Fig. 260

figura, tracemos estas curvas sobre dos figuras especiales; la primera (259, I) representa el movimiento emanado de A. Siendo el movimiento emanado de A' absolutamente idéntico al de A, estará representado en (259, II). Los efectos de los dos movimientos se superponen y se demuestra que para tener la figura resultante basta añadir las ordenadas. Se comprende, en efecto, que, cualquiera que sea el punto XY en donde se coloca y examinando los efectos que deben producirse, según las curvas I y II que por todas partes se sobreañaden estos efectos. Una molécula está solicitada a desplazarse en el mismo sentido por el movimiento venido de A y por el venido de A'; el resultado está representado por (259, III).

Pero, supongamos ahora que el punto A' sea transportado a A'' (fig. 258), a una distancia igual a *media longitud de onda;* habrá que desplazar en la misma cantidad la curva II representativa del movimiento vibratorio que envía según XY al mismo tiempo que el venido de A. Desde entonces las dos curvas se presentarán según I' y II'' (fig. 260); y basta mirar esta figura para ver que en estas condiciones las vibraciones en un punto cualquiera del trayecto se oponen; sus efectos son precisamente de sentido contrario sobre cada molécula que debe permanecer en reposo; existe *interferencia.*

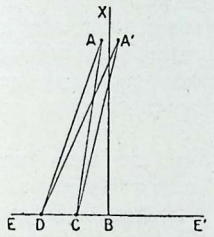


Fig. 261

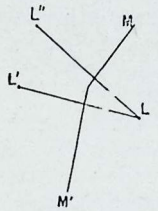


Fig. 262

He aquí, pues, lo que debe pasar para la superposición de dos movimientos vibratorios; veamos ahora cómo Fresnel ha dispuesto prácticamente su experiencia para comprobar si estas interferencias se aplican a la propagación de la luz y si se puede concluir la naturaleza vibratoria de esta luz.

Experiencia de los dos espejos. — Consideremos dos puntos luminosos idénticos, A y A', muy próximos entre sí, y colocada una pantalla en EE', paralelamente a AA'. BX es una recta perpendicular a la mitad de AA' (fig. 261). La luz llega a B simultáneamente de A y A', bajo la forma de un movimiento vibratorio, como acabamos de decir. Refiriéndonos a las explicaciones que hemos dado acerca de la superposición de las vibraciones y a la figura 261, vemos que en B los efectos se sumarán, el movimiento vibratorio será más enérgico que si solamente existiese una de las dos fuentes A o A'. Pero desplacemos el punto B lateralmente sobre EE', hacia la izquier-

da, por ejemplo, llegaremos a un punto *C*, desigualmente distante de *A* y *A'*, para el que las cosas se conducirán como en la figura 260, es decir, en donde las vibraciones se neutralizarán. En este momento la diferencia entre las distancias *CA* y *CA'* será de una media longitud de ondulación; en este punto no habrá vibración y, por consiguiente, hay obscuridad. Continuemos desplazando, en *D*, la diferencia de las distancias *DA* y *DA'* será de una longitud de ondulación entera; es fácil de ver que hay de nuevo concordancia de vibración y, por lo tanto, luz, y así sucesivamente. El mismo fenómeno se reproducirá a la derecha de *B*, es decir, que sobre la pantalla se ve un punto brillante *B*, acompañado a derecha y a izquierda de una serie de puntos alternativamente brillantes y obscuros.

Hemos dicho que son precisas dos fuentes de luz *A* y *A'* idénticas con el fin de que emitan movimientos vibratorios idénticos.

Para obtener estos dos focos se toma un punto luminoso *L* (fig. 262) colocado frente a dos espejos *M* y *M'* en los que da las imágenes *L'* y *L''*. Estas dos imágenes serán forzosamente idénticas y ellas son las que se toman como fuentes *A* y *A'* de la experiencia; de aquí el nombre de experiencia de los dos espejos. El resultado de esta experiencia prueba la exactitud de las previsiones de la teoría. Se concibe que las distancias que separen los dos puntos luminosos sobre la pantalla *BD*, por ejemplo (fig. 261), dependen de las condiciones de la experiencia, es decir, de la separación de *A* y *A'*, de su alejamiento de la pantalla *EE'*, etc. En particular, esta distancia *BD*, por un mecanismo especial, está ligada a la longitud de onda de la luz empleada, y se comprende que estando todo conocido, salvo esta longitud de onda, se la puede calcular midiendo *BD*, *AA'*, etc. Es lo que se hace para las diversas radiaciones coloreadas, y damos un ejemplo de los valores encontrados.

Rojo	0 μ 620
Amarillo.	0 μ 551
Azul	0 μ 475

La luz blanca se compone, pues, de una mezcla de radiaciones constituída cada una por un movimiento vibratorio.

No obstante, todavía se plantea una cuestión. Hemos hablado de movimientos vibratorios, pero, ¿qué es lo que vibra? No es el aire, ni los medios transparentes atravesados, puesto que la luz se propaga en el vacío. Se ha admitido la existencia de una substancia imponderable por los medios de que disponemos, y a la que se ha dado el nombre de éter. Este éter es el que sirve de vehículo a las radiaciones que se propagan por los cuerpos transparentes atravesados. Su existencia ha podido ser puesta en evidencia, pero no hay para qué insistir sobre este punto.

Velocidad de luz. — La luz se propaga con una velocidad muy grande, pero no infinita. En el vacío todas las radiaciones tienen la misma velocidad. La medición se ha hecho por la observación de ciertos fenómenos astronómicos y por experiencias directas. El número 300,000 km. por segundo no se aleja mucho de la cifra exacta. Esta velocidad es menor en los cuerpos transparentes que en el vacío, tanto menor cuanto mayor es el índice de refracción de esta substancia; se puede, pues, conociendo el índice de una substancia, calcular la velocidad de la luz de esta substancia. Si el índice es 2, la velocidad es la mitad de 300,000 km. por segundo; si el índice es 3, la velocidad es de un tercio de 300,000 km. por segundo. Se ve inmediatamente que en un mismo medio la velocidad no es la misma para las diversas radiaciones, puesto que no tienen el mismo índice de refracción, y que en general la velocidad va disminuyendo del rojo al violeta.

II. — Espectroscopia

En la experiencia de Newton antes descrita, interponiendo una pantalla en el trayecto del haz dispersado se obtiene un mal espectro, porque en todos sus puntos hay todavía una mezcla de diversas radiaciones. Esto depende del recubrimiento parcial de los diversos haces simples. Por medio de un sencillo artificio pueden obtenerse mejores resultados. Tomemos una hendidura vertical *O* (fig. 263), la vista de la figura es de arriba abajo, de plano, y detrás de esta hendidura coloque-

mos una luz *S*. Por medio de una lente *L* podemos obtener una imagen de *O* en *O'* sobre la pantalla *EE'*. Interpongamos en el trayecto de la luz un prisma *P*, sabemos que todos los rayos serán desviados hacia la base, y si no hubiese dispersión, es decir, si la luz fuese monocromática, blanca, por ejemplo, tendríamos en *O''* una imagen de la hendidura correspondiente a cierto color, pero esta imagen estará acompañada lateralmente de otras tantas imágenes colocadas unas junto a otras cuantas radiaciones simples existen en la luz supuesta. Si la hendidura es muy fina, las imágenes *O''* son también muy finas y se tiene una buena separación de las radiaciones.

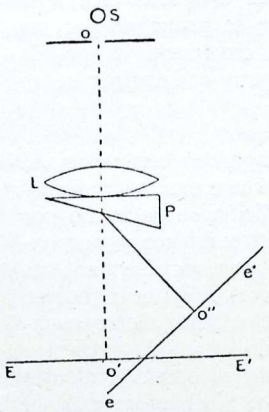


Fig. 263

Este es el principio del espectroscopio, del que he aquí el dispositivo práctico, según una vista en plano de arriba abajo.

En *O* la hendidura con la fuente luminosa que se estudia en *S* (figura 264). Esta hendidura está en el foco de la lente *L;* el haz luminoso pasa por *O* y cae sobre *L;* es, por consiguiente, paralelo después de la refracción. Un prisma *P* está orientado de tal manera que a su través la luz es sensiblemente paralela a la base *AB*, la experiencia y la teoría demuestran que estas son las mejores condiciones. A la salida del prisma la luz cae sobre la lente *L'* igual a *L*, esta luz es dispersada y se forman una serie de imágenes de la hendidura, dando el espectro en *ee';* este espectro es mirado con la lupa *l*, formando ocular. El sistema óptico colocado delante del prisma constituye lo que se llama el colimador, el sistema colocado detrás del prisma es el anteojo. Es evidente que este anteojo está regulado para el infinito, puesto que los rayos que en él penetran y dan una imagen clara son paralelos entre sí. Es indispensable, para referir las observaciones en el espectroscopio, hacer una graduación en el espectro; he aquí mediante qué artificio se obtiene. Al lado se encuentra una pequeña escala

graduada *m* llamada micrómetro, que está en el foco de la lente *L''*, su imagen está, pues, en el infinito y el observador la ve por reflexión en la cara *CB* del prisma al mismo tiempo que mira el espectro.

Tal es el espectroscopio más sencillo, el más generalizado. Para obtener una separación todavía más perfecta de las diversas radiaciones, es decir, mayor extensión del espectro, se pueden colocar muchos prismas unos a continuación de otros, obteniendo así espectroscopios de dos, cuatro y hasta de seis prismas.

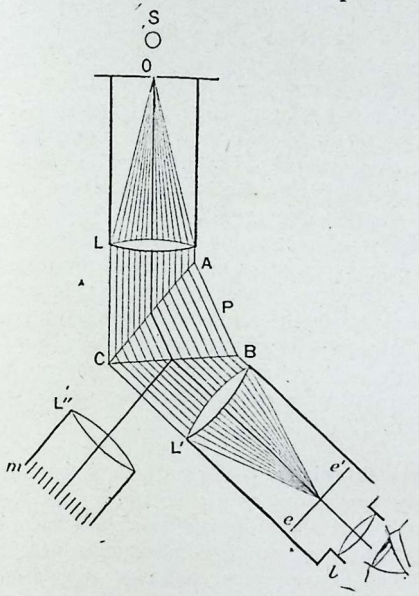


Fig. 264

Por motivos de comodidad se hacen también combinaciones de prismas sobre las que no hay que insistir, pero que dispersan la luz conservándola sensiblemente paralela al eje del colimador, el anteojo está entonces en la prolongación del coli-

mador, teniéndose entonces los llamados espectroscopios de visión directa.

Por último, desde hace unos años sobre todo, se reemplaza con frecuencia los prismas por redes. Practicando sobre una superficie reflectora una serie de líneas con el diamante, paralelas entre sí y muy próximas, se tiene un instrumento que posee la propiedad de dispersar la luz por reflexión, si la red está sobre una lámina de cristal dispersa por reflexión y por transparencia. No es este lugar de exponer la teoría, demasiado complicada, de estos aparatos; nos bastará saber que la dispersión es tanto mayor cuanto más fina es la red; se han hecho algunas que tenían más de mil rayas por milímetro. Estas redes tienen también la ventaja de no absorber ninguna radiación, puesto que la luz no las atraviesa, cosa que no ocurre con el prisma de cristal.

Estudiando las diversas luces por medio del espectroscopio, se ve que es preciso hacer una primera división, según que deseemos informarnos sobre la naturaleza de las radiaciones emitidas por una fuente luminosa o que se quiera investigar qué radiaciones son absorbidas al paso de un haz luminoso a través de un cuerpo transparente. Se han considerado, por consiguiente, separados los espectros de emisión y los espectros de absorción.

Espectros de emisión. — Los espectros de emisión son de dos especies, según que sean continuos, es decir, que tengan un número infinito de radiaciones, o que estén interrumpidos y no contengan más que un número limitado de radiaciones.

El tipo de los espectros continuos es el espectro solar; cuando se le observa en un espectroscopio, se ve que comienza en el rojo y se continúa hasta el violeta, pasando sucesivamente por todos los colores intermediarios. Lo que el ojo percibe así es el espectro llamado luminoso, pero existen allí una serie de radiaciones que nos escapan.

Si se recibe el espectro sobre una placa fotográfica, se aprecia que la reducción de la sal de plata se realiza hasta una parte muy lejana situada más allá del violeta, en lo que se llama ultravioleta, con una intensidad regularmente variable; en este ultravioleta es en donde se encuentra el máximo de

acción. De la misma manera, paseando un termómetro por el espectro se aprecia un máximo de temperatura por debajo del rojo, en el infrarrojo. Se puede representar en una figura (figura 265), por tres curvas, los efectos luminosos, químicos o actínicos y caloríficos de las diversas radiaciones del espectro. Se ve entonces que los máximos para estas tres especies de acciones no se produce en los mismos puntos y que la región luminosa del espectro no es en suma más que una pequeña parte del espectro total.

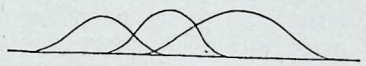


Fig. 265

Digamos también que en la parte luminosa del espectro solar se ven una serie de rayas negras correspondientes a radiaciones que faltan, denominadas rayas de Frauenhoffer y designadas habitualmente por las letras del alfabeto. Esto depende de la absorción de ciertas radiaciones por la atmósfera terrestre y por la atmósfera solar.

Todos los cuerpos sólidos y líquidos incandescentes dan un espectro continuo; cuando la temperatura es débil se ve primero aparecer el rojo, después el espectro se extiende cada vez más hacia el violeta, al mismo tiempo que aumenta el brillo.

Si se toma, por el contrario, un gas o un vapor incandescente, la luz emitida no contiene más que un número limitado de radiaciones, y el espectro, en lugar de ser continuo, presenta un número correspondiente de rayas brillantes. Estas rayas son características de la substancia en vapor; para observarlas basta colocar delante de la hendidura del espectroscopio una llama incolora, una llama de mechero Bunsen, por ejemplo, después introducir en ella el cuerpo que se desea examinar. Si es volátil, se vaporiza pronto, la llama se colorea, y al espectroscopio se ven las rayas correspondientes a las radiaciones que contiene. Se podrá referir sobre la imagen del micrómetro la posición de las rayas observadas, y el día en que, en una mezcla desconocida de sales, se encuentre una raya así referida, podrá deducirse la presencia de la sal correspondiente. Si se ve una raya nueva, se puede deducir que hay un cuerpo nuevo vaporizado en la llama.

En lugar de emplear el mechero de Bunsen, se puede colocar el cuerpo que se desea estudiar en la chispa eléctrica, o, si es un gas, en un tubo de gas enrarecido que se hace atravesar por las descargas de una bobina de inducción; es el tubo de Geissler.

Estos procedimientos de investigación son extremadamente sensibles, pero no permiten, claro está, más que encontrar los cuerpos simples que entran en la composición de una substancia, siendo los demás quemados o disociados en la llama. Excepción hecha, no obstante, para ciertos gases compuestos, que se les puede hacer luminosos en el tubo de Geissler sin disociarlos.

Espectros de absorción. — Si se produce un espectro continuo con ayuda de un cuerpo sólido o líquido incandescente, un mechero de gas, por ejemplo, que, ardiendo en blanco contiene partículas de carbón, y se interpone un cuerpo transparente en el trayecto del haz que entra en el espectroscopio, ocurre con frecuencia que ciertas radiaciones son absorbidas y faltan en el espectro antes continuo.

Especialmente, los gases gozan de esta propiedad notable de absorber las radiaciones que son capaces de emitir. Así, el vapor de sodio incandescente da generalmente una doble raya amarilla cuando se observa su espectro de emisión. Si ahora se mira un cuerpo muy luminoso, que dé un espectro continuo, y se interpone entre él y el espectroscopio vapor de sodio a temperatura más baja, este vapor absorbe las radiaciones correspondientes al sodio; en su lugar, hay en el espectro disminución de la luminosidad y apariencia de rayas negras. Este es el mecanismo de la formación de las rayas de Frauenhoffer. El núcleo líquido o sólido incandescente del sol daría un espectro continuo; pero ciertas radiaciones son absorbidas por los gases que rodean este núcleo o por la atmósfera terrestre, y de ello resulta la existencia de rayas incoloras, que ocupan sobre el micrómetro el mismo lugar que las rayas brillantes emitidas por los mismos vapores incandescentes que dan un espectro de emisión.

El estudio de la absorción por los líquidos o los sólidos transparentes tiene una aplicación mayor en biología que la de

los gases. Si, después de haber puesto una luz blanca frente a la hendidura del espectroscopio de manera que se produzca un espectro continuo, se interpone entre esta luz y la hendidura un sólido o un líquido transparente coloreado, se absorben ciertas radiaciones que desaparecen en el espectro. En estas condiciones no aparecen rayas negras, sino anchas bandas difuminadas en los bordes. Algunas veces no hay más que

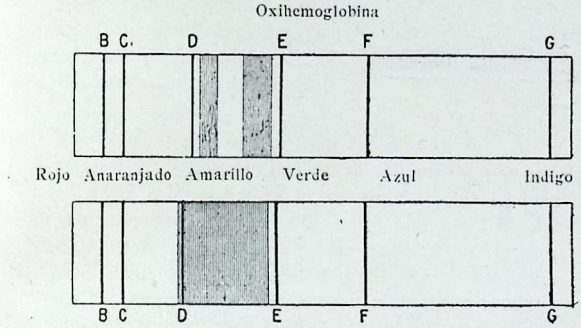


Fig. 266

una sola de estas bandas, otras desaparece un lado del espectro, otras veces hay dos o hasta muchas bandas. Este hecho es fácil de observar con soluciones o cristales de colores.

La sangre arterial da también dos hermosas bandas de absorción en el amarillo y el principio del verde. Para ello es preciso diluirla en agua; con algunos tanteos se encuentra fácilmente la concentración más conveniente, que depende, por otra parte, del espesor del vaso que se coloca delante de la hendidura del espectroscopio con el líquido. Si, en lugar de sangre arterial se toma sangre venosa, no se observa más que una sola banda de absorción, que ocupa un espacio un poco mayor que las dos precedentes reunidas. Por lo demás, se puede fácilmente pasar de uno de estos espectros al otro. Agitando la sangre venosa con el aire se oxigena, pasa al estado de sangre arterial y se nota el espectro correspondiente. Si, por el contrario, se añade un reductor a la sangre arterial, por ejemplo,

sulfhidrato amónico, se ve aparecer el espectro de la sangre venosa.

La sangre que ha sufrido la acción del óxido de carbono da un espectro casi idéntico al de la sangre arterial, pero si se añade un reductor, no se produce ninguna modificación; el óxido de carbono ha formado con la hemoglobina una combinación estable, impropia en adelante para los cambios respiratorios.

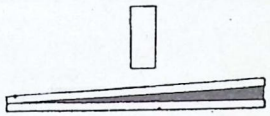


Fig. 267

Sabido es que, bajo la influencia de diversos reactivos, la hemoglobina puede dar una serie de derivados; cada uno de ellos tiene un espectro característico.

Henocque ha imaginado un procedimiento de dosificación de la hemoglobina fundado en el examen de los espectros de absorción de la sangre. Para ello ha hecho notar que cuando la capa de sangre arterial que se observa tiene cierto espesor, las dos bandas de absorción tienen igual intensidad; con un espesor menor predomina una de ellas, con un espesor mayor es la otra la que parece más negra. Este espesor depende de la riqueza en hemoglobina. Se coloca la sangre en una cubeta prismática pequeña, sencillamente formada por dos láminas de cristal entre las que la sangre se mantiene por capilaridad (fig. 267). Se pasa esta cuba por debajo de un pequeño espectroscopio vertical de visión directa, y se busca el punto en donde las dos bandas parecen de igual intensidad. Una graduación que existe en la cara superior nos indica dónde hemos de buscar, en la tabla trazada por Henocque, la riqueza en hemoglobina de la sangre examinada.

Si con el mismo pequeño espectroscopio se examina la luz reflejada sobre la uña del pulgar, se ve también el espectro de la sangre arterial. Si se liga el pulgar en su base para detener la circulación, la hemoglobina se reduce poco a poco, con una velocidad variable según la actividad de los tejidos. Contando el tiempo necesario para la aparición del espectro de la hemoglobina reducida, ha querido Henocque deducir el estado de actividad de los tejidos; pero no hay que olvidar que diversos factores pueden plagar de error esta determinación.

El espectroscopio permite encontrar la sangre en líquidos en donde se encuentra muy diluída; por ejemplo, se puede reconocer en una orina de tinte dudoso si se trata de hemoglobina o de otra materia colorante.

III. — Fotometría

La Fotometría tiene por objeto medir las intensidades luminosas; los problemas que hay que resolver pueden presentarse bajo dos aspectos distintos. O puede preguntarse cuál es el valor de un foco luminoso determinado, de una lámpara, de un mechero de gas, etc. O bien se puede buscar cuál es la iluminación, en una región del espacio, bajo la influencia de las fuentes de luz naturales o artificiales.

Coloquémonos ahora en el primer supuesto, ¿cómo podemos evaluar el valor de una fuente luminosa? Son necesarias dos cosas: ante todo, una unidad, y después un método de comparación de las diferentes fuentes luminosas con la unidad.

Toda esta cuestión está dominada por la siguiente ley:

La iluminación de una superficie por una fuente luminosa varía en razón inversa del cuadrado de la distancia de la superficie al foco luminoso.

Esto es muy fácil de comprender. Tomemos una fuente luminosa S (fig. 268), que envía su luz en todas direcciones, y consideremos una serie de esferas que tengan su centro en S y los radios de 1 m., 2 m., 3 m., etc.

Tomando una de estas esferas en particular, cualquiera que sea, recibe toda la luz emanada de S; pero esta luz se reparte sobre superficies cada vez más grandes a medida que el radio crece. Si este radio es de 2 m., la superficie es 4 veces mayor que para un radio de 1 m.; si es de 3 m., la superficie es 9 veces mayor, y así sucesivamente. Por consiguiente, si representamos por 1 la luz recibida por la unidad de superficie de la primera esfera, la unidad de superficie de la segunda recibirá $\frac{1}{4}$, la unidad de superficie de la tercera $\frac{1}{9}$, etc. Es decir, que la iluminación de la unidad de superficie estará en razón inversa del cuadrado de la distancia.

Si queremos ahora comparar entre sí dos fuentes luminosas S y S', coloquémoslas frente a una pantalla y busquemos a qué distancia de la pantalla producen la misma iluminación. Sea d para S y d' para S' (fig. 269); la intensidad de los focos estará en razón directa del cuadrado de las distancias a la pantalla, es decir, que se tendrá $\frac{S}{S'} = \frac{d^2}{d'^2}$. Si, por ejemplo, la fuente S' produce la misma iluminación que S cuando está a doble distancia de la pantalla, es que S' tiene una intensidad cuatro veces mayor que S, lo que quiere decir que a la misma distancia, S' envía sobre la misma superficie cuatro veces más luz que S.

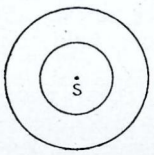


Fig. 268

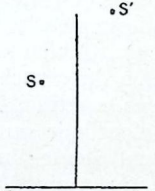


Fig. 269

Prácticamente, he aquí cómo se opera. Se toma una pantalla traslúcida EE', se la ilumina con las dos fuentes luminosas que se comparan S y S', interponiendo entre ellas una pantalla opaca de manera que S no ilumine más que el lado izquierdo de EE' y S' el lado derecho. Se observa la pantalla por transparencia y desplazando las fuentes de delante a atrás, se procura establecer la igualdad de iluminación de los dos lados. Conseguido esto, se ha realizado la condición de comparación; basta medir las distancias de S y S' a la pantalla y aplicar la fórmula. Este aparato es el fotómetro de Foucault; se han imaginado otros dispositivos, pero todos descansan en el mismo principio, y no difieren unos de otros más que por la manera de observar la igualdad de iluminación.

Para simplificar las operaciones, es interesante tomar siempre para la fuente S la misma unidad de intensidad. Se coloca entonces S en una posición fija y se puede graduar de una vez para siempre la línea sobre la que se desplazará S' en valores de S, de manera que se eviten los cálculos de las operaciones ulteriores. Si S está a 1 metro de la pantalla, para S' se marcarán 4 unidades a 2 metros, 9 unidades a 3 metros, etc.

Falta, pues, elegir una unidad. Esta unidad es la *bujía* (1) *internacional*, vale aproximadamente 10 cárceles, y es con frecuencia denominada *bujía decimal*.

Tomemos ahora el segundo problema. Cualquiera que sea la manera como una habitación esté iluminada, por la luz del día o por luces artificiales, hay que determinar cuál es la iluminación de una región de esta sala. Por mediciones de este género es como se puede establecer finalmente cuál es la cantidad de luz necesaria para un género determinado de trabajo, y, una vez adquirido este punto, saber, en un caso particular, si esta condición se realiza. Supongamos, por ejemplo, que se haya encontrado que falta, para la buena lectura sin fatiga, una iluminación igual a la que produce un carcel a 1 m., será preciso que se pueda comprobar si esta condición se cumple.

He aquí en principio cómo debe hacerse la experiencia. Se coloca una hoja de papel en el lugar que hay que estudiar, de modo que esté iluminada, en una mitad, en las condiciones en que se hará la lectura. La otra mitad será únicamente iluminada por una lámpara Carcel que se aproximará o se alejará del papel hasta igualdad de iluminación. En este momento se medirá la distancia de la lámpara al papel y se deducirá el valor de esta iluminación.

Prácticamente, la operación se hace por medio del fotómetro de Mascat (fig. 270).

La pequeña pantalla E, llevada por una pieza móvil en una argolla, está colocada en el sitio que se quiere estudiar y convenientemente orientada. Su iluminación es comparada con la de la pantalla E' iluminada por la luz artificial S, que sirve de unidad, y se encuentra siempre a la misma distancia de E'.

Mirando por el ocular, gracias a una serie de reflexiones, se ven simultáneamente y yuxtapuestas, cómo está repre-

(1) Se le denomina *bujía* porque la primera unidad adoptada fué la bujía de la Estrella; por su inconstancia fué substituída por la lámpara Carcel, que con una mecha prismática cuadrangular de algodón de 1 cm. de lado, quema 42 gramos de aceite de colza en una hora; Violle ha comparado después este patrón con la intensidad luminosa de una laminita de platino de 1 cm² incandescente a 1800°; actualmente, se utiliza la llamada *bujía internacional*. (N. del T.)

sentado en D, la mitad de la pantalla E y la mitad de E', se pueden, pues, comparar sus iluminaciones. Como se ve, una de las pantallas no está iluminada más que por la luz que se ha de utilizar, la otra por la unidad S. En lugar de desplazar S con relación a la pantalla E' se hace variar la iluminación de E' abriendo o cerrando más o menos un diafragma graduado una vez para siempre. Bastará leer esta graduación para tener el valor de la iluminación de E. La iluminación de una superficie se expresa por medio de la unidad llamada

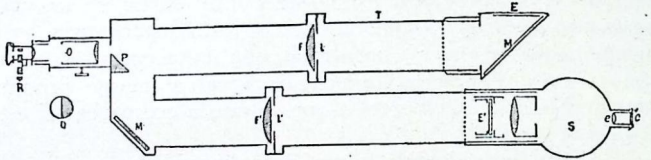


Fig 270

Lux (1). Es la iluminación producida por una bujía colocada a 1 m. de la superficie.

Esta cuestión de determinación de la iluminación en las habitaciones es muy importante, porque está íntimamente ligada con la higiene de la vista, particularmente en los locales destinados a la enseñanza de los niños. Se calcula que para leer y escribir en buenas condiciones, es precisa, por lo menos, una iluminación de 10 Lux.

Cuando se quiere determinar por los procedimientos que acaban de indicarse ya la iluminación de los locales, ya la intensidad de un foco luminoso con relación a un patrón, se tropieza con frecuencia con una dificultad práctica que depende de la diferencia de color de las luces. En el lenguaje ordinario, designamos con el nombre de luz blanca tanto la del sol como la de nuestros aparatos de iluminación, pero sabemos, no obstante, cuánto difieren entre sí estos diversos focos; basta para ello haber observado una sola vez un objeto coloreado, un cuadro, de día y con luz artificial. El contraste será todavía más patente si, por ejemplo, con el fotómetro de Bunsen queremos comparar un mechero Auer y una lámpara Carcel: el color amarillo de la luz emitida por esta última hace extremadamente difícil la comparación con el mechero Auer; únicamente con una vaga aproximación podremos juzgar de la igualdad de intensidad entre las dos zonas, cuya diferencia de color nos impresiona tanto como la diferencia de luminosidad. Examinado de este modo, el problema no es susceptible de una solución exacta; no se pueden comparar entre sí dos cosas de especies diferentes.

(1) También se le llama *bujiámetro*. (N. del T.)

Si es verdad que dos fuentes luminosas no pueden, en general, compararse directamente con precisión, no es menos cierto que las luces emitidas por estas dos fuentes están compuestas de las mismas radiaciones simples que forman el espectro; en ambos lados hay rojo, anaranjado, amarillo, etc, violeta, y, si descomponemos cada una de estas luces complejas, podremos comparar en sí las radiaciones rojas, las radiaciones amarillas, etc. Podemos hacer de ellas un verdadero análisis y, tomando una de las fuentes como unidad, buscar cuántas unidades contiene la otra de rojo, de anaranjado, etc., de violeta. Este es el principio de la espectrofotometría. El problema es el mismo que si quisiéramos comparar dos soluciones que contuviesen sales en diferentes proporciones; una comparación directa no tendría ningún sentido. Pero, tomando una de ellas como unidad, podríamos, por un análisis, encontrar que la segunda contenía 2 veces más NaCl; 3 veces de KCl; 1,5 veces de $CaSO^4$, etc., que la primera. Esto definiría la segunda solución con relación a la primera tomada como unidad, y se podrían comparar entre sí todas las diversas soluciones evaluadas con arreglo a esta unidad.

Así, pues, cuando se quieren comparar dos luces que no tienen idénticamente el mismo color, es preciso averiguar cuántas de las diversas radiaciones simples coloreadas contiene la una con relación a la otra. Con frecuencia nos contentamos con filtrar estas luces a través de pantallas coloreadas, es decir, que se interpondrán sucesivamente cristales rojos, amarillos, verdes y azules, y se hará una evaluación fotométrica en cada caso. Para el conocimiento práctico del alumbrado puede bastar esto, pero cuando se desean resultados exactos es preciso operar de otra manera; los cristales coloreados no dejan,

en efecto, pasar jamás radiaciones simples, sino todas las radiaciones contenidas en una región, en ocasiones extensa, del espectro.

El único método exacto consiste en descomponer las dos luces por un prisma; se forman entonces, uno por encima de otro, los dos espectros; limitando cada región por una hendidura estrecha, se comparan, en cada uno de estos espectros, las radiaciones simples entre sí, por procedimientos sobre los que no es posible insistir aquí. Tomando uno de los espectros por unidad, se podrán evaluar todas las radiaciones del otro y trazar una curva de las intensidades luminosas de las diversas radiaciones simples de la luz estudiada.

Esta manera de obrar es importante cuando se investiga cuál es la absorción producida por una substancia transparente coloreada.

Se formarán, uno por encima del otro, dos espectros idénticos; después, en el trayecto del haz que da uno de estos espectros, se interpone el cuerpo transparente que se desea estudiar y se hace el análisis espectrofotométrico de la luz que lo atraviesa. Teniendo la curva de intensidad de las diversas radiaciones de esta luz por relación con la luz recibida directamente, se deducirá lo que ha sido detenido por el cuerpo transparente. Esta es la base de un método de dosificación de las soluciones coloreadas, muy precioso en ciertos casos.

IV. — Colorimetría

Cuando se disuelve un cuerpo coloreado en un líquido incoloro, como el agua, la solución tiene, por transparencia, un color tanto más obscuro cuanto más concentrada es la solución.

Claro está que el espesor de la capa líquida influye sobre la cantidad de luz absorbida y en ciertos límites se puede admitir que dos soluciones que absorben la misma cantidad de luz, es decir, tienen el mismo color por transparencia, cuando los espesores están en razón inversa de las concentraciones. Es decir, que doblando, triplicando, etc., la cantidad de cuerpos disueltos en un mismo volumen es preciso reducir el espesor de la capa líquida a la mitad, al tercio, etc., para tener el mismo color.

Estos principios permiten evaluar la concentración de una solución coloreada por dos métodos.

Se toma como punto de comparación una solución que contenga un peso dado del cuerpo a dosificar, se le observa por transparencia al mismo tiempo que la solución estudiada, colocando las dos en vasos de caras paralelas del mismo espesor y se diluye la solución más concentrada hasta obtener la igualdad del tinte. Basta conocer la proporción en que se ha hecho esta dilución para deducir la relación de las concentraciones.

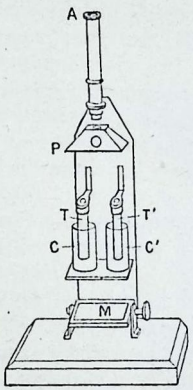


Fig. 271

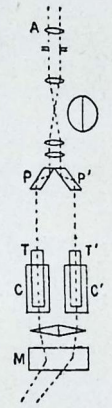


Fig. 272

El segundo método es más rápido, consiste en hacer variar de espesor las capas líquidas atravesadas; cuando se ha conseguido la igualdad de tinte, se admite que las concentraciones están en razón inversa de los espesores.

El instrumento figurado en 271 y 272 es muy práctico para hacer estas determinaciones. Los líquidos están colocados en dos vasos cilíndricos verticales C y C', un espejo M proyecta la luz de abajo arriba. Los dos prismas de reflexión P y P' envían al anteojo A la luz que ha atravesado C y C', y el observador ve a través de este anteojo simultáneamente dos campos semicirculares yuxtapuestos, iluminado el uno por la luz que ha atravesado C, y el otro por la que ha atravesado C'. Ahora bien; dos cilindros de cristal, T y T', permiten reglar a voluntad el espesor del líquido en cada uno de los vasos C y C', porque este espesor de líquido está comprendido entre el fondo de los vasos C y C' y la parte baja de los tubos T y T', y una graduación que lleva el instrumento da este espesor. Se hace subir y des-

cender T y T', por medio de cremalleras y, cuando se ha obtenido la igualdad de tinte de los dos sectores, se leen los espesores de líquido y se deduce la relación de las concentraciones.

Este aparato es extremadamente cómodo, por la rapidez de sus indicaciones.

V. — Fotografía

No hemos de insistir aquí sobre los principios generales de la fotografía, que están expuestos en todos los tratados elementales de física y en una multitud de manuales especiales. En ellos se indica cómo se opera para obtener los negativos y los positivos; nosotros nos ocuparemos únicamente de las modificaciones aportadas a la técnica en lo referente a las aplicaciones a las ciencias biológicas.

Fotografía microscópica. — Cuando se tienen que fotografiar objetos muy pequeños, se reemplazan los objetivos ordinarios por un objetivo de microscopio. Desde el punto de vista teórico no ha cambiado nada. La figura 273 representa una cámara obscura instalada sobre un microscopio; el aparato está vertical, pero puede también disponerse horizontalmente. Se enfoca la preparación manipulando sobre el tornillo del microscopio y observando la imagen en el cristal esmerilado; si se desea hacer variar el tamaño de la imagen se cambia el objetivo o, dentro de ciertos límites, se puede llegar a un resultado satisfactorio alargando o acortando la cámara obscura.

En estas experiencias se tropieza con dos dificultades. A consecuencia de la considerable amplificación, la imagen está poco iluminada en el cristal deslustrado; es necesario estar muy habituado para conseguir enfocar bien. En segundo lugar, la menor trepidación del aparato hace variar el foco, porque el objetivo está muy cerca de la preparación, el menor movimiento da lugar a una variación relativa muy considerable de esta distancia y, por consiguiente, la imagen pierde toda su limpieza. Es necesario, por lo tanto, emplear armazones muy sólidos. Hay, además, una serie de dificultades especiales procedentes del color de las preparaciones. En efecto, las materias colorantes empleadas en histología, buenas para el ojo son, en ocasiones, malas para la impresión de la placa sensible. El azul no se distingue por transparencia del blanco, el amarillo o el rojo resultan negros, etcétera. Se soluciona la cuestión empleando placas especiales y pantallas coloreadas que absorben ciertas radiaciones. Hay para ello una técnica especial que únicamente puede aprenderse por la experiencia.

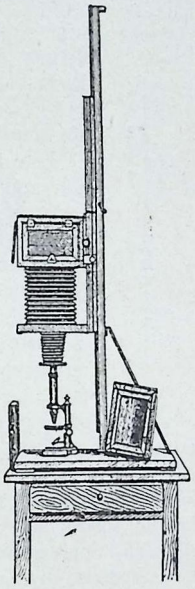


Fig. 273

Cronofotografía. — La aplicación más feliz de la fotografía a las ciencias naturales consiste en su empleo para la determinación de los movimientos de los seres o de sus órganos sin que tengan que unirse a estos órganos aparatos registradores que alteran algunas veces las condiciones normales de su funcionamiento.

Se pueden ya obtener interesantes datos por la fotografía instantánea, muchos problemas se han podido dilucidar de esta manera, pero no basta cuando se quiere estudiar cómo varía un fenómeno con el tiempo. Tomemos el caso más sencillo. Un cuerpo, una bola brillante, por ejemplo, cae siguiendo una vertical delante de un fondo obscuro: ¿qué nos daría la fotografía instantánea? la bola en una de sus posiciones. El clisé así obtenido no tendría ningún interés. Supongamos, por el contrario, que mediante un artificio que vamos a indicar, se toma sobre la misma placa una fotografía cada décima de segundo; tendremos, en línea vertical, una serie de imágenes dándonos la posición de la bola cada décima de segundo. Para tener las posiciones exactas en el espacio, bastará fotografiar al mismo tiempo una escala graduada a lo largo de la que caerá la bola; se tendrá así un excelente

documento para el estudio de la caída de los cuerpos, y no se habrá aportado ningún trastorno en el movimiento de la bola.

El dispositivo práctico para llegar a este resultado es muy sencillo: en lugar de tomar un obturador ordinario, se hace girar delante del objetivo un disco opaco perforado por uno o varios agujeros. Cada vez que un agujero pase por delante del objetivo se tomará una fotografía. Basta conocer el número de agujeros del disco y su velocidad de rotación para conocer el tiempo que transcurre entre la toma de las dos imágenes.

Fig. 274

Este método se aplica con éxito siempre que el objeto es bastante pequeño y se desplaza con bastante rapidez para que no haya superposición de imágenes. Pero, tomemos el caso extremo de un movimiento en un mismo sitio: supongamos, por ejemplo, que se quiera estudiar las diversas posiciones de un hombre que salta en el aire según la vertical; es cierto que sobre la placa se tendrá una cosa tan confusa que no será posible orientarse. Lo mismo ocurrirá si, durante la marcha al paso, se quieren tomar bastantes imágenes para estudiar las diversas fases de este paso. Para evitar esta dificultad, se recurre a diversos procedimientos. Se puede reducir la superficie del sujeto; es lo que hacía Marey, colocándole sobre un fondo negro y vistiéndole completamente de negro (fig. 275). Sobre su vestido se trazaba en blanco ciertos puntos de referencia, cuya imagen sobre la placa era bastante reducida para que no se temieran las superposiciones. Una cronofotografía da entonces una prueba análoga a la de la figura 113.

El segundo medio consiste en tomar pruebas separadas para cada posición; esto equivale a cambiar de placa para cada posición. Naturalmente, esta operación debe realizarse con mucha rapidez, puesto que se trata de pruebas tomadas con intervalos de una pequeña fracción de segundo en ocasiones. Esto es imposible con las placas; el ponerlas en movimiento y su parada brusca daría lugar a choques y roturas, ya de los clisés, ya de las diversas partes del aparato.

Marey ha imaginado un aparato denominado cronofotógrafo, en el que una película sensible se desarrolla en el plano

focal del objetivo. Esta película es detenida por un mecanismo especial en el momento de la admisión de la luz a través de un agujero del disco giratorio, avanza, por el contrario, una cantidad igual a la longitud de una prueba en el intervalo de dos iluminaciones; esto se realiza fácilmente gracias a su débil inercia. Se puede también, con una cinta bastante larga, tomar un número considerable de imágenes con intervalos de tiempo iguales.

Fig. 275

Mediante el empleo de este procedimiento, se fija, por la fotografía instantánea, las actitudes sucesivas de un animal que ejecuta un movimiento cualquiera. Si ahora se desea saber cuál ha sido el desplazamiento de un miembro o de un punto del cuerpo en el espacio, se transporta por medio de

calcos, las diversas imágenes sobre una misma figura; es necesario para ello tener puntos de referencia fijos en las diversas pruebas, lo que es fácil. Se puede también, siguiendo el ejemplo de ciertos experimentadores, después de haber tomado los clisés, fotografiar sobre ellos mismos una cuadrícula que permita tomar medidas y ver cuánto se ha desplazado un punto al pasar de una a otra imagen.

La cronofotografía es uno de los medios más preciosos de investigación en el estudio del movimiento, es de una aplicación muy general; se la puede emplear para seguir en sus menores detalles la locomoción de los grandes animales, así como para analizar el vuelo de los insectos o para seguir las variaciones de forma de un protozoario. Claro es que en cada uno de estos casos habrá que dotar el aparato de un objetivo especial; en el caso de los infinitamente pequeños, se empleará el microscopio.

La única dificultad que se presenta, en general, es la de la iluminación. Cuando se toman imágenes con intervalos cortos y exposición muy reducida, lo que tiene lugar en el estudio de un movimiento rápido, de un caballo al galope, por ejemplo, o de un saltador que franquea un obstáculo, se tiene generalmente bastante luz operando al sol, si es preciso, hasta eligiendo convenientemente el fondo sobre que se opera. Si se trata de un caballo blanco, se toma de preferencia un fondo más o menos obscuro; por el contrario, para un caballo de color obscuro, el fondo será claro. Cuando se trata de la fotografía microscópica, cuyas imágenes son muy amplificadas, es preciso mandar al aparato un haz extremadamente intenso. Se corre entonces el riesgo de calentar en demasía los objetos sometidos a la experiencia y quemarlos. Para salvar el inconveniente, se puede recurrir a un artificio. En lugar de colocar el disco giratorio perforado entre el objeto y el objetivo del microscopio, se le coloca entre la fuente de luz y el objeto, que entonces no está iluminado más que por intermitencias durante los cortos momentos de la exposición.

Con un poco de sentido experimental se llega a encontrar en cada circunstancia un dispositivo favorable al fin propuesto. Marey, que ha hecho un profundo estudio de la cronofotografía, ha dado, en un gran número de casos, soluciones que pueden servir de ejemplo.

VI. — **Polarización**

Hemos visto que la luz era un movimiento vibratorio del éter; pero, aun considerando una radiación monocromática, la forma de la vibración puede ser muy variable, según los casos, conservando la misma duración.

Se ha demostrado, mediante procedimientos sobre los que no hay porqué insistir, que la vibración luminosa es perpendicular a la dirección de su propagación. Tomemos, por ejemplo, un punto luminoso A (fig. 276) que manda la luz a B; en el trayecto supongamos el punto D. En este punto como en otro cualquiera de AB, la vibración luminosa es perpendicular a AB, es decir, que se produce en un plano dd, perpendicular a AB. Miremos este plano dd de frente, marquemos en él el punto D (fig. 277); las moléculas del éter vibran alrededor de este punto D. Describirán, por ejemplo, elipses análogas a la que está representada en la figura 277, estas elipses serán más o menos alargadas, variarán desde el círculo hasta la recta, hasta girarán alrededor de su centro, en una palabra, afectarán los movimientos más variados, y estarán sujetas a la sola condición de que una vibración, es decir, una vuelta de la elipse ejecutada por la molécula de éter, tendrá siempre la misma duracion, dependiente del color de la radiación considerada.

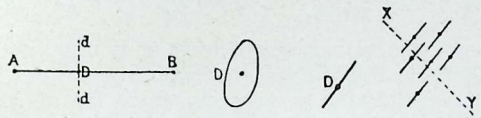


Fig. 276 Fig. 277 Fig. 278 Fig. 279

No ocurre lo mismo con la luz polarizada; en este caso la vibración, aun situada en un plano perpendicular a la dirección de propagación de la luz, es rectilínea y paralela a una dirección variable (fig. 278). Para un rayo que se propague

horizontalmente, esta dirección puede ser vertical, horizontal, más o menos oblicua, pero es constante mientras las condiciones de polarización no son modificadas. Si consideramos todas las moléculas de éter formando parte de un haz de luz polarizada, vibran según la misma orientación como lo representa la figura 279, en la que el haz está supuesto como propagándose perpendicularmente al papel, de delante a atrás o de atrás a delante. Todas estas vibraciones son perpendiculares a un plano XY, que se ve de canto y que se llama plano de polarización del haz.

¿Cómo se polariza la luz? Es preciso, para polarizar la luz, detener las vibraciones en todos sentidos menos en uno. La experiencia nos prueba que para ello hay muchos procedimientos.

Supongamos un hombre que tenga en la mano un bastón por el puño y describa en el espacio movimientos con la contera de este bastón; nada le impedirá trazar las más variadas curvas, elipses, círculos, etc. Pero, coloquémosle frente a una reja bastante espesa para dejar pasar justamente el bastón; no podrá describir, al otro lado de la reja, más que movimientos rectilíneos, la reja ha polarizado el movimiento. De la misma manera, tenemos especies de rejas para vibraciones luminosas, que no dejan pasar la vibración más que en una sola dirección y que polarizan la luz.

El más empleado de los aparatos que polarizan la luz, el único que se encuentra en la práctica, es el prisma de Nicol. Cuando la luz pasa por el Nicol es filtrada, todas las vibraciones tienen la misma dirección perpendicularmente a un cierto plano de polarización.

¿Cómo podremos reconocer que la luz está polarizada? Tomemos un segundo Nicol semejante al primero, orientado de la misma manera, y coloquémosle en el trayecto del fascículo que suponemos polarizado; la luz le atravesará sin alteración. Hagámosle ahora sufrir una rotación de 90° alrededor de su eje, en su guarnición, deberá extinguir completamente el haz. En efecto, volvamos a la comparación de la reja. Si detrás de la primera reja, a través de la que se ha pasado el bastón, se coloca una segunda orientada de la misma manera, no influirá en nada sobre el movimiento del bastón, pero

hagámosla girar 90°, los barrotes, que eran verticales, por ejemplo, se harán horizontales; todo movimiento será detenido. El primer Nicol, que ha servido para polarizar la luz, se llama el polarizador; el segundo es el analizador. Los dos Nicols son en suma idénticos, no son polarizador o analizador más que por el sitio en que se les ha colocado.

Rotación del plano de polarización. — Un gran número de substancias están dotadas del poder rotatorio; he aquí lo que esto significa. Supongamos un haz de luz polarizada que llega al ojo; todas las vibraciones serán verticales, para fijar las ideas; el plano de polarización será horizontal. Interpongamos en el trayecto del haz un cuerpo dotado de poder rotatorio, después del paso a través de este cuerpo, la vibración no será más vertical, sino más o menos oblicua, su dirección, así como la del plano de polarización, han girado. Es decir, que el plano de polarización XY de la figura 280 ha sufrido una rotación de un ángulo α en el sentido de la flecha f para tomar una nueva posición $X'Y'$. Se dice que la substancia hace girar el plano de polarización a la derecha, o que es dextrogira. El plano de polarización habría podido girar en sentido inverso de la flecha f, la substancia hubiese sido levogira.

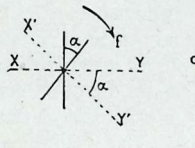


Fig. 280

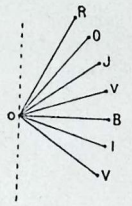


Fig. 281

Con ayuda de un analizador, es fácil reconocer que el plano de polarización ha girado; antes de interponer la substancia dotada de poder rotatorio, se obtenía la extinción del haz en una primera posición; después de la interposición ha sido preciso hacer girar el analizador el ángulo α para mantener esta extinción.

Lo que acabamos de decir se refiere a una luz monocromática. Si se tiene la luz compleja blanca, por ejemplo, la rotación no es la misma para todos los colores; en general, crece del rojo al violeta. Resulta que, siendo todas las vibra-

ciones paralelas entre sí en el haz polarizado, no lo son después del paso a través de la substancia dotada del poder rotatorio, no tienen el mismo plano de polarización. De ello resulta que no hay posición del analizador que las extinga todas, si extingue el rojo, no hace más que debilitar los otros colores, cada vez menos, yendo del rojo al violeta. Haciendo girar el analizador, se extinguen, pues, sucesivamente las diferentes radiaciones; las que lo atraviesan dan el color complementario de las que son detenidas y se ve aparecer así una serie de coloraciones muy brillantes y muy variadas.

Hay algunos cuerpos dotados de poder rotatorio que pierden esta propiedad cuando se les disuelve en un líquido inerte, como el agua; tal ocurre al clorato de sodio. Esto depende de que, en tal caso, el poder rotatorio está ligado a la forma cristalina del cuerpo. Pero, en general, la propiedad de hacer girar el plano de polarización está conservada en la solución, que es tanto más activa cuanto más cuerpo hay disuelto.

En estas condiciones, el ángulo que gira el plano de polarización, cuando pasa la luz a través de una cuba de caras paralelas que contiene una solución, es proporcional al espesor de la cuba y al peso del cuerpo que está contenido en la unidad de volumen. Además, depende del color de la luz empleada. Si hay una mezcla de cuerpos, las rotaciones producidas por cada uno de ellos, tomadas aisladamente, se suman. Se concibe la importancia de esta ley, debida a Biot. En efecto, ella nos da el medio:

1.º De caracterizar un cuerpo por su poder rotatorio; característica importante porque permite reconocerle. Si, en efecto, tomamos siempre el mismo peso de cuerpo en solución en el mismo volumen, y lo examinamos bajo el mismo espesor, es decir, en la misma cuba, el ángulo según el cual gira el plano de polarización en la luz amarilla, por ejemplo, estará definido; se le podrá medir. Cuando se haga una medición sobre un cuerpo desconocido, bastará referirse a una tabla de poderes rotatorios para conocer el cuerpo sobre el que se ha operado. Es preciso, para ello, que el cuerpo sea puro; se podrá, durante las operaciones de purificación de un cuerpo, seguir la marcha de esta purificación, midiendo los poderes rotatorios; cuando se llegue a un poder constante, que no es modificado por las operaciones sucesivas, se tendrá un cuerpo puro. Para poder trazar una tabla de los poderes rotatorios específicos, es preciso, pues, convenir en la luz que se emplea; salvo indicación especial, es la luz amarilla emitida por una llama, en la que se vaporiza una sal de sodio. El espesor de la cuba será 1 dm.; en cuanto a la concentración, ha de ser tal que la unidad de volumen contenga la unidad de peso del cuerpo. Así, 1 dm.^{3} deberá contener 1 kg. del cuerpo. En general, esto no ocurre, pero se hará la corrección por cálculo, sabiendo que el poder rotatorio es proporcional al peso de substancia activa. Si, por ejemplo, para 10 g. por litro se ha encontrado un ángulo α, el poder rotatorio específico será 100 veces mayor, es decir, $100 \times \alpha$; este número es el que se inscribirá o buscará en la tabla.

2.º La ley de Biot nos permite, además, cuando se sabe que una solución no contiene más que un solo cuerpo dotado de poder rotatorio y se conoce su poder rotatorio específico, dosificar el cuerpo en solución. Desde el punto de vista teórico, es evidente. Coloquemos una solución de azúcar de caña en una cuba de 1 dm. de espesor; si esta solución contiene 1 kg. de azúcar por litro, el plano de polarización de la luz amarilla debe girar a la derecha 66º,5; no gira más que 33º,25, luego hay 500 g. de azúcar por litro; si gira 16º,62, hay 250 gramos de azúcar, y así sucesivamente; un sencillo cálculo dará, en cualquier momento, la riqueza en azúcar del litro de solución.

Teóricamente, la instalación para estas mediciones es muy sencilla. Se hace pasar la luz natural a través de un polarizador *P* (fig. 282), después a través de un analizador *A*, se hace girar este último de modo que no se perciba ninguna luz; en este momento, según lo que hemos dicho, el plano de polarización del analizador es perpendicular al del polarizador. Interpongamos ahora la cuba *C*, que contiene la solución, sobre la que se quiere experimentar; para mantener la extinción es preciso girar *A* un ángulo igual al ángulo de rotación del plano de polarización; se lee esta rotación sobre un disco *dd*, dividido en grados. Este procedimiento, que exige el empleo de una luz monocromática, es malo en la práctica, por-

que en la vecindad de la extinción, se titubea mucho sobre la posición que hay que dar al analizador; no hay ninguna precisión en esta determinación.

En lugar de hacer girar el analizador A para buscar la extinción, se concibe que se pueda interponer entre A y C (fig. 282), una pieza llamada compensador, que produce una rotación de sentido inverso e igual a la de C. Entonces se tendría de nuevo la extinción. Semejante compensador se compone de dos prismas A y B de cuarzo (fig. 283), que se deslizan uno sobre otro y forman en su parte superpuesta una lámina de caras paralelas de espesor variable; además, hay un cuarzo C,

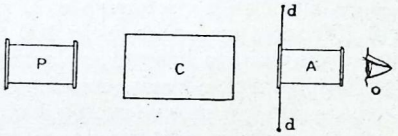


Fig. 282

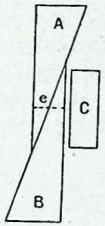


Fig. 283

de caras paralelas. A y B están tallados en cuarzos dextrogiros, C en cuarzo levogiro. En el caso de la figura, siendo el espesor e igual al de C, el conjunto no tiene ningún poder rotatorio. Si se aumenta el espesor de e, el aparato es dextrogiro y puede compensar las substancias levogiras. Si se disminuye e, C se le apodera y puede compensar substancias dextrogiras.

Se construyen cierto número de aparatos llamados polarímetros, o sacarímetros, puesto que están principalmente destinados a la dosificación del azúcar; los modelos más generalizados son el sacarímetro de Soleil y los sacarímetros de penumbra de Laurent o de Cornu.

No daremos su teoría detallada, sino únicamente la manera de utilizarlos.

Sacarímetro de Soleil (figs. 284 y 285). — Cuando se mira por el ocular D, del aparato iluminado por un mechero de gas ordinario colocado frente a A, se ve un disco dividido diametralmente en dos partes de colores diferentes. Tirando sobre el ocular, se enfoca sobre la línea de división diametral,

estando el tubo, destinado a contener el líquido que se quiere examinar, lleno de agua destilada. Se gira sobre un botón H que hace funcionar el compensador hasta el momento en que los dos tintes son idénticos. En este momento, la escala graduada R debe estar a cero, de lo contrario, se la pone a cero, rodando únicamente un botón lateral, no visible en la figura, pero muy aparente en el

Fig. 284

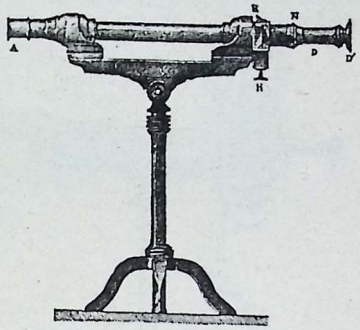


Fig. 285

instrumento. Se reemplaza el agua destilada por la solución azucarada, los colores cambian y se les conduce a la igualdad maniobrando el compensador por H, se lee entonces la división de la escala graduada. Refiriéndose a una tabla o multiplicando el número leído por 0,163, se tiene el peso de glucosa por litro de solución. El número 0,163 se refiere a los tubos T, de 20 cm. de longitud.

Sacarímetros de penumbra (fig. 286). — Los sacarímetros de penumbra se iluminan por medio de un mechero de Bunsen que contiene cloruro de sodio fundido. Cuando se mira por el ocular O se ven también los dos semidiscos. En lugar de ser de colores diferentes, como en el sacarímetro de Soleil, son los dos de color amarillo, pero son más o menos obscuros. Estando el tubo lleno de agua destilada y el ocular enfocado, se pone el aparato a cero, rodando el botón P y observando el nonius a través de una lupa. Si en este momento los dos semidiscos no tienen el mismo color, se consigue éste rodando sobre O. Se reemplaza entonces el agua destilada por la solución azucarada, la igualdad de color desaparece, se gira P

de modo que se consiga esta igualdad, y después de la lectura se acaba como para el sacarímetro de Soleil. Es preciso advertir que el disco lleva dos graduaciones: una en grados de círculo, permite determinar el poder rotatorio de cualquier substancia; la otra especialmente destinada a la glucosa,

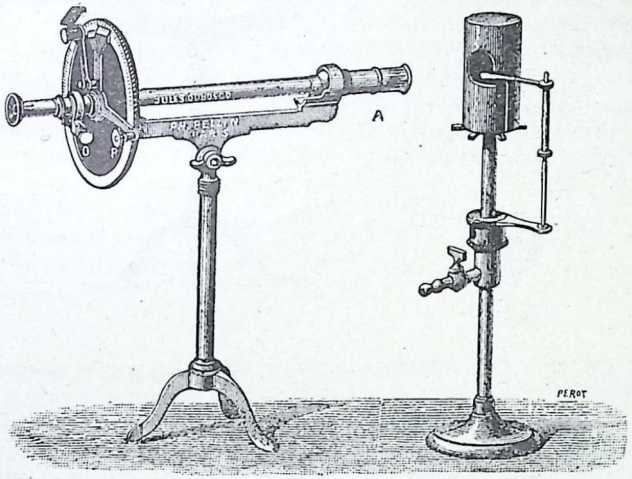


Fig. 286. — Refractómetro de penumbra

corresponde a la del sacarímetro de Soleil. En el modelo de Laurent, la pequeña palanca *J* (fig. 287), movible entre dos topes, permite, elevándola o bajándola, modificar la luminosidad del instrumento.

Cuando se opera con una orina coloreada, se la decolora añadiéndola un décimo de su volumen de una solución de acetato de plomo. Para compensar la dilución de la solución así obtenida, se emplean tubos de 22 cm. de longitud, en lugar de 20 cm.; así no hay que cambiar nada en las observaciones y los cálculos.

Doble refracción. — El examen de los cuerpos a la luz polarizada proporciona con frecuencia datos interesantes sobre

su estructura. Así, coloquemos un polarizador y un analizador en la posición de la extinción, es decir, con sus planos de polarización perpendiculares entre sí. En este momento introduzcamos entre los dos aparatos un pequeño cristal; inmediatamente les veremos tomar los más brillantes colores. Haciendo girar el cristal, estos colores cambiarán y, en ciertas posiciones, se producirá la extinción. Este pequeño cristal está dotado de lo que se llama doble refracción.

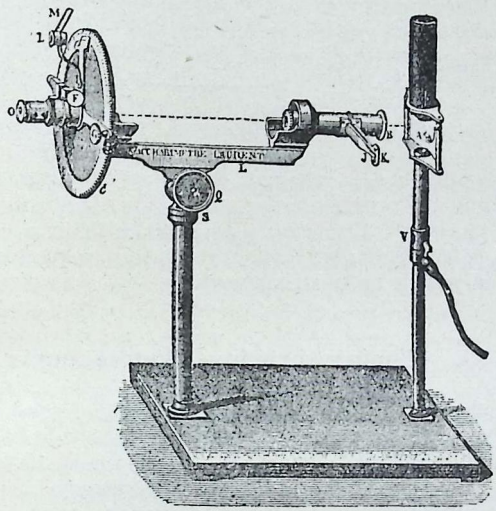


Fig. 287

Tomemos ahora un sencillo trozo de cristal; introducido entre *P* y *A* no produce ningún efecto, pero si se le somete a una tracción, una flexión o una compresión, o si está en cierto estado de tensión a consecuencia del temple, inmediatamente vemos aparecer la doble refracción. Haciendo girar el trozo de cristal, las posiciones en las que se produce la extinción nos dan las direcciones de la tracción o de la compresión, o las direcciones perpendiculares a estas acciones. Así, supo-

niendo que se mira en el aparato, figuremos por *OH* y *OV* (fig. 289) las direcciones de los planos de polarización del analizador y del polarizador. Si un trozo de cristal comprimido o estirado lateralmente se introduce entre los dos, habrá extinción cuando la dirección de compresión o de tracción será paralela a *OV* u *OH*.

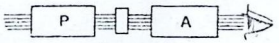


Fig. 288

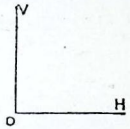


Fig. 289

Ciertos tejidos, el cartílago, los discos obscuros de los músculos, son birrefringentes, y su estudio desde este punto de vista es importante. Es preciso, pues, poderlos mirar al microscopio a la luz polarizada; veremos más adelante que todo microscopio permite hacerlo fácilmente.

VII. — **Fosforescencia y Fluorescencia**

Algunos cuerpos, como el sulfuro de calcio, gozan de la propiedad de ser luminosos en la obscuridad, cuando han sido previamente expuestos durante algún tiempo a la luz del sol o de un foco artificial. Se dice que son fosforescentes, por analogía con el fenómeno que presenta el fósforo en el aire.

Otros cuerpos, una solución de eosina, por ejemplo, emiten a la luz del sol, cuando se les mira por reflexión, una luz que recuerda la de los cuerpos fosforescentes, pero son invisibles en la obscuridad. Son fosforescentes, pero solamente mientras están expuestos a la luz. Se ha reservado a este fenómeno el nombre de fluorescencia.

En realidad, no hay límite entre los cuerpos fluorescentes y los cuerpos fosforescentes; no es más que cuestión de duración de un mismo fenómeno. En un cuerpo fosforescente, se ve, en efecto, después de la insolación, disminuir gradualmente la luminosidad para desaparecer finalmente. Por otra parte, Ed. Becquerel ha demostrado que si se ilumina un cuerpo fluorescente y se le observa muy rápidamente cuando se le pasa a la obscuridad, permanece luminoso durante cierto tiempo, más o menos largo, según el cuerpo. Así, el espato de Islandia permanece luminoso ⅓ de segundo aproximadamente, el corindon 0",05, algunos platinocianuros 0",00025 solamente. Se podría, pues, hacer una escala completa desde los cuerpos que conservan la propiedad de ser luminosos, después de iluminados, durante una fracción de tiempo extremadamente pequeña, hasta los cuerpos que la conservan durante muchas horas y hasta muchos días.

La luz emitida por los cuerpos fosforescentes no es jamás del mismo color que la luz incidente, está generalmente, más próxima de la región roja del espectro que esta última. En la luz incidente es la parte del espectro vecina del violeta la que produce la fosforescencia; se puede apreciar esto dispersando un haz de luz por el prisma y paseando por él el cuerpo que se quiere estudiar; el cuerpo tomará entonces un color más vecino del rojo que la radiación que lo ilumina. Se puede de esta manera hasta poner en evidencia la región ultravioleta del espectro, basta colocar en él un trozo de papel embadurnado de una solución de sulfato de quinina o de esculina, el papel se hará luminoso, mientras que la luz ultravioleta incidente no impresiona la retina. Los cuerpos fluorescentes absorben las radiaciones que les dan su propiedad, para emitirlas en seguida transformadas en otro color. En efecto, si se coloca en el trayecto de un haz luminoso una solución de eosina, por ejemplo, después de su paso a través del líquido, la luz es incapaz de hacer fluorescente otra solución de eosina. Se observa que hasta en la primera cuba únicamente la cara que está del lado de la luz es fluorescente, los rayos activos son rápidamente absorbidos por las primeras capas del líquido. Algunos tejidos vivos son fluorescentes, particularmente la córnea y el cristalino, que se hacen luminosos en la región ultravioleta; hay, pues, razón para concluir, de lo que antecede, que los rayos ultravioleta no pueden llegar hasta la retina.

Las variaciones de temperatura tienen una gran influencia sobre la fosforescencia, que aumenta cuando la temperatura se eleva y disminuye en el caso inverso. Basta, para darse cuenta, aproximar los dedos a un papel embadurnado de una materia fosforescente y hecha luminosa en la obscuridad por una

insolación previa; todas las regiones así calentadas aumentan de luminosidad, para quedar menos activas que el fondo cuando se alejan los dedos; la fosforescencia se agota más pronto por la elevación de temperatura.

Un gran número de organismos vivientes son fosforescentes; pero este fenómeno no tiene necesidad de una insolación previa, no es comparable a la fosforescencia del sulfuro de calcio, está directamente unido a la vida de los tejidos y a los fenómenos químicos que en ellos se producen.

Algunas partes de plantas, desprovistas de clorofila, emiten una luminosidad en la obscuridad; así ocurre con las flores de Caléndula o de Capuchina, un gran número de Hongos y de Algas. Existen bacterias que gozan también de esta propiedad y, cuando invaden a los animales, la comunican a sus tejidos; esto ocurre, sobre todo, después de la muerte. Las bacterias luminosas infectan también algunas veces a los mamíferos, y ocurre entonces que su carne es fosforescente; esto ocurre principalmente con el cerdo, el toro, el caballo, y ha sido indicado en el hombre. Estas bacterias pueden cultivarse y se obtienen caldos de cultivo que emiten una luz bastante intensa para permitir distinguir en la obscuridad los caracteres de imprenta.

Un fenómeno muy conocido es la fosforescencia que adquiere algunas veces el mar; de ordinario, es debida al noctiluca, protozoario cuya masa está sembrada de puntos luminosos, como se puede reconocer al microscopio.

En fin, es frecuente encontrar durante las noches de verano, lo que vulgarmente se denomina gusanos luminosos, que emiten una luz muy intensa; pertenecen a diferentes variedades de insectos.

VIII. — **Efectos de la luz sobre los seres vivientes**

Las acciones químicas que se producen en las plantas bajo la influencia de la luz solar, constituyen uno de los fenómenos más importantes en la economía de la tierra; sin ellas la vida sería imposible.

Sabemos, en efecto, que los animales absorben sin cesar

el oxígeno atmosférico para expulsar el anhídrido carbónico. El protoplasma incoloro de las plantas obra de la misma manera y, por lo tanto, el aire debería poco a poco perder todo su oxígeno y enriquecerse de anhídrido carbónico. Nada de esto ocurre; sabido es que la composición del aire permanece notablemente constante. Esto depende de que las partes verdes de las plantas, más concretamente, la clorofila, obra de una manera inversa. Bajo la influencia de la luz, esta clorofila descompone el anhídrido carbónico del aire fijando el carbono sobre la planta y exhalando el oxígeno. Además, las plantas evaporan el agua. Las condiciones de iluminación desempeñan un papel considerable en la intensidad de estos cambios.

Cuando una planta verde está durante mucho tiempo mantenida en la obscuridad, pierde su color verde, se ahila; si se le lleva de nuevo a la luz verdea de nuevo, más o menos rápidamente. Basta para ello una luz bastante débil, la de un mechero de gas, por ejemplo; a medida que la intensidad luminosa aumenta el reverdecimiento, se realiza más rápidamente hasta cierto límite en que hay un óptimum. Más allá, el reverdecimiento se hace lento y la clorofila puede hasta morir. Cuando esta iluminación es ligera, los granos se colocan unos junto a otros para mejor aprovechar la luz, cuando la intensidad luminosa se hace excesiva, y se llega a la zona peligrosa para la vitalidad de la clorofila, los granos se colocan unos detrás de otros para protegerse.

Numerosas investigaciones han demostrado que a esta clorofila es a la que hay que atribuir la reducción del anhídrido carbónico del aire.

La experiencia clásica consiste en poner una hoja verde en una probeta invertida sobre el mercurio y llena de una solución acuosa de anhídrido carbónico. Se le expone al sol y al cabo de cierto tiempo se aprecia que una parte del anhídrido carbónico ha sido reemplazado por el oxígeno. El carbono fijado se une al agua de la planta para dar un hidrato de carbono: el almidón.

No todas las radiaciones son igualmente propias para la formación de la clorofila y para poner en actividad su función. Tomemos una solución de clorofila e interpongámosla en el trayecto de un haz luminoso que dispersaremos en seguida

para formar el espectro, apreciaremos la presencia de una serie de bandas de absorción formando dos grupos principales (fig. 290), uno a la izquierda, del amarillo hacia el rojo, el otro a la derecha, del azul hacia el violeta. Estas radiaciones absorbidas son las activas, porque si se hace caer la luz filtrada a través de una solución de clorofila sobre la hoja verde sumergida en una solución acuosa de anhídrido carbónico, se observa que la reducción con eliminación de oxígeno no se produce. Se pueden también disponer una serie de probetas con hojas, en las diversas regiones de un espectro solar, investigando después de cierto tiempo el anhídrido carbónico

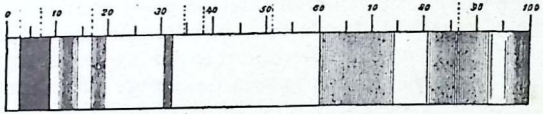


Fig. 290

reducido; se aprecia que la acción dominante se produce en el rojo, en la zona de la banda negra del espectro de absorción, que hay también cierta acción menor en el azul y el violeta, pero no hay ninguna en el verde. Engelmann ha dado a conocer una demostración muy elegante del reparto de la actividad clorofílica en el espectro. Colocando un prisma bajo la platina de un microscopio, forma sobre una lámina portaobjetos un espectro. Sobre esta lámina está tenso un filamento de alga sumergido en agua que contiene bacterias ávidas de oxígeno. Poco a poco, el oxígeno tiende a desaparecer por efecto de la acción de las bacterias, y se las ve acumularse alrededor del alga en las regiones en que se produce la reducción de anhídrido carbónico y el desprendimiento de oxígeno; los grupos de estas bacterias indican la actividad de esta reducción (fig. 291).

La luz obra también sobre la vaporización del agua por las plantas verdes. Para dar una idea de la amplitud de las variaciones que pueden producirse, citemos este ejemplo: Una planta ahilada exhala 1 cm.³ de agua en la obscuridad; en la luz produce 2 cm.³, 2 antes de haber enverdecido, y después de enverdecer 100 cm.³ Esta vaporización está, como se

ve, ligada a la acción de la luz y de la clorofila, y se produce en las mismas regiones del espectro que la descomposición del anhídrido carbónico.

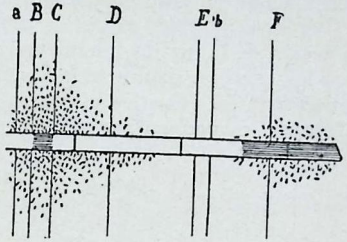


Fig. 291

En general, las plantas tienen tendencia a dirigirse hacia las fuentes de luz que las ilumina; así se ve que con mucha rapidez las plantas de habitación se dirigen hacia las ventanas. Esto no es absolutamente general; se ven ciertas partes de vegetales, como los zarcillos de la viña virgen, huir, por el contrario, de la luz; hay, pues, un fototropismo positivo y un fototropismo negativo. Esta acción es producida por las radiaciones más refrangibles y no se conoce con fijeza la causa del fenómeno.

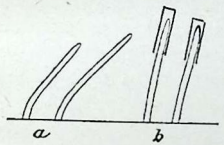


Fig. 292. — Plántulas de avena, *a*, enteramente iluminadas; *b*, con ápice cubierto por una hoja de estaño.

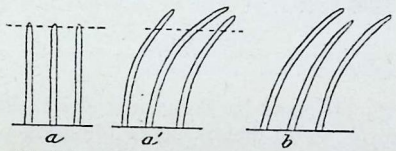


Fig. 293. — *a*, *a'*, plántulas de avena iluminadas solamente en su ápice; *a*, antes de la exposición a la luz; *a'*, después de la acción de la luz; *b*, plántulas iluminadas por completo.

Se sabe únicamente que su acción predominante se ejerce en lo alto de las plantas; si se iluminan lateralmente las plántulas de avena cubriendo la punta de algunas de ellas con un pequeño capuchón de papel de estaño, se las ve encorvarse menos que las plántulas libres (fig. 292). Si, por el contrario, no se ilumina más que el ápice, se las ve encorvarse hasta la base, lo que prueba que la excitación luminosa de este ápice se propaga por toda la altura de la planta (fig. 293). Por último, si se ilumina por un lado la mayor parte de la altura del tallo y en sentido inverso la cabeza, se ven aisladamente los efectos de cada una de las causas; al prin-

cipio se tiene una doble flexión en *S*, pero pronto la acción preponderante del ápice la arrastra y la corvadura debida a la iluminación del tallo disminuye (fig. 294).

Citemos también entre los movimientos de las plantas por la acción de la luz los fenómenos del sueño. Están muy unidos con los cambios de iluminación, porque de Candolle ha podido intervertir los períodos gracias a la iluminación artificial. No obstante, es preciso para ello un nuevo hábito, y no es sino al cabo de muchos días cuando se consigue modificar los períodos de sueño; hasta en ciertas plantas, de Candolle no ha podido conseguirlo; permanecen fijadas en su periodicidad normal.

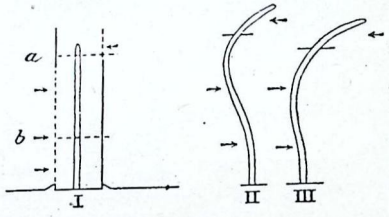


Fig. 294. — I, plántula de avena protegida por una capa opaca de manera que reciba en su parte superior (a) la luz por la derecha y en todo el resto de su longitud (b) la luz por la izquierda; II, la misma plántula después de algún tiempo de iluminación; III, la misma después de una larga iluminación.

Una pequeña masa de protoplasma, un amibo, por ejemplo, tiende a desplazarse en un campo luminoso, ya marchando de las partes más obscuras hacia las más iluminadas, ya en sentido contrario; es lo que se llama fototaxia positiva o negativa. Algunas veces se ven pequeñas algas alargadas orientarse sencillamente bajo la influencia de la luz, dirigiendo siempre una de sus extremidades hacia el foco que las ilumina; otras veces, y esto se presenta de una manera particularmente manifiesta en un rizópodo estudiado por Engelmann, en el momento de una iluminación súbita, el rizópodo, que emitía prolongaciones, se contrae bruscamente, tomando la forma de una bola. Todos estos fenómenos de excitaciones del protoplasma por la luz son principalmente debidos a las radiaciones azules y violetas, es decir, a la parte actínica del espectro.

Existe un hecho todavía más curioso: la luz puede aportar cambios definitivos en ciertos elementos unicelulares. Haciendo cultivos de levadura en mosto de cerveza expuesto a la luz, la levadura cambia de forma y hasta de propiedades, porque puede pasar de una especie aerobia a una especie anaerobia.

Ciertas transformaciones obtenidas así, se han fijado, es decir que, haciéndose los cultivos sucesivos en la obscuridad, los hijos de un cultivo insolado difieren de los hijos de un cultivo no insolado. Así, cultivando esporas de Aspergillus glaucus en un mosto de cerveza insolado y pasado en seguida a la obscuridad se pueden obtener series de cultivos desarrollándose de una manera constante siguiendo el tipo Penicillium. Existe un bacilo que, cultivado sobre patata, le da un color púrpura; estos cultivos, expuestos durante tres horas a la luz, son modificados hasta el punto de que los cultivos que de ellos descienden no dan lugar a este fenómeno de coloración.

Además de lo expuesto, la luz tiene sobre las bacterias una acción de la mayor importancia: es bactericida. Resulta, en efecto, de las investigaciones de un gran número de sabios que los cultivos de diversos microbios expuestos a la luz se hacen estériles; parece demostrado que esto depende de una sobreoxidación ocurrida bajo la influencia de las radiaciones químicas del espectro. Lo mismo sucede con las toxinas segregadas por los microbios, y se comprende la importancia considerable de estos hechos desde el punto de vista de la higiene de las habitaciones. Para asegurarles la salubridad, les hace falta no solamente aire, sino luz.

Si nos fijamos ahora en los seres más elevados en organización, vemos que la influencia de la luz continúa dejándose sentir. Béclard ha descubierto que los huevos de mosca expuestos a las radiaciones de diferentes colores daban al cabo del mismo tiempo gusanos de desarrollo diferente; también aquí era el espectro químico el que tenía la acción más favorable, y parecía que el verde era el menos ventajoso. Diversos autores han llegado a obtener resultados análogos; los más patentes son los de Leredde y Pautrier. Estos autores colocaron en dos acuariums, uno de cristal rojo y otro de cristal azul, renacuajos de Rana temporaria; estos acuariums estaban siempre expuestos a una luz muy viva. Al cabo de un mes, los renacuajos del acuarium azul se habían transformado en ranas, los del acuarium rojo se habían quedado en el mismo estado. Un examen microscópico demostró que con las radiaciones químicas, los fenómenos de kariokinesis eran mucho más activos que en el resto del espectro.

La luz tiene una influencia considerable sobre la pigmentación de los animales. Hagamos notar que, en general, en los que de entre ellos viven a la luz, las partes más iluminadas son las más obscuras, el vientre es más claro que el dorso. La experiencia ha podido poner en evidencia de una manera directa esta relación de causa a efecto entre la luz y el pigmento. Criando ciertos animales en la obscuridad de las catacumbas, se les ha visto despigmentarse poco a poco; llevando, por el contrario, a la luz especies cavernícolas blancas, se han coloreado; aparecen primero lunares verdenegruzcos para dar después lugar a manchas confluentes y por último a una coloración uniforme. Algunas veces, y esto se presenta de una manera particularmente notable en el camaleón, se puede ver al pigmento ganar la superficie de la piel, o viajar a la profundidad, según que el animal esté expuesto a la luz o se encuentre en la obscuridad. De aquí resultan variaciones de color de este animal. También son los rayos químicos los que producen estos fenómenos, y es de creer que el pigmento tiene por efecto proteger la piel, por absorción de sus rayos químicos, contra su influencia nociva.

Se admite generalmente que en la luz los cambios respiratorios son más activos que en la obscuridad. No obstante, las investigaciones recientes parecen haber demostrado que esta sobreactividad no es debida a la acción directa de la luz, sino a que en la obscuridad los animales están más inmóviles que en la luz y, por consiguiente, consumen menos.

Todos los seres vivientes, desde la más pequeña de las algas hasta los mamíferos, son, pues, influenciados, directa o indirectamente, en sus condiciones de existencia, por la iluminación a que están sometidos.

Esta cuestión dista mucho de estar bien estudiada; es, en efecto, muy compleja. No obstante, hay un punto que en estos últimos años ha llamado mucho la atención de los médicos: es la acción producida por una iluminación intensa sobre los tegumentos.

Desde antiguo se conoce la insolación. Es un eritema que se produce principalmente en las partes descubiertas del cuerpo, con más rareza en las manos que en la cara o el cuello, porque, en general, a consecuencia de su exposición más directa

a la luz, están más pigmentadas. Esta insolación se produce siempre que una región del cuerpo está expuesta a una iluminación intensa, como saben bien los ascensionistas, que se ven obligados a tomar precauciones especiales para defenderse de la gran luz de los glaciares; lo mejor es ennegrecerse la cara con hollín para impedir que los rayos actínicos lleguen hasta la piel.

Desde el empleo de los focos de luz eléctrica intensa, los accidentes de la misma índole se producen con mucha frecuencia en las fábricas y en las diversas explotaciones industriales. Las observaciones de insolaciones eléctricas resultan frecuentes. Charcot, que las indicó por primera vez, las atribuyó a los rayos químicos y el tiempo ha demostrado que no se había equivocado. Basta, en efecto, para preservarse, protegerse con ayuda de un cristal rojo de los fotógrafos; un cristal azul no tiene ningún valor. Para las luces de menor intensidad, cuando se trata, por ejemplo, de atenuar sencillamente la luz del día, los cristales amarillos prestan excelentes efectos. En estos últimos tiempos se han preconizado cristales de fabricación especial, que serían particularmente eficaces.

Esta acción tan intensa de la luz sobre los tegumentos es utilizada actualmente con un fin terapéutico. Diversas afecciones de la piel son tratadas con éxito por la iluminación natural o artificial. Desde los trabajos de Finsen, la Fototerapia ha tomado un gran desarrollo.

En un principio quedó reducido todo al empleo de la luz emitida por un arco eléctrico, o, cuando era posible, al de la luz solar. Los dispositivos imaginados con este fin son numerosos. El aparato solar de Finsen se componía sencillamente de una gran lente hueca; se introducía en ella una solución de color azul celeste con el fin de detener los rayos caloríficos y dejar pasar los rayos químicos. Con esta lente se concentraba la luz solar sobre las partes que se quería tratar. El aparato eléctrico del mismo autor consistía en un arco cuya luz era concentrada por lentes de cuarzo que dejan pasar los rayos químicos. Los rayos atravesaban una capa de agua destilada destinada a absorber la parte calorífica del espectro. Además, el punto de la piel tratado estaba cubierto por una cámara hueca de cristal de roca por la cual pasaba una co-

rriente de agua fría, los tejidos eran así refrescados sin cesar. Esta cámara tiene, además, otro papel importante: sirve para ejercer sobre los tejidos en tratamiento una compresión para rechazar la sangre, lo que les hace más transparentes a los rayos químicos, que pueden entonces obrar a mayor profundidad.

Los demás aparatos no son más que modificaciones o perfeccionamientos de los de Finsen, que los contiene todos en principio.

Actualmente, junto a la luz natural o artificial, se ha introducido en terapéutica los rayos X y los que emanan del Radio.

Nos limitaremos a mencionar aquí estas radiaciones, que son estudiadas en la séptima parte del presente volumen.

Se utiliza también, desde algún tiempo o, por lo menos, se ha empleado con éxito en ciertas experiencias del tratamiento de los cánceres, la luz emitida por las lámparas eléctricas al mercurio con tubos de cuarzo. Estas lámparas emiten radiaciones muy refrangibles, particularmente ricas en rayos ultraviolados. Es, en suma, una aplicación del método de Finsen con un procedimiento diferente para producir los rayos actínicos. Según investigaciones recientes, en particular según los trabajos de Courmont y Nogier, la luz emitida por estas mismas lámparas sería muy eficaz para esterilizar los líquidos.

QUINTA PARTE

ÓPTICA

I. — Principios de óptica geométrica

Nociones generales

Sombras. — Supongamos un punto luminoso *A* y una pantalla *BB*, toda la superficie de esta pantalla estará iluminada; pero coloquemos entre el punto *A* y la pantalla *BB* un cuerpo opaco *C;* una parte de la pantalla dejará de ser luminosa a consecuencia de la presencia de lo que se denomina una sombra.

Si se trazan líneas rectas que, partiendo del punto luminoso *A* pasen por los bordes del cuerpo opaco *C*, se aprecia que estas líneas rectas determinan por su intersección con la pantalla *BB*, la separación de la sombra y de la luz. Todo punto *M* de la pantalla, así como la recta que le une a *A* que encuentre al cuerpo opaco estará en la sombra. Por esto es por lo que se dice que la luz se propaga en línea recta, ocurriendo todo como si de *A* partiesen rayos luminosos. Según que estos rayos luminosos puedan ir hasta la pantalla o sean interceptados en el camino, iluminan esta pantalla o la dejan en la sombra.

La experiencia es generalmente difícil de realizar de un modo tan sencillo; las fuentes de luz de que disponemos no están reducidas a un punto, sino que tienen cierta dimensión, como la figurada en *A* (fig. 296). Propagándose la luz en línea recta, los rayos luminosos que parten de la fuente *A* y pasan

por el borde C del cuerpo opaco, se encuentran todos comprendidos entre CM y CO. De la misma manera, los rayos que pasan por el borde D están todos comprendidos entre DP y DN. Resulta de la simple inspección de la figura que un punto de la pantalla situado en el intervalo OP no recibe luz de ningún punto de la fuente luminosa, está en la sombra absoluta. Un punto situado a la izquierda de M, o a la derecha de N, está en plena luz, ninguno de los rayos que le llegan de A es detenido por el cuerpo opaco. Pero un punto tal como R, situado en la zona MO o en PN no recibe la luz más que de una parte de la fuente luminosa. En el caso de B, todos los rayos que parten de la parte derecha de la fuente A son detenidos. Es fácil de ver que los puntos de la zona MO reciben tantos menos rayos de la fuente luminosa cuanto más próximos están a O. En la pantalla BB se ve, pues, no una sombra claramente separada de la luz, sino una sombra que pasa por sus bordes, por gradación, a la luz. Esta zona MO, por la que se pasa insensiblemente de la sombra a la luz, se llama penumbra. Cuanto más aumenta la superficie de A, más disminuye la sombra limpia OP; con una gran fuente de luz y un cuerpo pequeño CD, no se tiene sombra en la pantalla BB.

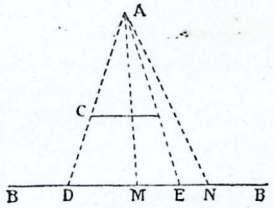


Fig. 295

Absorción. Difusión. Reflexión y refracción de la luz. Indice de refracción. — Cuando los rayos luminosos encuentran la superficie de un cuerpo, pueden sufrir diferentes suertes:

1.º Son absorbidos.
2.º Son difundidos.
3.º Son reflejados.
4.º Son refractados.

1.º Tomemos un objeto perfectamente negro: es difícil de realizar esta condición de una manera absoluta; sin embargo, exponiendo la superficie de un cuerpo a una llama humosa se obtiene un depósito de negro de humo bastante satisfactorio. Cuando miramos este depósito, aun a la luz del

día, nos parecerá siempre negro. Aunque reciba rayos luminosos, no emitirá ninguno: los absorbe todos.

2.º Hagamos la misma experiencia con un trozo de creta o de papel blanco; apreciaremos que, cualquiera que sea la posición en la que nos colocamos con relación al trozo de creta, la veremos siempre completamente blanca: la superficie de este trozo de creta envía, pues, rayos luminosos en todas direcciones. No es necesario para ello que la luz que cae sobre la superficie de la creta llegue en direcciones muy variadas. Coloquémonos, por ejemplo, en una habitación obscura, no dejando pasar, por un agujero practicado en la pared, más que un pequeño haz AI de rayos solares paralelos entre sí (fig. 297): un trozo de creta colocado en este haz parecerá luminoso, cualquiera que sea la posición del espacio en donde se encuentre el ojo. Resulta, pues, que el trozo de creta envía rayos emergentes en todas direcciones. Se dice que la luz ha sido difundida por la superficie del trozo de creta.

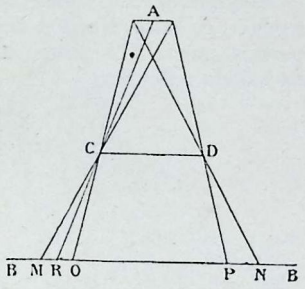


Fig. 296

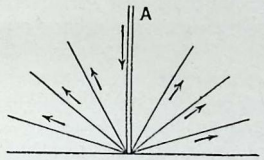


Fig. 297

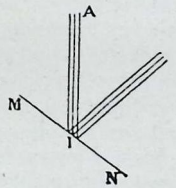


Fig. 298

3.º Hagamos también la misma experiencia con una superficie plana bien pulida MN, la de un trozo de metal, por ejemplo (fig. 298). Apreciaremos que la superficie no parece luminosa desde cualquier punto del espacio, sino que no existe más que una pequeña región desde donde se puede percibir la

luz. Podremos, con ayuda de un trozo de papel blanco sostenido con la mano y utilizando la difusión descrita en el caso precedente, explorar el espacio alrededor de *MN* para investigar en dónde se encuentra luz.

Apreciaremos así que el haz luminoso incidente *AI* ha sido enviado en otra dirección después de su encuentro con la superficie pulida *MN*, como indica la figura 298. Se dice que ha habido reflexión.

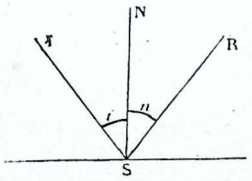


Fig. 299

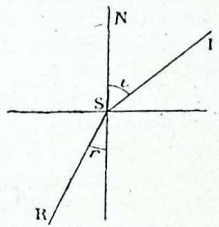


Fig. 300

Esta reflexión se realiza siguiendo leyes muy sencillas.

En lugar de tomar todo un haz luminoso, no consideremos más que un solo rayo ideal cayendo en *S* sobre una superficie reflejante (fig. 299). Tracemos en *S* una perpendicular a esta superficie: es lo que se llama la normal. Por esta normal y el rayo incidente *IS*, se puede hacer pasar un plano; este plano se llama plano de incidencia.

La primera ley de la reflexión dice que el rayo reflejado *SR* queda en el plano de incidencia.

Según la segunda ley, el ángulo *i* que forma el rayo incidente con la normal, llamado ángulo de incidencia, es igual al ángulo de reflexión *r* que el rayo reflejado forma con la normal.

4.º Supongamos, por último, el caso en que el rayo, o el haz luminoso, hiere la superficie pulida de un cuerpo transparente, de un trozo de cristal, por ejemplo. El rayo atravesará esta superficie y se propagará al interior del cuerpo. Pero, en el momento en que se efectúe su paso de un medio a otro, no continuará su camino en línea recta: habrá cambio de dirección debido a lo que se llama refracción (fig. 300).

Las leyes de la refracción son en número de dos.

La primera corresponde absolutamente a la primera ley de la reflexión: dice que el rayo refractado queda en el plano de incidencia. Este plano de incidencia se define como en el caso de la reflexión.

La segunda ley relaciona el ángulo de refracción *r* con el ángulo de incidencia *i*. Se expresa por la fórmula:

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

Es decir, que, cualquiera que sea la incidencia, la relación del seno del ángulo de incidencia con el seno del ángulo de refracción es un número constante *n*. Este número es lo que se llama índice de refracción del segundo medio con relación al primero.

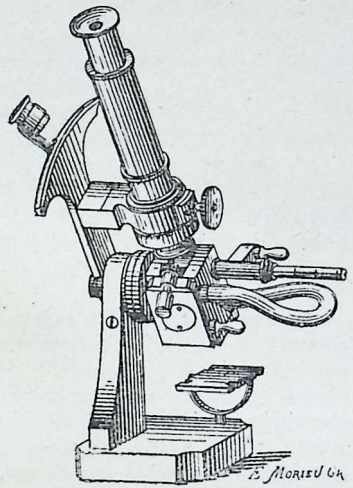


Fig. 301 — Refractómetro

Cuando *n* es mayor que la unidad, se dice que el segundo medio es más refringente que el primero: sen. *i* es mayor que sen. *r* y, por consiguiente, *i* es mayor que *r;* el rayo luminoso, refractándose, se aproxima a la normal. Si, por el contrario, *n* es más pequeño que la unidad, el segundo medio es menos refringente que el primero y el rayo luminoso se separa de la normal por la refracción.

En las investigaciones biológicas ocurre que se tiene que determinar el índice de refracción de ciertos líquidos del organismo; así, se puede de esta manera estudiar cómodamente las variaciones de su concentración en albuminoides. Se utiliza en tal caso generalmente, el refractómetro de Abbé, representado en la figura 301, pero cuyo manejo no se comprende bien más que teniendo el aparato entre las manos.

Los cuatro fenómenos que acabamos de describir: absor-

ción, difusión, reflexión y refracción de los rayos luminosos, se encuentran raras veces aislados. Cuando un haz luminoso cae sobre la superficie pulida de un cuerpo transparente, una parte de los rayos se refracta, la otra se refleja, una tercera da lugar a un poco de difusión, y es raro que, en el paso del rayo refractado a través del cuerpo y a través del aire, no haya un poco de absorción.

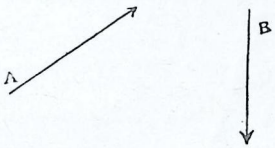


Fig. 302

Si el cuerpo es opaco y pulido, la refracción falta, pero los otros tres fenómenos subsisten. Por último, si el cuerpo es opaco y mate hay solamente absorción y difusión.

Retorno inverso de los rayos. — Un rayo luminoso puede recorrer en el espacio un trayecto extremadamente complicado por una serie de reflexiones y de refracciones. Entre los diversos fenómenos que se encuentran en el estudio de la óptica geométrica, existe uno de los más notables y cuyo conocimiento facilita mucho la solución de diversos problemas. Este fenómeno es conocido con el nombre de principio del retorno inverso de los rayos. He aquí en qué consiste:

Consideremos un rayo luminoso que se propaga según la dirección indicada por la flecha *A* (fig. 302). Después de un número cualquiera de reflexiones y de refracciones, este rayo tomará la dirección de la flecha *B*.

Supongamos ahora que un rayo vaya dirigido según la flecha *B*, pero en sentido contrario; podemos afirmar que este rayo seguirá en sentido inverso, en todas sus sinuosidades, el trayecto del rayo precedente, y que acabará por superponerse al rayo *A* en la dirección contraria a la indicada por la flecha.

Este principio, de una capital importancia, se aplica entre otros, a una sola reflexión o a una sola refracción.

Cuando un rayo luminoso *IS* se refleja en un punto *S*, sabemos que el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

Por consiguiente, si un rayo luminoso primero próximo a

la normal *SN* (fig. 303) gira alrededor del punto *S* en el sentido de la flecha *f*, el rayo reflejado girará también en el sentido de *f'*; coincidirá primero con el rayo incidente según *SN*, y cuando este rayo incidente rasará la superficie según *AS*, el rayo reflejado se escapará según *SB*. Inversamente, si el rayo incidente viene según *RS*, el rayo reflejado será dirigido según *SI*.

Examinemos ahora lo que pasa para la refracción.

Cuando el rayo incidente *IS* (fig. 304) encuentra la superficie refringente en *S*, en lugar de continuar su camino en línea recta, se quiebra y, si el segundo medio es más refringente que el primero, se aproxima a la normal *SN'*. Cuando el rayo incidente está muy aproximado a la normal *NS*, el rayo refractado está sensiblemente en la prolongación de la normal.

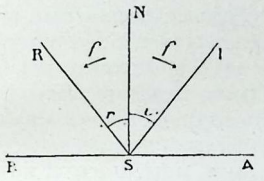


Fig. 303

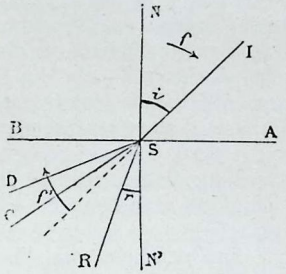


Fig. 304

A medida que el rayo incidente gira en sentido *f*, el rayo refractado girará en el sentido *f'*, pero gira más lentamente que el rayo incidente. Resulta de ello que, cuando el rayo incidente llega según la dirección *AS* el rayo refractado está dirigido según *SC* por ejemplo. De aquí resulta que todos los rayos incidentes situados entre *SN* y *SA* tienen sus rayos refractados en el ángulo *N'SC*. No hay rayo refractado en el ángulo *CSB*. El ángulo *N'SC* es lo que se llama ángulo límite.

Invirtamos ahora el sentido de la propagación de la luz. Cuando un rayo viene según *N'S*, se refracta según *SN*,

Cuando el rayo incidente gira en el sentido de la flecha *f'*, el rayo refractado gira en el sentido de la flecha *f*, más aprisa que el rayo incidente, y cuando el rayo incidente llega según CS, el rayo refractado sale rasando la superficie según *SA*. Continuando la rotación del rayo incidente, es evidente que no se puede encontrar en la parte superior rayo refractado. Los rayos tales como *DS*, situados en el ángulo *CSB*, no tienen rayo refractado; hay motivo para preguntarse qué se hace la luz en este caso.

He aquí, en realidad, lo que pasa. Así como hemos dicho antes, cuando un rayo luminoso toca un punto *S*, no se refracta por completo, se divide en una porción refractada y una porción reflejada. La experiencia demuestra que la porción reflejada se hace tanto más importante cuanto más se aleja de la normal. Cuando la luz viene según *N'S*, se refleja poco; pero, cuanto más se aproxima a *CS* la dirección de los rayos incidentes, más se refleja la luz y menos se refracta. Cuando el rayo incidente está dirigido según *CS*, no hay rayo refractado, toda la luz se encuentra en el haz reflejado, se dice que hay reflexión total. Todos los rayos situados en el ángulo *CSB* sufren la reflexión total.

Objetos e imágenes

En Optica, se trata con mucha frecuencia de la imagen de un punto o de un objeto; es, por lo tanto, de la mayor importancia comprender bien lo que es una imagen.

Cuando un punto luminoso se encuentra en el espacio, una persona colocada en las inmediaciones de este punto, tiene la noción de este punto luminoso, por un mecanismo que será estudiado más adelante. Es para ello suficiente que no haya ningún cuerpo opaco interpuesto entre el punto luminoso y el ojo de esta persona. En este caso, parte un haz luminoso cónico del punto luminoso *P* (fig. 305) y se propaga hasta el ojo. Este ojo podrá desplazarse alrededor del punto *P*, pero el sujeto tendrá siempre la misma sensación.

Puede ocurrir que el ojo reciba un haz luminoso que no emane directamente de un punto *P*, pero que tenga, no obstante, en las inmediaciones de este ojo la misma constitución

geométrica que el haz precedente. Por ejemplo, se concibe que una serie de refracciones o de reflexiones hayan dado un haz luminoso convergente en un punto *P* (fig. 306). Después de haberse reunido en *P*, estos rayos continúan su camino y dan un fascículo divergente. El sujeto cuyo ojo esté colocado en este fascículo divergente tendrá evidentemente la misma sensación que si tuviese realmente un punto luminoso en *P*. Se dice entonces que hay en *P* una imagen real.

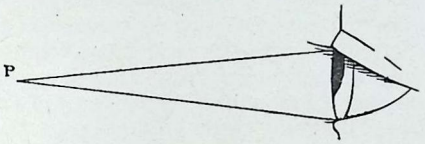


Fig. 305

Puede también ocurrir que un haz luminoso abandone una superficie reflejante o refringente divergiendo (fig. 307). Los rayos no se cortan en un punto, pero sus prolongaciones

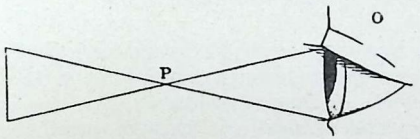


Fig. 306

por el otro lado de la superficie *AB* pueden encontrarse en un punto *P*. El ojo colocado en el haz emergente de *AB* dará todavía la noción de un punto luminoso situado delante de él, como si este punto existiese realmente en *P*. Se dice entonces que hay en *P* una imagen virtual.

Esta imagen será real siempre que los rayos luminosos se corten realmente antes de llegar al ojo. La imagen será virtual si los rayos luminosos no se cortan, pero sus prolongaciones detrás de la última superficie reflejante o refringente pasan por un mismo punto, que será la imagen.

Es fácil, cuando se ve una imagen, saber si es virtual o real, con la condición, no obstante, de ver al mismo tiempo

la última superficie atravesada por los rayos luminosos. Se trata, en efecto, de saber si la imagen está entre esta superficie y el ojo, o si se encuentra más allá de esta superficie. Lo que equivale a decir que es preciso averiguar si es la última superficie o la imagen la que está más cerca del ojo. Ahora bien; hay un procedimiento general para saber, cuando se ven dos objetos cuál está más alejado y cuál más próximo al observador. Basta para ello desplazar lateralmente la cabeza; se ve que los dos objetos se desplazan uno con respecto a otro; el que se desplaza en el mismo sentido que la cabeza es el

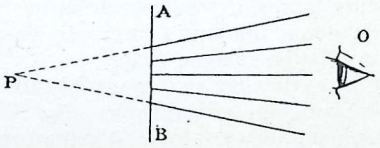


Fig. 307

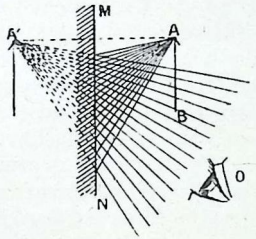


Fig. 308

más lejano. Basta, para convencerse, si se está en una habitación, con mirar simultáneamente un barrote vertical de la ventana y un objeto exterior: desplazando la cabeza lateralmente, parecerá ver que el objeto se desplaza en el mismo sentido que la cabeza, con relación al barrote de la ventana.

Hemos dicho antes que un punto luminoso puede verse en todo el espacio que le rodea, supuesto que no exista cuerpo opaco interpuesto entre el ojo y el punto luminoso. No ocurre lo mismo con las imágenes; es preciso, para que la imagen sea percibida, que el ojo esté colocado en el cono luminoso de los rayos que forman la imagen; ahora bien; este cono no ocupa más que una porción restringida del espacio, denominado campo; en cuanto el ojo sale de él, la sensación luminosa desaparece.

Se puede, no obstante, hacer visible la imagen de un punto desde todo el espacio que le rodea. Los rayos luminosos que forman esta imagen real se cortan en un punto; si se coloca una pantalla de papel blanco en esta zona, el sitio en

donde los rayos se cortan será luminoso, todos los alrededores quedarán obscuros y, a consecuencia de la difusión el punto luminoso será visible de todas las inmediaciones. No se puede, evidentemente, hacer la misma operación para una imagen virtual.

Lo que hemos dicho para un punto luminoso, tiene aplicación para un objeto luminoso cualquiera, que no es en realidad más que un compuesto de una serie de puntos yuxtapuestos.

Vamos a pasar revista sucesivamente a la formación de las imágenes, ya por reflexión, ya por refracción; primero, a través de las superficies planas, después, a través de las superficies curvas. En todo lo que sigue, no daremos ninguna demostración, remitiendo para ello a los tratados elementales de óptica; no haremos más que enunciar los resultados adquiridos.

Espejo plano. — Cuando un objeto *AB* se encuentra delante de un espejo plano, cada punto *A* del objeto forma su imagen en un punto *A'* simétrico con relación al objeto. La figura 308 indica cómo se realiza la marcha de los rayos luminosos y porqué el ojo percibe una imagen en *A'*. La imagen de *AB* es virtual. Se dice también que es derecha o del mismo sentido que el objeto, porque un ojo colocado muy lejos y mirando a la vez el objeto y su imagen los ve dirigidos de la misma manera.

Fig. 309

En el caso de espejo plano, la imagen es igual al objeto. La figura 309 representa un objeto y su imagen invertida.

Superficie refringente plana. — En este caso, los diversos rayos, tales como *IR*, refractados de un rayo *AI* que parte del punto luminoso *A*, no pasan por un mismo punto *A'* (fig. 310). Se dice que el haz refractado no es homocéntrico. No hay, pues, imagen propiamente dicha. Pero, siendo la pupila muy pequeña, todos los rayos que forman parte del haz luminoso que entra en el ojo pasan sensiblemente por un mismo punto *A'* y el ojo percibe una imagen en este punto. Solamente cuando el ojo se desplaza, la imagen se desplaza también. Cuanto más se aproxima el ojo a la superficie del

agua para mirar A oblicuamente, tanto más cerca de la superficie parece formarse la imagen A'.

Refracción a través de superficies planas paralelas. — Cuando un rayo AI cae sobre la superficie de separación de dos

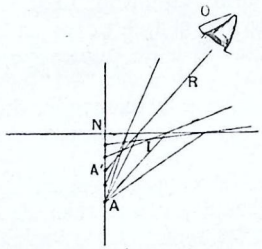


Fig. 310

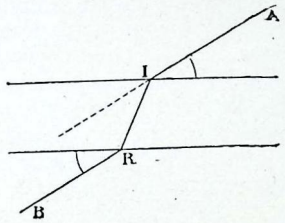


Fig. 311

medios se refracta aproximándose a la normal (fig. 311), si el segundo medio es más refringente que el primero. Este rayo refractado cae en seguida sobre la segunda superficie y es fácil ver, según el principio de retorno inverso de los rayos, que el rayo emergente RB tomará una dirección paralela a AI.

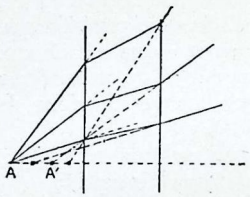


Fig. 312

Si tenemos un punto luminooso A que envía un haz divergente sobre una lámina de caras paralelas, todos los rayos después de la refracción serán paralelos a los rayos incidentes que les habrán dado origen (fig. 312). Resulta de ello que no pasan todos por un punto A'. El fascículo refractado no es homocéntrico después de la refracción.

Sin embargo, a consecuencia de las mismas causas que en el caso precedente, el ojo puede todavía percibir una imagen A' de A. Esta imagen es tanto menos clara cuanto más gruesa es la lámina transparente. Se desplaza cuando se cambia la inclinación de esta lámina sobre el trayecto de los rayos luminosos o se cambia la posición del ojo.

Estando el ojo en O y el punto luminoso en A, si la lámina transparente es perpendicular a AO, la imagen se hará en A'. Si, como indica la figura 313, se inclina la lámina, esta imagen será vista en A''.

Reflexión y refracción a través de las superficies esféricas. *Espejos.* — Los espejos esféricos están generalmente engastados en un marco circular.

Los marcos cuadrados o rectangulares no se usan más que en algunos casos especiales; desde el punto de vista óptico esta forma es irracional.

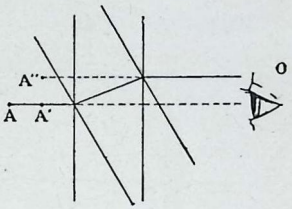


Fig. 313

El punto S del espejo, situado en medio del marco circular, es el *vértice del espejo* (figura 314).

La línea recta SC que une el vértice S con el centro de curvatura es el *eje principal.*

Dioptros. — Cuando dos medios de refringencia diferente están separados por una superficie esférica, esta superficie constituye un dioptro.

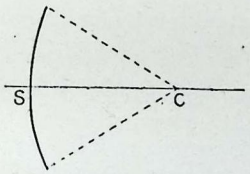


Fig. 314

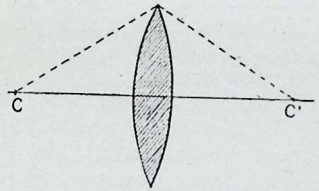


Fig. 315

Los dioptros están generalmente limitados, como los espejos, por un marco circular.

El punto S del dioptro situado en medio de un marco circular es el *vértice del dioptro.*

La línea recta SC que une el vértice S con el centro de curvatura C es el eje principal.

Lentes. — Cuando un cuerpo está sumergido en un medio

de índice de refracción diferente del suyo y está separado de él por dos superficies esféricas o por una superficie esférica y una superficie plana, este cuerpo constituye una lente.

La línea recta CC' que une el centro de las dos esferas es el *eje principal de la lente* (fig. 315). Si la lente está constituída por una esfera y un plano, el eje principal SP pasa por el centro de la esfera y es perpendicular al plano (fig. 316).

Sistemas centrados. — Si se colocan, unos a continuación de otros, una serie de dioptros y de espejos, cuyos ejes principales coinciden, según una recta XY, se tiene lo que se llama un

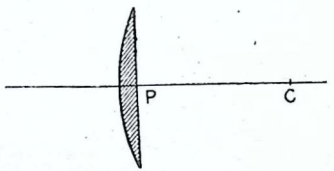


Fig. 316

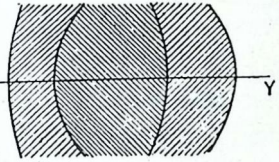


Fig. 317

sistema centrado (fig. 317). Los sistemas centrados que se encuentran en física biológica no comprenden generalmente más que dioptros, no hay espejos.

La línea recta XY, con la que coinciden todos los ejes principales de los dioptros y de los espejos, es el eje principal del sistema centrado.

En todo sistema centrado existen cierto número de puntos y de planos notables llamados *puntos y planos cardinales*, que gozan de propiedades capitales y de los que es indispensable conocer el papel. En efecto, sólo de estos puntos y planos notables depende la formación de las imágenes en los sistemas ópticos, como más adelante veremos. Para que dos sistemas ópticos sean equivalentes desde el punto de vista de formación de las imágenes, es necesario y suficiente que tengan los mismos puntos y planos cardinales.

Focos principales. — Cuando un haz de rayos paralelos entre sí cae sobre un sistema óptico centrado reflejante o refringente, después de la reflexión o de la refracción, los rayos luminosos pasan todos por un mismo punto. Si el haz incidente es paralelo al eje principal, el punto por el que pasan los rayos después de su transformación es un *foco principal*. Este foco principal está situado en el eje principal. Los rayos emergentes pueden cortarse, efectivamente, en el foco principal, que es entonces *real;* el sistema es convergente. O bien, los rayos emergentes no se cortan en el foco principal, sino que lo hacen sus prolongaciones por detrás de la superficie de emergencia; el foco principal es virtual, el sistema es divergente.

Puntos nodales y ejes secundarios. — En todo sistema reflejante o refringente, existen en el eje principal dos puntos llamados *puntos nodales*, que gozan de la propiedad siguiente: cuando un rayo incidente pasa por el primer punto nodal, el rayo emergente pasa por el segundo punto nodal y permanece paralelo al rayo incidente. Los dos puntos nodales pueden confundirse en un solo punto llamado centro óptico; el rayo emergente es entonces la prolongación del rayo incidente, forma lo que se llama un eje secundario. Se puede también considerar como formando un eje secundario la línea quebrada que pasa por los dos puntos nodales y compuesta de los rayos incidente y emergente paralelos.

Focos secundarios y planos focales. — Cuando se toma un haz de rayos paralelos entre sí y paralelos a un eje secundario determinado, después de la reflexión o de la refracción, todos estos rayos se cortan en un foco secundario situado en el eje secundario correspondiente.

Todos los focos secundarios se encuentran en un plano, llamado plano focal, perpendicular al eje principal del sistema y pasando por el foco principal. Se puede, pues, decir que el foco secundario de un haz de luz compuesto de rayos paralelos entre sí se encuentra en la intersección del plano focal y del eje secundario correspondiente.

Planos principales directos e inversos. — Los planos principales directos son dos planos que gozan de las propiedades siguientes: cuando un objeto se encuentra en el primer plano

principal directo, la imagen está en el segundo, de la misma magnitud y del mismo sentido que el objeto.

Resulta de aquí que, cuando un rayo incidente corta el primer plano principal directo a cierta distancia del eje, el rayo emergido corta el otro plano principal directo a la misma distancia del eje y del mismo lado, porque el rayo incidente puede siempre ser considerado como partiendo de cierto punto de un objeto situado en el plano principal, y el rayo

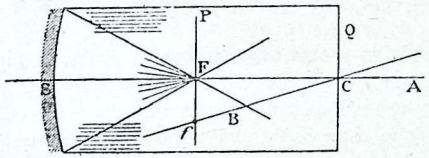


Fig. 318

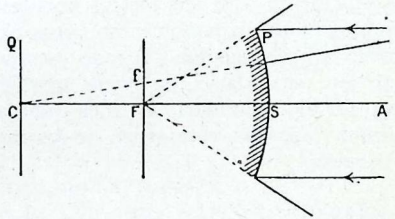


Fig. 319

emergente deberá pasar por el punto correspondiente de la imagen, es decir, situado en el otro plano principal a la misma distancia del eje.

Los planos principales inversos son dos planos que gozan de la propiedad siguiente: cuando un objeto se encuentra en el primer plano principal inverso, la imagen está en el segundo, es del mismo tamaño y de sentido inverso al objeto.

Distancia focal. — La distancia focal es la distancia de un foco principal al plano principal correspondiente.

Vamos a pasar revista sucesivamente a los diversos sistemas reflejantes y refringentes esféricos, e indicar cómo están colocados estos diversos focos, planos nodales, planos principales y planos antiprincipales. Estos puntos y estos planos llevan el nombre general de *puntos y planos cardinales.*

Espejos. — La luz viene de derecha a izquierda, las líneas de sombra indican la superficie no reflejante del espejo (fig. 318).

AS es el eje principal del espejo.

C es el centro de curvatura; *S* es el vértice.

Los dos puntos nodales están confundidos en el punto *C*.

El foco principal único está en *F*; $FS = FC$.

El foco principal es real para el espejo convergente y virtual para el espejo divergente (fig. 318 y fig. 319).

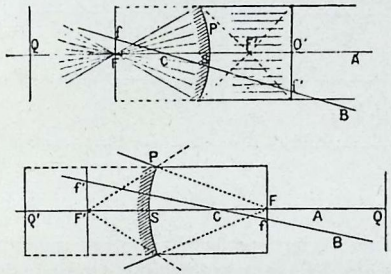


Fig. 320

CB es un eje secundario.

f es el foco secundario correspondiente al eje *CB*; está en la intersección de este eje con el plano focal perpendicular al eje principal en *F*.

Los planos principales están confundidos en uno solo y coinciden con la superficie del espejo.

Los planos antiprincipales están confundidos en uno solo y son perpendiculares al eje principal en el punto *C*.

Dioptros. — Los trazos continuos representan la luz que va de derecha a izquierda; los entrecortados la luz que va de izquierda a derecha. Las líneas de sombra indican el lado más refringente (fig. 320).

AS es el eje principal del dioptro.

C es el centro de curvatura.

Los dos puntos nodales están confundidos en el punto C.

El foco principal para la luz que viene de la derecha está en F. El foco principal para la luz que viene de la izquierda está en F'.

Se tiene: $FC = F'S$ y $FS = nF'S$, siendo n el índice de refracción del segundo medio con relación el primero.

Los focos principales son reales para el dioptro convergente y virtuales para el dioptro divergente.

CB es un eje secundario.

f es un foco secundario correspondiente al eje CB para

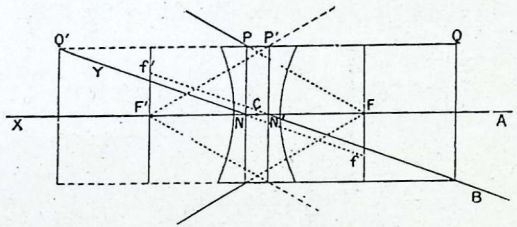


Fig. 321

la luz que viene de la derecha; f' un foco secundario correspondiente al eje CB para la luz que viene de la izquierda. Estos focos están en la intersección del eje secundario CB con los planos focales perpendiculares al eje principal en F y F'.

Los planos principales directos están confundidos en uno solo y coinciden con la superficie del dioptro.

Los planos antiprincipales están en Q y en Q' perpendiculares al eje principal. Se tiene:

$$QF = FS \text{ y } Q'F' = F'S.$$

Lentes. — Las tres especies de lentes convergentes, o las tres lentes divergentes (véase fig. 323) se conducen de la misma manera para numerosos usos; basta, pues, examinar una lente divergente y una lente convergente. Más adelante diremos en qué difieren, entre sí, desde el punto de vista óptico, las tres lentes de un mismo grupo, y cuál es la utilidad de esta diferencia de forma.

Consideremos ahora los dos tipos de las figuras 321 y 322.

Los trazos continuos representan la luz que va de derecha a izquierda, los trazos entrecortados la luz que va de izquierda a derecha. La lente es supuesta más refringente que el medio en el que está sumergida. Si la lente fuera menos refringente que el medio ambiente, la lente biconvexa se convertiría en divergente, la bicóncava en convergente, y no ha-

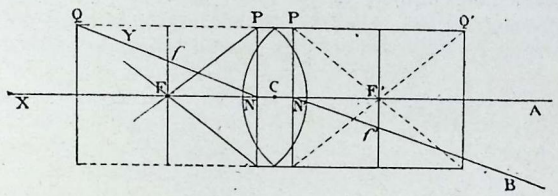


Fig. 322

bría más que transportar las construcciones de una figura a la otra.

AX es el eje principal de la lente.

Los puntos nodales son N y N'. Están igualmente distantes de las caras de la lente si estas dos caras tienen el mismo radio de curvatura; en el caso contrario, el que está del lado de la cara de menor radio de curvatura está más próximo a esta cara.

El foco principal para la luz que viene de la izquierda está en F. El foco principal para la luz que viene de la derecha, está en F'. Se tiene a $NF = N'F'$.

Los focos principales son reales para la lente convergente y virtuales para la lente divergente.

BY es un eje secundario. Hay que hacer notar que BY se quiebra al pasar a través de la lente; N y N' no se encuentran en el eje mismo sino en sus prolongaciones. Uniendo por una recta los puntos en que BY corta las dos superficies de la lente, se tiene el trayecto de este eje secundario en el espesor mismo de la lente. Se ve entonces que pasa por un punto C situado entre N y N' y que se llama centro óptico de la lente.

Cuando las lentes tienen un espesor muy pequeño, se

puede, sin error apreciable, admitir que los dos puntos nodales se confunden con el centro óptico.

El eje secundario es entonces una línea recta.

f es el foco secundario correspondiente al eje BY para la luz que viene de la derecha, f' el foco secundario correspondiente a BY para la luz que viene de la izquierda. Están en la intersección del eje secundario BY con los planos focales perpendiculares al eje principal en F y F'.

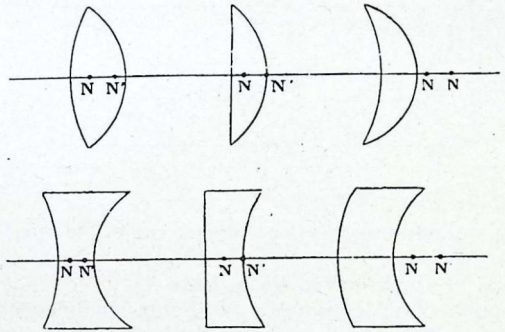


Fig. 323

Los planos principales directos están en P y P' pasando por los puntos nodales y perpendicular al eje principal.

Los planos antiprincipales están en Q y Q', y se tiene:

$$QF = FP = P'F' = F'Q.$$

Las lentes convergentes tienen los bordes más delgados que el centro, pueden ser bicóncavas, planocóncavas y cóncavo-convexas, como indica la figura 323. Las lentes divergentes tienen los bordes más gruesos que el centro, pueden ser bicóncavas, planocóncavas o cóncavoconvexas.

En las diversas formas de lente, los puntos nodales están dispuestos como lo indica la figura 323. Todos los puntos y planos cardinales se disponen como precedentemente con relación a estos puntos nodales.

Sistema centrado cualquiera. — En un sistema centrado cualquiera, es decir, compuesto de un número cualquiera de dioptros, colocados unos a continuación de otros con la sola condición de tener el mismo eje principal, el primero y el último medio pueden no ser los mismos, como ocurre, por lo demás, con los dioptros. El ojo se encuentra en este caso.

En este caso general, se tiene:

Dos puntos nodales;

Dos focos principales y los planos focales correspondientes que pasan por estos focos y perpendiculares al eje principal;

Dos planos principales directos;

Dos planos antiprincipales;

Todos estos puntos y planos cardinales tienen las mismas propiedades que en los casos que acabamos de examinar.

Según las circunstancias, están distribuídos de manera diferente en el eje principal, pero siempre satisfacen las condiciones siguientes:

El plano principal P y el plano antiprincipal Q son simétricos con relación al plano focal F.

De la misma manera, el plano principal P' y el plano antiprincipal Q' son simétricos con relación al plano focal F'.

Los planos P y P' están situados el uno a la derecha y el otro a la izquierda del foco correspondiente F o F'. Es, por consiguiente, evidentemente lo mismo para Q y Q'.

Los puntos nodales N y N' están situados al mismo lado que el plano principal con relación al foco correspondiente.

La distancia de los planos principales y de los puntos nodales al foco correspondiente es tal que

$$PF = N'F' \quad \text{y} \quad P'F' = NF$$

De donde resulta que

$$NN' = PP'$$

Se tiene también

$$PF = P'F' \times n,$$

siendo n el índice de refracción del último medio con relación al primero.

Propiedad inversa de los planos focales. — Sabemos que cuando un haz de rayos paralelos cae sobre un sistema reflejante o refringente cualquiera, después de la transformación todos los rayos pasan por un mismo punto del plano focal que es el foco correspondiente a la dirección de los rayos dados. Este foco es fácil de encontrar, porque está en el eje secundario paralelo a los rayos incidentes.

Por efecto de la propiedad del retorno inverso de los rayos, si tenemos un punto luminoso en un plano focal, este punto enviará al sistema óptico un haz cónico divergente que, después de transformado, se convertirá en un haz de rayos paralelos entre sí.

Para tener la dirección de este haz, es suficiente buscar el eje secundario correspondiente, es decir, unir el punto luminoso del plano focal al punto nodal correspondiente.

La mayor parte de los sistemas centrados de que están formados los instrumentos de óptica, están compuestos de lentes colocadas unas a continuación de otras. Estas lentes presentan aberraciones cromáticas y aberraciones de refrangibilidad. La experiencia y la teoría hacen ver que, para reducir las aberraciones del sistema centrado total a su mínimo, hay interés en emplear, a distancia focal igual, lentes de formas diversas convenientemente elegidas. Por esta razón se usan lentes planocóncavas y meniscos convergentes o divergentes.

En el estudio de los sistemas reflejantes y refringentes, se presentan dos especies de problemas:

1.º Dado un rayo incidente, construir el rayo emergente;

2.º Dado un objeto, construir su imagen.

Vamos a examinar sucesivamente estos dos problemas, y veremos que, como antes hemos dicho, nos bastará para resolverlos, en cada caso, conocer y hacer uso de los puntos y de los planos cardinales.

Construir el rayo emergente correspondiente a un rayo incidente dado. — *Espejos.* — Supongamos un espejo convergente o divergente, con su plano focal. Sea *AI* un rayo incidente.

Para tener el rayo reflejado, basta conocer un punto de este rayo reflejado y su dirección (fig. 324 y fig. 325).

a El rayo dado puede considerarse como formando parte de un haz de rayos paralelos; tracemos el eje secundario correspondiente a esta dirección: este eje secundario *Cf* encuentra el plano focal en *f*, que es el foco secundario correspondiente a la dirección dada; *f* es, pues, un punto del rayo reflejado.

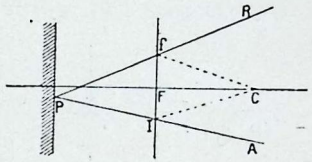


Fig. 324

b El rayo *AI* puede ser considerado como emanando del punto *I* del plano focal. Ahora bien; todos los rayos que emanan del punto *I* son, después de la reflexión, paralelos entre sí. Uno de ellos, *CI;* es el eje secundario que no cambia de dirección por la reflexión; todos los rayos que emanan de *I* son, pues, después de la reflexión, paralelos a *CI*.

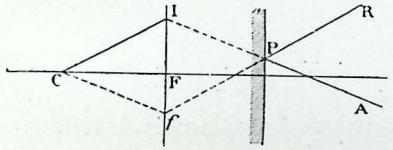


Fig. 325

Para tener el rayo reflejado correspondiente al rayo incidente dado, es necesario, pues, trazar por *f* una paralela *fR* a *CI*.

Como comprobación, el rayo incidente y el rayo reflejado deben encontrarse en el mismo punto *P* del plano principal.

Esta construcción es absolutamente general; va a repetirse para los dioptros, las lentes y los sistemas centrados cualesquiera. No tiene más que una pequeña dificultad: hay que evitar equivocarse confundiendo los dos planos focales entre sí o los dos puntos nodales entre sí. Esta confusión se produce sobre todo fácilmente con los sistemas divergentes, pero, con un poco de atención y de método, se evita este género de error.

Vamos sencillamente a indicar las construcciones en los diversos casos, sin repetir el razonamiento, que es idéntico al que acabamos de hacer para el caso de los espejos.

Dioptros. — Sea *AI* el rayo incidente; el eje secundario correspondiente paralelo a *AI* y pasando por *C* encuentra el plano focal *F* en el punto *f*, foco secundario correspondiente a la dirección *AI* (fig. 326, que representa el dioptro convergente, y fig. 327, que representa el dioptro divergente).

f es un punto del rayo refractado.

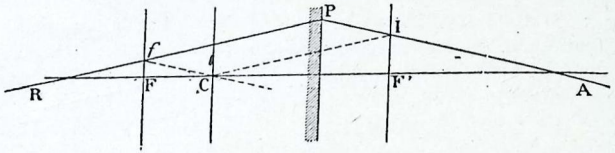


Fig. 326

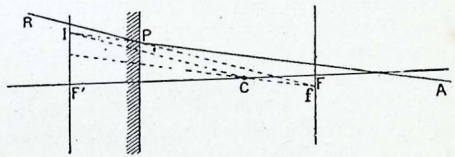


Fig. 327

Todos los rayos que parten de *I* son, después de refractados, paralelos al eje secundario *CI*.

Basta, pues, trazar por *f* una paralela *fR* y *CI* para tener el rayo refractado.

Como comprobación, *AI* y *fR* deben cortarse en el mismo punto *P* del plano principal.

Lentes (fig. 328, que representa la lente convergente, y fig. 329, que representa la lente divergente). — Sea también *AI* el rayo incidente, el eje secundario correspondiente es *BN'Nf;* encuentra el plano focal *F* en *f*, foco secundario correspondiente a la dirección *AI; f* es un punto del rayo refractado. Todos los rayos que parten de *I* son, después de refractados, paralelos al eje secundario *IN'NC*. Basta, pues, trazar por *f* una paralela *fR* a *IN'* para tener el rayo refractado. Como comprobación, los rayos incidente y refractado deben

encontrar los planos principales en dos puntos *P* y *P'* igualmente distantes del eje.

Hagamos notar que las líneas *BN'* y *NC* no son de ninguna utilidad en las construcciones; solamente las hemos trazado para completar los ejes secundarios; pero, en la práctica,

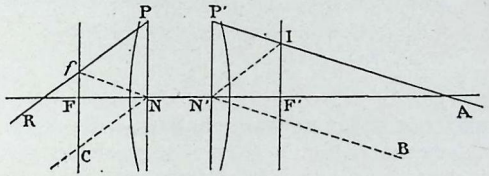


Fig. 328

basta trazar *Nf* paralela a *AI* para tener *f* y trazar *IN'* para tener la dirección del rayo refractado.

Sistema centrado cualquiera. — Supongamos que, en un sistema centrado cualquiera (fig. 330), hemos llegado a de-

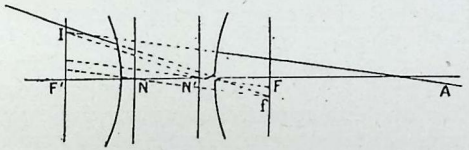


Fig. 329

terminar los planos focales *F*, *F'* y los puntos nodales *N*, *N'*; sabemos que el conocimiento de estos últimos está ligado al de los planos principales, puesto que $NF = P'F'$ y $N'F' = PF$.

Podremos, pues, sirviéndonos de los puntos nodales y de los planos focales, trazar el rayo refractado correspondiente a un rayo incidente cualquiera.

Sea *AI* el rayo incidente; trazando por *N*, *Nf* paralelo a *AI*, se tiene en el plano focal *F* un punto del rayo refractado. Este rayo refractado debe ser paralelo a *IN;* es, por lo tanto, *fR*.

Como comprobación, el rayo incidente *AI* y el rayo refrac-

tado fR deben encontrar los planos principales a la misma distancia del eje.

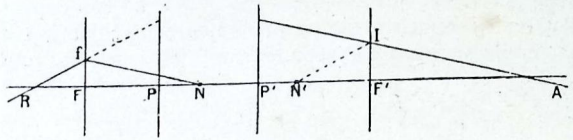


Fig. 330

Determinación de los puntos cardinales. — Es preciso ahora ver de qué manera, dado un sistema, se puede determinar sus puntos y planos cardinales. El sistema centrado se compone de una serie de dioptros colocados unos a continuación de otros. Tomemos un rayo BY paralelo al eje principal AX, este rayo se refractará a través de los dioptros sucesivos; después de cada refracción, podremos construir el rayo refractado, siguiendo las normas antes indicadas en los casos de dioptros. Finalmente, tendremos un rayo emergente CZ. El punto F en que este rayo CZ encuentra el eje principal es el foco principal del sistema. Sabemos que el rayo emergente CZ, y el rayo incidente BY deben cortar los planos principales a la misma altura; el plano principal correspondiente a F es pues, forzosamente, P.

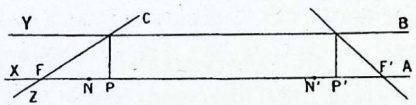


Fig. 331

Haremos la misma operación considerando la luz viniendo de izquierda a derecha. Encontraremos así un foco F' y un plano principal P'. Según hemos dicho antes para la constitución de los sistemas centrados, tendremos los puntos nodales tomando $FN = P'F'$ y $F'N' = PF$. En cuanto a los planos antiprincipales son simétricos de P y P' con relación a F y F'.

Construcción de la imagen de un objeto. — *Generalidades.* — Cuando un objeto forma una imagen en un sistema reflejante o refringente, cada punto de este objeto envía un haz luminoso divergente que, después de la reflexión o refracción,

es transformado en otro haz homocéntrico. Para tener la imagen de un punto no es necesario conocer todos los rayos reflejados o refractados; basta construir dos: la imagen se encuentra en su intersección.

Se puede, pues, para encontrar la imagen de un punto, tomar dos rayos cualesquiera salidos de este punto, buscar los rayos transformados: la imagen estará en su intersección.

Pero, en vez de tomar dos rayos cualesquiera, se simplifica mucho las construcciones eligiendo dos rayos de los que es fácil encontrar los rayos transformados. Los rayos que se encuentran en estas condiciones, son en número de tres:

1.º Un rayo paralelo al eje; el rayo transformado se obtiene inmediatamente uniendo el foco al punto en que el rayo incidente encuentra el plano principal; 2.º Un rayo que pase por el foco principal; el rayo transformado es paralelo al eje y pasa por el punto en que el rayo incidente encuentra el plano principal; 3.º Un rayo dirigido según el eje secundario sigue a este eje secundario en todo su trayecto.

Según los casos, se puede elegir dos cualquiera de estos tres rayos para construir la imagen de un punto. Cuando se sabe construir la imagen de un punto, se puede también construir la imagen de un objeto que está compuesto de una serie de puntos.

Para estudiar cómo varía la imagen de un objeto en los diversos casos, vamos, según costumbre, a tomar por objeto una flecha perpendicular al eje principal; cuando se haya encontrado la imagen de la punta, bastará, para tener la imagen de la flecha, bajar una perpendicular sobre el eje principal.

Vamos a examinar sucesivamente los diferentes sistemas reflejantes y refringentes.

Espejos (fig. 332, para el espejo convergente, y fig. 333, para el espejo divergente). —El rayo OA paralelo al eje encuentra el plano principal en A y se refleja según AF; pasando OB por el foco encuentra el plano principal en B y se refleja paralelamente al eje principal según BI; I, punto de intersección de los dos rayos reflejados, es la imagen del punto O, y la imagen de la flecha se obtiene bajando desde I sobre el eje una pequeña perpendicular.

Se tiene una imagen en I porque O envía sobre el espejo un haz cónico limitado por el marco de este espejo, y transformado por reflexión en otro fascículo cónico. El ojo colocado en este haz cónico convergente percibe una imagen.

Esta imagen es real, en el caso de la figura, para el espejo

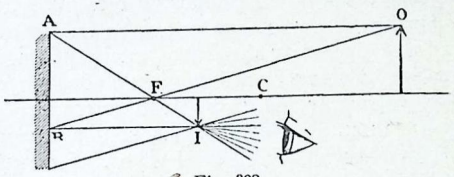


Fig. 332

convergente, y virtual para el espejo divergente; pero no hay que deducir de ello que siempre es así; esto depende de la posición del objeto.

Cuando el objeto se desplaza a lo largo del eje principal, su imagen varía de posición, de magnitud, de sentido, de realidad. El vértice O del objeto se encuentra siempre en la

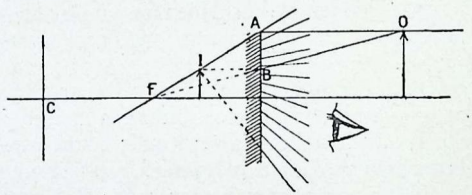


Fig. 333

paralela OA al eje principal; por consiguiente, la imagen I se encuentra siempre sobre la recta AI. Esta recta AI es lo que se llama la *característica* de la imagen de O.

No es éste lugar de hacer la discusión completa de las diversas posiciones que puede tomar la imagen cuando el objeto se desplaza, vamos a resumir los resultados en una figura y en un cuadro.

AX es el eje principal; el objeto se desplaza del infinito a la derecha hasta el infinito a la izquierda, quedando su vértice O sobre la recta OY. El vértice I de la imagen se desplaza

sobre la característica IZ pasando por el foco principal F.

El plano focal F, el plano principal P y el plano antiprincipal Q pasando por el centro del espejo, y simétrico del plano principal con relación al foco, dividen el espacio en cuatro zonas notables. Cuando el objeto está en una de estas zonas marcadas con una cifra romana colocada por encima del eje, la imagen está en la zona marcada con la misma cifra romana

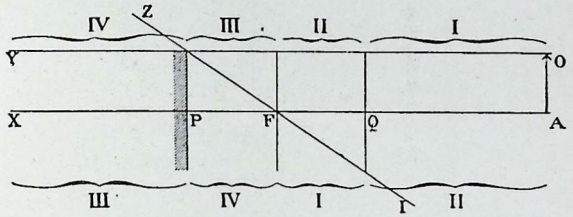


Fig. 334

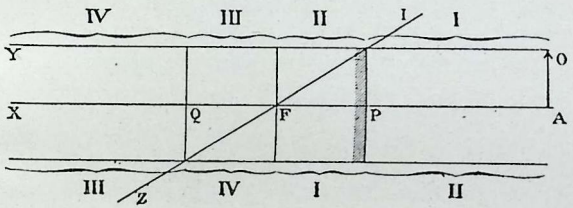


Fig. 335

por debajo del eje (fig. 334, para el espejo convergente, y fig. 335, para el espejo divergente).

Es importante hacer notar que cuando el objeto se desplaza, la imagen se desplaza en sentido contrario; esta regla es general en todos los casos de reflexión.

Hay que hacer notar ciertas posiciones particulares del objeto y de la imagen.

Cuando el objeto está en el infinito, la imagen está en el foco.

Cuando el objeto está en el plano antiprincipal, la imagen lo está también.

Cuando el objeto está en el foco, la imagen está en el infinito.

Cuando el objeto está en el plano principal, la imagen está también en él.

Estas reglas son suficientes para encontrar aproximadamente y de una manera rápida la posición de la imagen correspondiente a una posición dada del objeto.

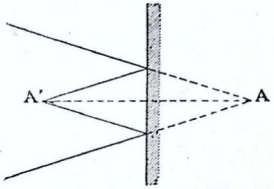


Fig. 336

Una vez encontrada esta posición, la característica da la magnitud de la imagen y su sentido. Esta imagen es real o virtual, según que esté delante o detrás de la superficie del espejo, es decir, del plano principal.

Se ve así, para el espejo convergente, que cuando la imagen está en la zona

I es invertida, real, más pequeña que el objeto;
II es invertida, real, más grande que el objeto;
III es derecha, virtual, más grande que el objeto;
IV es derecha, real, más pequeña que el objeto.

Para el espejo divergente, en

I es derecha, virtual, más pequeña que el objeto;
II es derecha, real, más grande que el objeto;
III es invertida, virtual, más grande que el objeto;
IV es invertida, virtual, más pequeña que el objeto.

Se ve, además, que la imagen en F es de dimensión nula; en P es igual al objeto y derecha, en Q igual al objeto e invertida. En el infinito tiene dimensiones infinitas.

Es fácil de comprender cuál es la naturaleza del objeto cuando este objeto se encuentra delante del espejo y que es real; pero detrás del espejo el objeto es virtual. He aquí a lo que esto corresponde.

Consideremos un haz convergente formando la imagen de un punto luminoso en A, por ejemplo, figura 336. Si colocamos un espejo en el trayecto de los rayos antes de su intersección en A, estos rayos se reflejarán y darán una imagen en A'; A' será la imagen de A, que no existe en realidad y que se llama un objeto virtual con relación al espejo.

Dioptros. — No hemos de repetir lo que hemos dicho antes para los espejos, figura 337, para los dioptros convergentes, y figura 338, para los dioptros divergentes.

El rayo paralelo al eje encuentra el plano principal en A y se refracta según AF.

El rayo OF', que pasa por el foco F' encuentra el plano principal en B y se refracta paralelamente al eje principal según BI; I, punto de intersección de los dos rayos refractados, es la imagen del punto O, y la imagen de la flecha se obtiene bajando desde I una pequeña perpendicular sobre el eje.

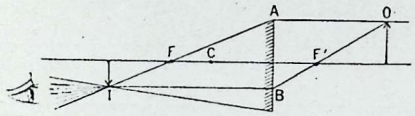


Fig. 337

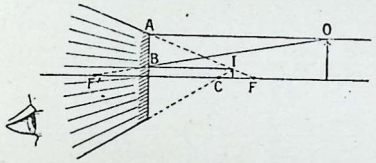


Fig. 338

Se tiene una imagen en I porque O envía sobre el dioptro un haz cónico limitado por el marco del dioptro y transformado por refracción en otro haz cónico que tiene su vértice en I. El ojo colocado en este haz cónico emergente percibe una imagen.

Esta imagen es real, en el caso de la figura, para el dioptro convergente y virtual para el dioptro divergente.

Cuando el objeto se desplaza a lo largo del eje principal, vamos a encontrar, como para los espejos, una serie de variaciones de sentido, de magnitud, de realidad. AI será también la característica sobre la que se desplazará la imagen del punto O.

Vamos a resumir, como hemos hecho para los espejos, los resultados que se obtienen estudiando las variaciones de la imagen en las diversas posiciones del objeto.

El objeto puede también encontrarse en cuatro zonas notables determinadas por el primer plano antiprincipal encontrado por la luz, el primer plano focal y el plano principal.

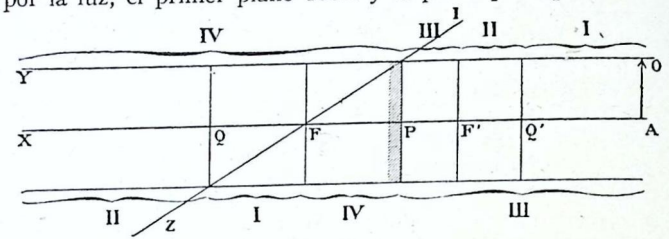


Fig. 339

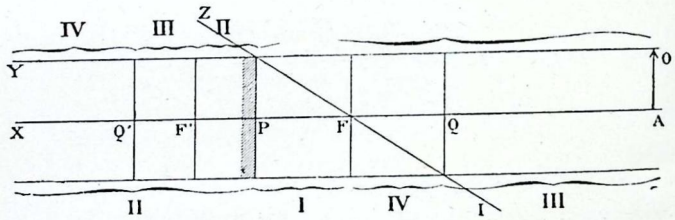


Fig. 340

La imagen se encuentra entonces sucesivamente en otras cuatro zonas determinadas por el plano principal, el otro plano focal y el otro plano antiprincipal.

Estas zonas difieren de las que hemos encontrado para los espejos, en lo que ellos difieren las unas de las otras. La figura ofrece la correspondencia de estas zonas, la cifra romana colocada encima del eje indica la zona en la que se encuentra el objeto, la cifra romana colocada debajo de la zona correspondiente a la imagen (fig. 339, para el dioptro convergente, y fig. 340, para el dioptro divergente).

Al contrario de lo que ocurre en la formación de las imágenes por reflexión, cuando se desplaza el objeto de la imagen

por refracción, se desplaza siempre en el mismo sentido que el objeto.

Es fácil de ver que cuando el objeto está en el infinito, la imagen está en el foco.

Cuando el objeto está en el primer plano antiprincipal, la imagen está en el otro.

Cuando el objeto está en el primer foco, la imagen está en el infinito.

Cuando el objeto está en el plano principal, la imagen lo está también.

Estas reglas muy sencillas, permiten encontrar rápidamente la posición aproximada de la imagen para una posición dada del objeto.

Una vez encontrada esta posición, la característica da la magnitud y el sentido de la imagen. Esta imagen es real o virtual, según que esté delante o detrás de la superficie del dioptro, es decir, del plano principal.

Se ve así que, para el dioptro convergente, cuando la imagen está en la zona

I es invertida, real, más pequeña que el objeto;
II es invertida, real, más grande que el objeto;
III es derecha, virtual, más grande que el objeto;
IV es derecha, real, más pequeña que el objeto.

Para el dioptro divergente, en

I es derecha, virtual, más pequeña que el objeto;
II es derecha, real, más grande que el objeto;
III es invertida, virtual, más grande que el objeto:
IV es invertida, virtual, más pequeña que el objeto.

Se ve, además, que la imagen en F es de dimensión nula, en P es igual al objeto y derecha, en Q es igual al objeto e invertida. En el infinito tiene dimensiones infinitas.

Para la interpretación del objeto virtual no hay más que atenerse a lo que hemos dicho para los espejos.

Lentes. — Aquí también no hay más que reproducir la construcción dada a propósito de los espejos y de los dioptros (fig. 341 para la lente convergente y fig. 342 para la lente divergente).

El rayo paralelo al eje encuentra el plano principal en A';

el rayo refractado debe pasar en el otro plano principal a la misma distancia del eje *A'*; basta, pues, prolongar el rayo paralelo hasta *A*; *AF* es el rayo refractado.

El rayo *OF'* que pasa por el foco encuentra el plano principal en *B* y, de allí, debe propagarse paralelamente al eje principal según *BI*.

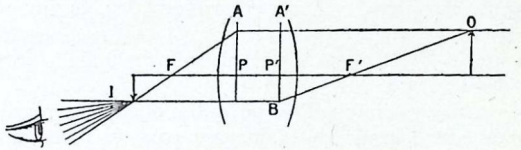


Fig 341

I, punto de intersección de dos rayos refractados, es la imagen del punto *O*, y la imagen de la flecha se obtiene bajando desde *I* una perpendicular sobre el eje.

Se tiene una imagen en *I* porque *O* envía sobre la lente un haz cónico transformado, por refracción, en otro haz cónico que tiene su vértice en *I*.

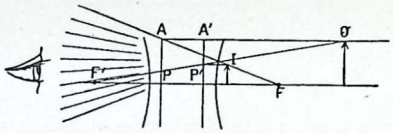


Fig 342

AI es también la característica según la que se desplaza *I*, imagen del punto *O*, cuando el objeto *O* se desplaza a lo largo del eje.

Para las lentes hay también una división en zonas; esta división está representada en las figuras 343, para la lente convergente, y figura 344 para la lente divergente; refiriéndose a lo que hemos dicho para los espejos y para los dioptros, es fácil comprender la correspondencia de las imágenes y de los objetos.

Cuando el objeto está en el infinito, la imagen está en el foco.

Cuando el objeto está en el primer plano antiprincipal, la imagen está en el otro.

Cuando el objeto está en el foco, la imagen está en el infinito.

Cuando el objeto está en el primer plano principal, la imagen está en el otro.

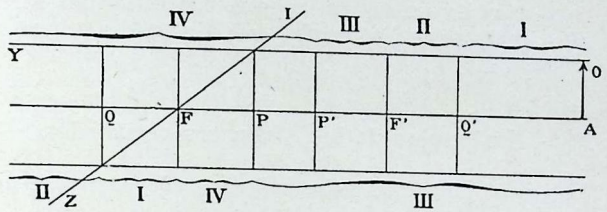


Fig. 343

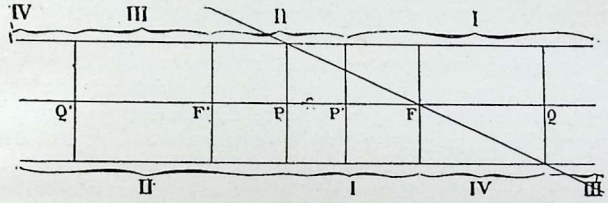


Fig. 344

Con estas reglas, muy sencillas, se puede, en todos los casos, recordando que la imagen y el objeto se desplazan en el mismo sentido, encontrar rápidamente la posición aproximada de la imagen para una posición dada del objeto.

Una vez encontrada esta posición, la característica da la magnitud y el sentido de la imagen. Esta imagen es real o virtual, según que esté delante o detrás de la última superficie refringente atravesada.

Se ve así que, para la lente convergente, cuando el objeto está en la zona

I es invertida, real, más pequeña que el objeto;

II es invertida, real, más grande que el objeto;

III es derecha, virtual, más grande que el objeto;

IV es derecha, real, más pequeña que el objeto.
Para la lente divergente, en
I es derecha, virtual, más pequeña que el objeto;
II es derecha, real, más grande que el objeto;
III es invertida, virtual, más grande que el objeto;
IV es invertida, virtual, más pequeña que el objeto.

Se ve, también, que la imagen es de dimensión nula en *F*, en *P* es igual al objeto y derecha, en *Q* es igual al objeto e invertida.

II. — Potencias de los sistemas centrados

En general, cuando se quiere indicar el valor óptico de un espejo o de una lente, se da la distancia focal.

Para las lentes empleadas en oftalmología se ha hecho de otra manera. Durante largo tiempo estas lentes fueron designadas por un número que representaba en pulgadas el radio de curvatura de las caras; no se empleaban, en efecto, más que las lentes biconvexas o bicóncavas y decir que una lente de esta clase tenía el núm. 10, por ejemplo, significaba que las dos caras tenían 10 pulgadas de radio de curvatura. Por una feliz coincidencia, este número daba así la distancia focal de la lente en pulgadas. Esto depende del valor del índice de refracción del cristal, generalmente empleado para la fabricación de estas lentes. Tomando materiales de índice diferente, se tendrían lentes que con el mismo número no poseerían propiedades ópticas idénticas.

Este sistema tenía numerosos inconvenientes. Primero, por efecto de la desigualdad de índice y de los diversos valores de la pulgada en los diferentes países, nunca se sabía cuál era el valor exacto de un cristal corrector. En segundo lugar, se tropezaba con una dificultad de orden práctico cuando se quería conocer el efecto producido por la superposición de dos cristales, operación frecuente en oculística. Tomemos, por ejemplo, un cristal convergente núm. 4 y un cristal convergente núm. 6, y superpongámoslos; ¿cuál será el cristal equivalente al sistema resultante de la superposición? No es posible saberlo sin un cálculo, que es difícil de hacer durante un

examen de refracción. Por último, no era muy lógico ver el número de los cristales disminuir cuando su efecto iba creciendo y a la inversa.

El sistema actualmente en uso remedia estos inconvenientes; está basado en lo que se llama la potencia de las lentes.

Consideremos una lente convergente, por ejemplo, que tenga 1 m. de distancia focal (fig. 345). Los rayos que caigan sobre esta lente paralelamente al eje principal, se entrecruzarán, después de refractarse, en el foco *F* situado en el eje principal, a 1 m. de la lente.

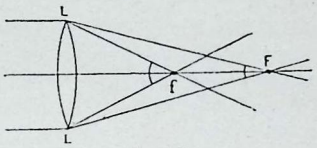


Fig. 345

Se dice, por convención, que esta lente tiene la unidad de potencia; a esta unidad se le ha dado el nombre de *Dioptria*. Si la distancia focal de la lente disminuye y se hace, por ejemplo, igual a medio metro, los rayos que caen sobre esta lente paralelamente al eje serán más convergentes que en el caso precedente, el ángulo *LfL* es doble del ángulo *LFL;* se dice que la potencia se ha doblado, es decir, que la nueva lente tiene 2 dioptrias de potencia. Si la distancia focal es de un tercio de metro, la potencia de la lente se hará de 3 dioptrias, y así sucesivamente.

Por lo tanto, para tener la potencia de una lente evaluada por medio de la dioptria, hay que medir la distancia focal de esta lente en metros y dividir la unidad por el número así encontrado.

La primera ventaja de este sistema es que desde el punto de vista óptico el valor de una lente está perfectamente definido por un número de dioptrias, cualquiera que sea el radio de curvatura de sus caras y el índice de refracción de la materia empleada para construirla. Para distinguir las lentes convergentes de las divergentes se les afecta del signo + o del signo —. Así, una lente de + 3 dioptrias, es una lente convergente que tiene una distancia focal de un tercio de metro. Una lente de — 5 dioptrias es una lente divergente que tiene una distancia focal de un quinto de metro.

La segunda ventaja es que en la superposición de cristales las potencias se sobreañaden, teniendo en cuenta sus signos. Así, coloquemos una lente de + 2 dioptrias sobre una lente de + 5 dioptrias, obtendremos un sistema equivalente a una lente única que tenga + 7 dioptrias. Coloquemos una lente de + 2 dioptrias sobre una lente de — 5 dioptrias, obtendremos un sistema equivalente a una lente única que tenga — 3 dioptrias. Esto no ocurre, hay que advertirlo, más que para dos lentes delgadas aplicadas una sobre otra, en contacto. Si se las separa, la ley de adición falta, tanto más cuanto mayor es el espacio que las separa.

Se ha generalizado la definición de la potencia aplicándola a los espejos, a los dioptros y a los sistemas centrados cualesquiera, y se considera que en todos los casos la potencia de un sistema óptico centrado se obtiene dividiendo la unidad por el valor de la distancia focal medida en metros. En estos casos, como no se puede hacer la superposición al contacto, las potencias no se suman. Así, si se superponen dos objetivos de microscopio, sus potencias no se suman.

Se encuentran todavía en el comercio muchos anteojos numerados según el sistema antiguo, y numerosas personas no conocen su cristal corrector más que por su número. Importa, pues, saber cuál es la correspondencia entre los dos sistemas: el antiguo y el nuevo.

Esta correlación no puede ser perfecta, puesto que en el antiguo sistema, como antes hemos dicho, un número no corresponde a un cristal bien definido. Prácticamente, se obtiene un resultado satisfactorio aplicando una fórmula según la cual el producto del número por el valor en dioptrias da un número constante 40. Así, para toda lente si se multiplica su número antiguo por su potencia en dioptrias, se obtiene 40, aproximadamente. Si pues se tiene el número, basta dividir 40 por este número para tener la potencia en dioptrias, o inversamente, si se tiene la potencia, dividiendo 40 por esta potencia se tiene el número. Así, un núm. 8 equivale a 5 dioptrias y un cristal de 4 dioptrias a un núm. 10.

El oftalmólogo debe tener a su disposición una colección de las diversas lentes necesarias para la corrección de las ametropías. Estas lentes están actualmente graduadas en dioptrias y ordenadas metódicamente en una caja; es lo que se denomina con el nombre de caja de óptica.

Esta colección sirve no sólo para hacer exámenes de ametropías, como más adelante indicaremos, sino también para determinar el valor de un cristal llevado por un sujeto. Esta determinación es muy importante: es preciso, cuando una persona se presenta en casa de un oftalmólogo, que éste pueda reconocer el cristal que lleva habitualmente, y esto por diversos motivos. Puede ocurrir entre otros, que este cristal, dado por otro médico, haya en cierto momento corregido perfectamente la visión del sujeto; se sabrá entonces si la ametropía ha variado desde el momento de esta corrección hasta el momento actual.

Para determinar el valor de un cristal se toma por base la ley de adición de las potencias. Se comienza por investigar si el cristal es convergente o divergente; para esto se le coloca cerca del ojo y se mira un objeto lejano. Se mueve el cristal de izquierda a derecha o de abajo arriba, y se ve cómo se desplazan las imágenes de los objetos lejanos. Si se desplazan en el mismo sentido que el movimiento dado a la lente, ésta es divergente; si se desplazan en sentido contrario, la lente es convergente.

Hecho esto, se toma de la caja de óptica un cristal de especie contraria al cristal examinado, se les superpone y se vuelve a repetir la operación. Se acaba por encontrar rápidamente, con un poco de costumbre, un cristal que anule el cristal estudiado, es decir, que superpuesto a él, dé un conjunto que se conduzca como una lámina de caras paralelas. Desplazándolo de arriba abajo delante del ojo, las imágenes de los objetos lejanos no cambian de sitio. En este momento, los dos cristales tienen la misma potencia, siendo uno positivo y el otro negativo. Basta leer la potencia del cristal tomado de la caja de óptica para tener la del cristal estudiado.

III. — **Ojo reducido**

Para llegar hasta la retina, la luz atraviesa los medios transparentes del ojo, que la refractan y dan sobre esta retina

imágenes reales de los objetos exteriores. A la formación de estas imágenes debemos la visión de los objetos.

Los medios transparentes del ojo, encontrados sucesivamente por la luz, son: la córnea, el humor acuoso, el cristalino y el humor vítreo. El humor acuoso está separado del aire por la córnea, a la que podemos atribuir una forma esférica. El índice de refracción del humor acuoso y del humor vítreo es muy sensiblemente igual a $^4/_3 = 1{,}33$; el del cristalino, un poco superior e igual a 1,42, aproximadamente.

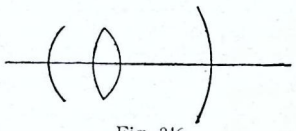


Fig. 346

La córnea se conduce como una lámina de caras paralelas delgada, no hay porqué tener en cuenta la refracción que produce y se puede admitir que todo ocurre como si el humor acuoso estuviese en contacto directo con el aire.

Cuando los rayos luminosos salidos de una fuente exterior caen sobre el ojo, se refractan sucesivamente a través de la córnea, la cara anterior y la cara posterior del cristalino antes de llegar a la retina. Es, pues, preciso, en cada caso particular en que se estudia la formación de la imagen de un objeto en la retina, seguir cada rayo luminoso en sus tres refracciones sucesivas. Esto da lugar a construcciones muy complicadas. Hay motivo para preguntarse si no se pueden simplificar las cosas y reemplazar, para el estudio, los medios refringentes del ojo por un sistema más sencillo. Con frecuencia, para la demostración, se asimila el ojo a una lente convergente que forma imágenes reales sobre una pantalla que representa la retina; semejante analogía, admisible para demostrar ciertos fenómenos groseros, dista mucho de la realidad. En general, no se puede reemplazar ninguna combinación de superficies refringentes por una lente; esto es bien evidente. Sin ello, en efecto, todos los instrumentos de óptica, anteojos y microscopios, podrían reducirse a una simple lente.

Para saber si se puede reducir el ojo a un sistema más sencillo, hay que estudiar cómo están dispuestos los focos, puntos nodales y planos principales del ojo.

La córnea tiene un radio de curvatura de 8 mm., aproximadamente. La cara anterior del cristalino tiene un radio de curvatura de 10 mm. y la cara posterior de 6 mm. Además, hay una distancia de 4 mm. entre la córnea y la cara anterior del cristalino, y la misma distancia entre las dos caras del cristalino. Dadas estas dimensiones y el valor de los índices de refracción de los medios del ojo, se han podido calcular las posiciones de los puntos y planos cardinales del ojo que están situados de la manera siguiente:

1.er foco principal	detrás de la córnea	a. .	22,2 mm.
—	delante —	a. .	12,9 mm.
1.er plano principal	detrás de la córnea	a. .	2 4 mm.
2.º —	—	a. .	1,9 mm.
1.er punto nodal	—	a. .	7,4 mm.
2.º —	—	a. .	6,9 mm.

Como se ve, los dos planos principales están muy próximos uno al otro. En la práctica, se puede considerar como confundidos en un solo punto situado en una posición media a 2,15 milímetros por detrás de la córnea. Igualmente, los dos puntos nodales pueden confundirse en un punto nodal único situado a 7,15 mm. por detrás de la córnea. Resulta que los diversos puntos y planos cardinales están dispuestos uno con relación a otro de la manera siguiente (fig. 347):

Un foco principal se encuentra a 12,9 mm. + 2,15 mm. = 15,05 mm. delante del plano principal, único resultante de la fusión de los dos planos principales. Detrás de este plano principal se encuentra un punto nodal único o centro óptico, situado a 7,15 mm. — 2,15 mm. = 5 mm. detrás de este plano principal. Por último, otro foco principal se encuentra a 22,2 mm. — 7,15 mm. = 15,05 mm. detrás del centro óptico. Esta distribución está representada en la figura 348.

Todo sistema óptico equivalente al ojo debe tener esta distribución de los focos, puntos nodales y planos principales. Se aprecia inmediatamente que el sistema óptico del ojo no puede ser asimilado a una lente, porque en toda lente los puntos nodales se encuentran en los planos principales, y en el caso de las lentes muy delgadas, en las que no se considera más que un centro óptico y un plano principal, el centro

óptico está en el plano principal. Además, en toda lente las distancias de los focos al plano principal son iguales, lo que no tiene lugar en el caso de la figura (fig. 348).

Consideremos, por el contrario, un dioptro cuyo centro esté en N y que tenga 5 mm. de radio, es decir, cuyo vértice

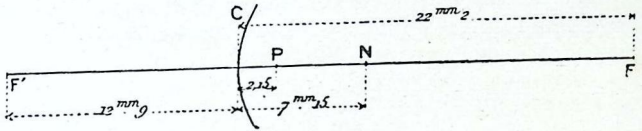


Fig. 347

esté en P. Para semejante dioptro el centro óptico único estaría en N, el plano principal en P. Además, si su índice de refracción es igual $\frac{PF}{PF_1} = \frac{4}{3}$ se demuestra que estos focos estarán en F y F_1. Semejante dioptro reune las condiciones deseadas para ser equivalente al ojo. En efecto, tiene los mismos puntos y planos cardinales, y sabemos que dos sistemas que tie-

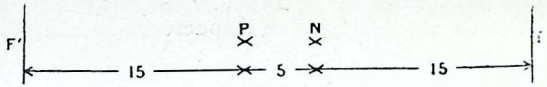


Fig. 348

nen los mismos puntos y planos cardinales pueden substituirse el uno al otro.

Por lo tanto, en todos los estudios de refracción que se quieran hacer sobre el ojo, se podrá reemplazar el sistema óptico de este ojo por un dioptro que tenga su centro en el punto N situado a 7,15 mm. detrás de la córnea, 5 mm. de radio y un índice de refracción igual a $^4/_3$. Este dioptro tendrá un foco a 15 mm. delante de su plano principal y otro a 20 mm. detrás.

Esto se refiere a lo que se llama ojo normal medio; claro está que pueden haber variaciones individuales de una a otra persona; alguna de estas variaciones son muy importantes, y serán estudiadas más adelante.

Además, todo lo que hemos dicho se refiere al ojo no acomodado; vamos a ver lo que significa el ojo no acomodado y su paso al estado de acomodación.

El dioptro por el cual se puede reemplazar el sistema óptico del ojo normal medio es lo que se llama el *ojo reducido de Listing.*

IV. — **Visión**

Emetropía

Estando supuesto que la luz viene de izquierda a derecha en el caso de la figura, la retina se encuentra en las inmediaciones del plano focal que pasa por F.

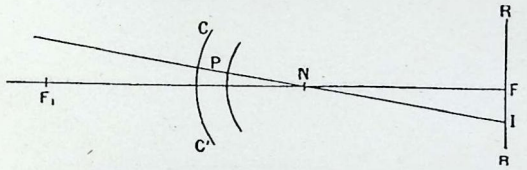


Fig. 349

Supongamos, en primer lugar, que haya coincidencia entre esta retina y el plano focal, encontrándose la córnea en CC' y estando en P el dioptro por el que se pueden reemplazar todos los medios refringentes del ojo con su centro en N. Un punto luminoso situado en el infinito a la izquierda mandará al ojo un haz de rayos paralelos entre sí: estos rayos, después de refracción, se cortarán, como se sabe, en un punto del plano focal F, es decir, que el punto luminoso del infinito dará una imagen clara en la retina. Para tener la posición de esta imagen, es suficiente unir el punto del infinito con N y prolongar la línea hasta I. Sabemos, en efecto, que NI es un rayo que no está desviado por la refracción, es el eje secundario del punto cuya imagen se busca.

Veremos más adelante que la potencia del ojo puede variar con lo que se llama *estado de acomodación.* Cuando el ojo está

en su mínimo de potencia, se dice que está *desacomodado* o *no acomodado.*

El ojo *no acomodado,* para el que la retina coincide con el plano focal F es llamado emétrope. Para este ojo, no acomodado, la imagen de un punto o, de muchos puntos, es decir, de un objeto situado en el infinito, está en la retina. Por lo tanto,

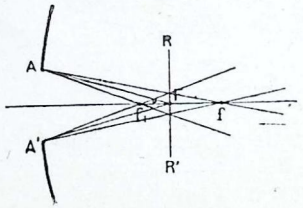


Fig. 350

Fig. 351

para tener la imagen de un punto en el infinito, basta trazar el eje secundario correspondiente y tomar su intersección con la retina.

Acomodación

El estudio del ojo nos muestra que la visión de un objeto es clara cuando este objeto forma su imagen real en la retina, a través de los medios refringentes de este ojo. Si la imagen cae delante o detrás de la retina, un punto luminoso exterior no da sobre la retina una imagen puntiforme, sino que se forma un pequeño círculo iluminado llamado círculo de difusión, tanto más grande cuanto más adelante o más atrás de la retina esté la imagen. Esto se concibe con la simple inspección de la figura 350.

Supongamos la retina representada por RR'; después de la refracción, un haz que venga de un punto exterior da un haz AFA' convergente en un punto F de la retina. La imagen sobre la retina será un punto. Supongamos ahora que el haz converge en f, se ve que la mancha luminosa formada por AfA' sobre la retina RR' será tanto mayor cuanto más alejado hacia la derecha esté f. Para un haz que se corta en f_1, delante de la retina, la mancha será tanto más grande cuanto más separado hacia la izquierda esté f_1.

Si ahora se observa un objeto compuesto de una serie de puntos para que la imagen en la retina sea la reproducción de este objeto, y que se tenga una clara impresión del mismo, es preciso que cada punto dé una imagen puntiforme. Si, por el contrario, cada punto da una mancha, estas manchas se confunden más o menos unas con otras, no se verán los detalles del objeto (fig. 351).

Dicho esto, consideremos un objeto, un punto luminoso en el infinito, delante de un ojo emétrope, no acomodado; sabemos que la imagen clara de este punto se forma en la retina. Supongamos ahora que el punto se aproxima al ojo, desplazándose de izquierda a derecha, en el caso de nuestras figuras, sabemos que la imagen de este punto debe también desplazarse de izquierda a derecha; por consiguiente, va a pasar detrás de la retina y la visión dejará de ser clara.

Para que la imagen continúe encontrándose en la retina, es necesario una de dos cosas: o que la retina se desplace con relación al sistema óptico, es decir, que el ojo se alargue, o que la potencia refringente del ojo aumente.

La experiencia demuestra que el ojo emétrope, que puede ver claramente los objetos en el infinito, continúa teniendo la visión clara cuando estos objetos se aproximan a él; por esto hace entrar en juego su *acomodación.* Existe un límite para este fenómeno, es decir, que hay una distancia más acá de la cual no se pueden aproximar los objetos, continuando viéndolos claramente. Esta distancia es llamada *distancia mínima de la visión distinta;* el punto en el que se encuentra el objeto cuando esta distancia se alcanza, es el *punctum proximum;* se ha llegado al límite de la acomodación.

Examinemos un poco más de cerca el mecanismo de esta acomodación. Primero, vamos a demostrar que cuando se mira un objeto en el infinito, la imagen de los objetos próximos se forma detrás de la retina, y que cuando se acomoda sobre objetos próximos, la imagen de los objetos lejanos se forma delante de la retina. Esto se pone en evidencia merced a la experiencia del P. Scheiner. He aquí en qué consiste:

Clavemos en una regla dos alfileres A y B, y coloquemos

en el extremo de esta regla una tarjeta perforada en una horizontal por dos agujeros de alfiler distantes entre sí 2 ó 3 milímetros (fig. 352). Miremos a través de estos dos agujeros los dos alfileres; apreciaremos que fijándonos en *A*, *B* resultará doble, fijándonos en *B* será *A* la que nos parecerá doble. Si

Fig. 352

ahora, fijándonos en *A*, y pareciendo doble *B*, tapamos, mediante una pantalla, uno de los agujeros, la imagen de *B*, del lado opuesto al agujero tapado, desaparece. Si, por el contrario, nos fijamos en *B*, pareciéndonos doble *A*, y tapamos un aguje-

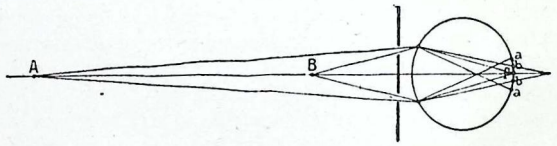


Fig. 353

ro, es la imagen del mismo lado la que desaparece. He aquí la explicación de este fenómeno.

Cuando se fija uno en *A*, los rayos salidos de *A* se entrecortan en la retina en *f* dando una imagen clara (fig. 353). Los rayos que parten de *B* se cortan detrás de la retina, pero los dos agujeros de la pequeña pantalla no dejan pasar más que dos pequeños penachos luminosos, que dan en la retina dos pequeñísimas manchas *b*, *b*, esto da lugar a una visión doble de *B*. Si se tapa uno de los agujeros de la pantalla, la imagen *b* del mismo lado desaparece; pero como, por efecto de la inversión de las imágenes en la retina, exteriorizamos siempre una impresión de sentido contrario a lo que ocurre en esta retina, nos parece que es la imagen del lado opuesto la que desaparece.

El mismo razonamiento explica lo que ocurre cuando se fija *B* y *A* parece doble.

Las cosas ocurren como hemos dicho; pero la acomodación puede explicarse ya por un desplazamiento de la retina en el momento de la acomodación, ya por un aumento de refringencia del ojo.

La experiencia de Purkinje va a mostrarnos que es esta segunda explicación la que hay que adoptar.

Si nos colocamos en la obscuridad, y observamos las imágenes de una bujía que se forman por reflexión sobre las superficies del ojo de un sujeto vuelto del lado de esta bujía, se perciben generalmente tres imágenes.

Una de ellas es muy fácil de ver, es brillante y de dimensiones suficientes para que no pueda escapar al observador. Se forma por reflexión sobre la superficie anterior de la córnea, que obra como espejo convexo. Es derecha, su punta está dirigida hacia arriba. La segunda imagen es mayor que la primera, pero es mucho más pálida; es necesario tener cierto hábito para verla, es también derecha y procede de la reflexión sobre la cara anterior del cristalino. Por último, la tercera imagen es muy brillante, pero muy pequeña, es invertida y procede del espejo cóncavo formado por la cara posterior del cristalino (fig. 354).

Si la persona a quien se observa dirige su mirada a lo lejos, las tres imágenes se presentan aproximadamente con el aspecto 1, 2, 3. Si esta persona acomoda su visión, las imágenes 1 y 3 no sufren modificación alguna apreciable; 2 se hace más brillante y más pequeña. Desde el momento en que 2 se hace más pequeña, prueba que la curvatura del espejo que la produce, es decir, la cara anterior del cristalino, aumenta.

Helmholtz, que ha estudiado este fenómeno muy a fondo, ha demostrado que en el máximo de acomodación el radio de curvatura de la cara anterior del cristalino puede pasar de 10 mm. a 6 mm, aproximadamente. Al mismo tiempo, esta cara se dirige ligeramente hacia adelante, aumentando el espesor del cristalino. El radio de la cara posterior disminuye de una manera apenas apreciable, pasa de 6 mm. a 5,5 mm.

¿Cuál es, por último, el mecanismo de esta variación de curvatura del cristalino?

Durante mucho tiempo se había adoptado la siguiente explicación, propuesta por Helmholtz. El cristalino está suspendido en el ojo y mantenido en su sitio por la zona de Zinn que se inserta en todo el contorno del cristalino. En el estado de reposo, esta zona de Zinn estaría tensa, de manera que ejercería sobre todo el contorno del cristalino una tracción centrífuga. De ello resultaría un aplastamiento anteroposterior de este cristalino.

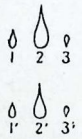


Fig. 354

Fig. 355

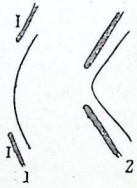


Fig. 356

Fig. 357

Con motivo de la acomodación, habría relajación de la zona de Zinn, y a consecuencia de su elasticidad natural, el cristalino se curvaría mal.

Helmholtz no propuso esta explicación más que como una hipótesis, pero sus sucesores han sido más afirmativos que él, y poco a poco lo han dado como un hecho demostrado.

En estos últimos años, Tscherning ha vuelto a estudiar el asunto por la experiencia y ha establecido una teoría mucho más verosímil de la acomodación. Ha hecho notar, desde luego, que cuando se realiza la visión próxima, la curvatura del cristalino no aumenta más que en su parte media; las partes periféricas se aplastan, por el contrario, de tal modo, que la cara anterior del cristalino pasa de una forma análoga a 1 a una forma 2, el efecto está exagerado en la figura 356.

Al mismo tiempo, el iris, muy dilatado en la visión lejana y formando una pupila amplia, la estrecha para eliminar los rayos marginales, que enturbiarían la limpieza de la imagen proporcionada por los rayos centrales.

Ocurriendo así las cosas, Tscherning ha hecho notar que el cristalino se compone de un núcleo central duro rodeado de una corteza más blanda (fig. 357). Si, en el momento de la acomodación, la zona de Zinn ejerce una tracción centrífuga sobre todo el contorno del cristalino, las regiones marginales se aplastan, en tanto que la parte central se moldea sobre el núcleo duro. Como este núcleo tiene una curvatura mayor que la cara anterior del cristalino, se concibe cómo aumenta de curvatura esta cara anterior. A medida que se avanza en edad, el volumen del núcleo central aumenta, la acomodación no se hace tan bien; cuando ha invadido todo el cristalino, se hace nula.

Amplitud de acomodación

Consideremos de nuevo el ojo emétrope mirando al infinito, después acomodándose cada vez más a medida que el objeto mirado se aproxima. Se puede reemplazar esta acomodación por la adición de una lente convergente convenientemente elegida en cada caso y colocada delante del ojo que permanece en reposo. En efecto, si el ojo quiere mirar el punto *A*, puede, o acomodarse sobre *A*, o colocar delante del ojo no acomodado una lente convergente cuyo foco esté en *A* (figura 358). Sabemos, en efecto, que todos los rayos que parten de *A* y caen sobre la lente *L*, son paralelos entre sí después de pasar a través de esta lente; se conducen como si viniesen de un punto situado en el infinito, y formarán, por consiguiente, una imagen clara en la retina. La lente *L* puede, pues, reemplazar la acomodación para ver en *A* y se puede también expresar el valor de la acomodación por la potencia de la lente que produce el mismo efecto.

Resulta que para ver a 1 m., un emétrope acomodará a una dioptria; para ver a ½ m., a dos dioptrias, y así sucesivamente. Hemos dicho que había para toda persona un límite de acomodación; la potencia de esta acomodación límite es lo que se denomina *amplitud de acomodación*. Así, un emétrope que tiene 10 dioptrias de amplitud de acomodación puede ver desde el infinito hasta $^1/_{10}$ de m. de su ojo.

Todo esto no es verdad más que para el emétrope: no hay

que perderlo de vista; más adelante diremos lo que ocurre cuando no se cumple esta condición.

Con la edad, la amplitud de acomodación va disminuyendo; cuando se hace insuficiente para las necesidades de las ocupaciones a que cada uno se dedica, se dice que se ha hecho présbita. Hay que advertir que, a consecuencia de lo que hemos dicho, la presbicia no es un estado bien definido; un relojero o un grabador, cuyo trabajo exige la visión de pequeños detalles y, por consiguiente, la visión muy próxima, se considerará como présbita, mientras que un trabajador de otro oficio estará muy satisfecho todavía de su vista. En general, una de las necesidades de visión próxima más comunes a todos los individuos es la lectura de los caracteres ordinarios de imprenta y, necesitando esta lectura, para ser fácil, una visión de 30 ó 35 cm. aproximadamente, se considera que la presbicia comienza cuando el emétrope no tiene a su disposición aproximadamente más que 3 dioptrias de amplitud de acomodación. En las proximidades de los cincuenta años, el emétrope comienza a experimentar una verdadera dificultad por efecto de su presbicia, es preciso entonces suplir la acomodación natural por una acomodación artificial, es decir, llevar anteojos con cristales convergentes. A medida que se avanza en edad, la potencia de estos cristales deberá ser forzada cada vez más; hacia los setenta años, la acomodación natural es casi nula. La experiencia prueba que se tiene una visión próxima suficiente llevando, al principio, entre cuarenta y cinco y cincuenta años, lentes de 1 dioptria y aumentando en ½ dioptria su potencia por cada cinco años de aumento de edad.

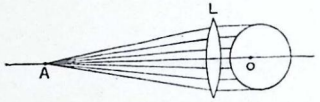


Fig. 358

Es fácil de demostrar también que el socorro aportado a la acomodación por cristales convergentes depende de la posición de estos cristales con relación al ojo; se tiene interés en alejarlos del ojo. He aquí porqué se ve a los présbitas que han elegido lentes correctoras apropiadas, y que notan que poco a poco se hacen insuficientes, que cada vez acercan más los cristales a la punta de la nariz.

V. — Ametropías

Miopía

Hemos visto que en el ojo emétrope, la retina se encuentra en coincidencia con el plano focal del ojo no acomodado. Puede ocurrir que la retina se encuentre detrás del plano focal, las imágenes de los objetos colocados en el infinito se forman entonces delante de la retina; no se forma imagen clara en esta retina y la visión es imperfecta. Se dice en este caso que el ojo es miope. Su diámetro anteroposterior es demasiado grande para la potencia de su sistema óptico, o lo que, desde el punto de vista de la formación de las imágenes, es lo mismo, la potencia de su sistema óptico es demasiado grande para la longitud de su diámetro anteroposterior.

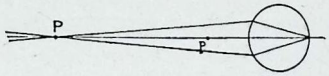


Fig. 359

El ojo miope no puede, pues, ver claramente en el infinito cuando no se acomoda; es evidente que la acomodación no puede corregir esta imperfección, puesto que su efecto sería aumentar aún la potencia del ojo, es decir, acentuar su defecto. Desplacemos el punto luminoso del infinito aproximándolo al ojo, sabemos que la imagen se desplazará en el mismo sentido, se aproximará a la retina, que acabará por alcanzar, cuando el punto luminoso esté en *P* (fig. 359). *P* es, pues, el punto en que deben encontrarse los objetos para que el ojo miope los vea sin acomodación; es también el punto más lejano en que el ojo puede ver distintamente, por esto lleva el nombre de *punctum remotum*. Si el objeto mirado se aproxima cada vez más al ojo, la acomodación deberá entrar en juego, y se podrá, como para el ojo emétrope, ver claramente hasta cierto punto *p, punctum proximum,* al que corresponderá el máximo de acomodación.

La experiencia demuestra que el *punctum proximum* del ojo miope está generalmente más aproximado que el del ojo

emétrope. Esto se concibe fácilmente. Un ojo miope puede ser asimilado a un ojo emétrope provisto de una lente convergente, puesto que el ojo miope es más potente que el ojo emétrope. Si estos dos ojos tienen la misma amplitud de acomodación, es decir, pueden hacer crecer en la misma cantidad su potencia, es evidente que en el punto máximo de acomodación el ojo miope ganará en potencia al ojo emétrope. Ahora bien; Donders ha demostrado precisamente que a una misma edad todos los ojos tienen la misma amplitud de acomodación. Veremos más adelante cómo se determina esta amplitud de acomodación en el miope.

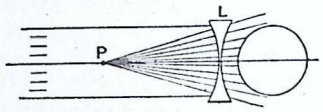


Fig. 360

El grado de miopía de un ojo varía según la distancia de su *punctum remotum;* este grado de miopía puede caracterizarse por una cifra.

Consideremos un ojo miope cuyo *punctum remotum* sea *P* (fig. 360) y coloquemos delante de este ojo una lente divergente cuyo foco esté también en *P;* por este hecho el ojo quedará corregido, vuelto a la emetropía; dicho de otra manera, verá claramente los objetos colocados en el infinito sin acomodación.

En efecto, un punto luminoso en el infinito mandará al ojo rayos paralelos entre sí. Después del paso a través de la lente, estos rayos divergirán como si partiesen de *P* a consecuencia de la propiedad conocida de los focos. Por lo tanto, llegarán al ojo no acomodado como si partieran de *P* y formarán una imagen clara en la retina.

La lente *L* es, pues, la lente que vuelve este ojo a la emetropía, es su lente correctora.

La lente correctora de un ojo miope mide su miopía por definición. Es decir, que una miopía de 1, 2, 3... dioptrias es una miopía corregida por una lente divergente de 1, 2, 3... dioptrias.

¿Para evaluar la amplitud de acomodación de un ojo miope, cómo hay que operar?

Llevemos primero el ojo a la emetropía mediante su cristal corrector, y después razonemos sobre él como hemos razonado precedentemente sobre el ojo emétrope. La amplitud de acomodación del ojo miope es, pues, medida por el cristal convergente, que le permita ver, sin acomodación, en el *punctum proximum* que tiene *después de corregido.*

Hipermetropía

La retina puede, por último, encontrarse delante del plano focal, el ojo es demasiado corto o no es bastante potente, las imágenes de los objetos que están en el infinito se forman detrás de la retina cuando no acomoda.

El ojo hipermétrope así definido puede, no obstante, ver en el infinito; bástale para ello hacer entrar en juego su acomodación, para aumentar la potencia de su sistema óptico. Se distingue, pues, del ojo emétrope en que, para ver en el infinito, está obligado a recurrir a su acomodación, mientras que el ojo emétrope queda en reposo. Claro está que, cuando el objeto mirado se aproxime cada vez más, el ojo hipermétrope forzará más y más su acomodación hasta cierto límite, del que no podrá pasar, encontrándose entonces en el *punctum proximum.* Este *punctum proximum* estará generalmente más alejado del ojo que el del emétrope, porque, a partir del infinito, quedó al hipermétrope menos acomodación disponible que al emétrope.

Para corregir al hipermétrope, es decir, para permitirle ver en el infinito sin acomodación, hay que reemplazar esta acomodación por un cristal convergente. La potencia de este cristal convergente medirá el grado de hipermetropía.

Una vez provisto de su cristal corrector, el hipermétrope se conducirá absolutamente como un emétrope, y su amplitud de acomodación se definirá de la misma manera.

Procedimiento para distinguir el miope y el hipermétrope del emétrope y corregirlos. — Si se quieren distinguir los tres géneros de vista que acabamos de estudiar, admitiendo que no haya otra anomalía de la visión, he aquí cómo hay que operar.

Se pide al sujeto que mire un objeto muy lejano. Si no lo ve con claridad, es ciertamente miope. Se colocarán entonces delante del ojo cristales divergentes, de potencia creciente, hasta que la persona examinada vea claramente en el infinito; el cristal más débil que dé este resultado será el cristal corrector, él medirá la miopía.

Si el sujeto ve con claridad en el infinito, puede ser emétrope o hipermétrope. Coloquemos delante del ojo examinado un cristal convergente. Si se enturbia la vista se trata de un emétrope, porque el más débil aumento de potencia, por efecto de la adición de un cristal convergente, le ha hecho pasar a la miopía.

Si, por el contrario, el sujeto continúa viendo con claridad con el cristal convergente, esto prueba que se le ha corregido parte de su hipermetropía. Continúa viendo en el infinito relajando una parte de su acomodación natural, reemplazada por la acomodación artificial de la lente convergente. Se tomarán cristales cada vez más potentes, y el cristal más potente que le permita ver claramente en el infinito le hará emétrope; este será el cristal corrector. Si, a partir de este momento, se continuase forzando el cristal, se pasaría a la miopía, la vista se enturbiaría.

Advertencia. — La hipermetropía y la presbicia se corrigen por medio de los mismos cristales, los cristales convergentes, pero no hay que confundir estos dos estados, y oponerlos, como se hace con frecuencia, a la miopía. En efecto, la hipermetropía está ligada a una débil refringencia del ojo en reposo, se refiere a la visión lejana, es lo opuesto de la miopía; se encuentra en todas las épocas de la vida y, sobre todo, en la juventud. La presbicia está ligada a una disminución del poder de acomodación del ojo; se presenta con la edad y se refiere a la visión próxima. Tanto no se la debe oponer a la miopía, cuanto que se puede ser a la vez miope y présbita. Supongamos, en efecto, un miope de una dioptria; según lo que antes hemos dicho, su *punctum remotum* estará a 1 metro del ojo. A los setenta años, este ojo habrá perdido toda su acomodación, o poco menos, no podrá, pues, ver más cerca que 1 metro. En este momento, y aún antes, será manifiestamente

présbite. Le será necesario llevar un cristal divergente para la visión lejana y un cristal convergente para la visión próxima.

Procedimiento para determinar la posición del punctum proximum y la amplitud de acomodación. — Para determinar la distancia del *punctum proximum* al ojo, basta buscar la distancia más corta a la que el sujeto puede ver con claridad un objeto, por ejemplo, caracteres de escritura. Hemos visto que en el emétrope es fácil de deducir la amplitud de la acomodación de la posición de su *punctum proximum*.

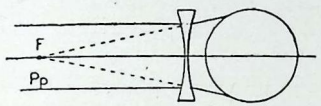


Fig. 361

Se puede medir directamente esta amplitud de la acomodación mediante el artificio siguiente. Consideremos un ojo emétrope y su *punctum proximum Pp* (fig. 361). Coloquemos delante de este ojo una lente divergente cuyo foco estará en *F*. Si el ojo mira al infinito a través de esta lente, los rayos procedentes de un punto lejano, paralelos entre sí, formarán después de su paso a través de la lente un haz divergente que parece venir de *F* que coincide con *Pp*. Para formar una imagen clara con estos rayos, el ojo deberá acomodar su máximum, como lo hace cuando sin lente mira en *Pp*. Verá, pues, claramente en el infinito con su máximum de acomodación. Si *F* estuviera más alejado que *Pp*, es decir, si se tomase una lente menos potente, el ojo podría todavía ver en el infinito, con menos acomodación que su máximum. Si, por el contrario, la lente fuera más poderosa, estando el punto *F* más próximo del ojo que *Pp*, la acomodación no bastaría para ver en el infinito. Por lo tanto, para medir la amplitud de acomodación de un ojo emétrope es preciso buscar la lente divergente más poderosa que le permita ver en el infinito. La distancia focal de esta lente es igual a la distancia del *punctum proximum* al ojo, y su potencia mide la amplitud de acomodación.

Supongamos ahora que se trate de un miope. Busquemos el cristal divergente más poderoso, que le permite ver claramente en el infinito; este cristal no medirá su amplitud de acomodación; es preciso, mentalmente, dividirlo en dos cris-

tales: uno, corrector de la miopía; el otro, que mide la amplitud de la acomodación. Así, un miope de 3 dioptrias ve todavía en el infinito a través de un cristal — 8, este cristal — 8 deberá ser considerado como compuesto de dos cristales — 3 y — 5; — 3 que conduce el ojo a la emetropía y — 5 como medidor de la acomodación. Se hubiera podido, en efecto, dar primero al miope el cristal — 3, y después de haberlo corregido operar con él como sobre un emétrope, que habría visto entonces en el infinito con su máximum de acomodación con un cristal suplementario — 5.

Un hipermétrope, corregido por un cristal + 2, por ejemplo, y que ve todavía en el infinito a través de un cristal — 8, tendría 10 dioptrias de amplitud de acomodación, porque si se hubiese comenzado por llevarlo a la emetropía con el cristal + 2, habría podido ver en el infinito con este cristal suplementario — 10, siendo equivalente el conjunto + 2 — 10 a — 8.

Astigmatismo

En todo lo precedente se ha admitido que las superficies a cuyo través se refractaba la luz, eran porciones de esfera o planos. Así, las lentes, la córnea, las superficies anterior y posterior del cristalino han sido supuestas esféricas. Pero puede no ocurrir siempre así.

Consideremos ahora una lente convergente, por ejemplo, del género de las que hemos estudiado hasta ahora, es decir, limitadas por superficies esféricas, y sea XY (fig. 362) el eje principal de esta lente. Si cortamos la lente por un plano vertical que pase por XY, tendremos la figura 362. Viniendo los rayos luminosos de izquierda a derecha paralelamente al eje principal, después de refractados, se cortan en un punto F, foco principal de la lente, situado en el eje XY, a una distancia f de la lente.

En lugar de cortar la lente por un plano vertical que pase por XY, supongamos ahora que la cortamos por un plano horizontal, pasando siempre por XY. Tendremos absolutamente la misma figura que para la sección vertical, nada habrá cambiado. Todos los rayos paralelos a XY que se encuentran en este plano horizontal y que vienen de izquierda a derecha, se cortarán, después de la refracción, en el punto F, situado en XY, a la distancia f de la lente.

Lo mismo ocurrirá con cualquier sección oblicua, se podrá hacer girar el plano de sección alrededor del eje, siempre se encontrará la misma figura; por esto se dice de ella que es de revolución.

Consideremos ahora una lente cilíndrica; he aquí cómo puede concebirse semejante lente.

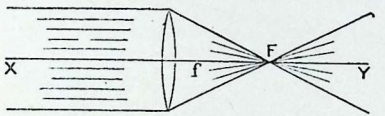


Fig. 362

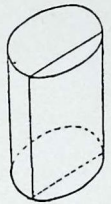


Fig. 363

Se toma un cilindro terminado por dos bases circulares perpendiculares al eje y se corta una porción por un plano paralelo a este eje (fig. 363). Se tiene una lente cilíndrica planoconvexa convergente.

Veamos ahora cómo va a conducirse, con relación a semejante lente, un haz de rayos paralelos entre sí y perpendiculares a la cara plana (fig. 364). Para simplificar la figura representaré la lente vista en perspectiva por sus bordes solamente, es decir, por un rectángulo (en perspectiva esto da un paralelógramo $ABA'B'$).

Tomemos el plano superior que limita la lente, como si se mirara la lente de arriba abajo.

Todos los rayos luminosos que se encuentran en este plano superior son paralelos al eje de la figura, van a refractarse pasando todos por cierto foco F, situado en XF, a una distancia f de la lente.

Hagamos otro corte un poco más bajo, siempre por un plano horizontal; vamos a encontrar igualmente idéntica figura que en el caso precedente y esto se reproducirá para todos

los planos de sección horizontales comprendidos entre los planos que limitan la lente superior e inferiormente. Habrá para cada sección un foco a una distancia f de la lente. Todos estos focos estarán en una recta FF', llamada recta focal, paralela a las generatrices de la lente y distante f de la lente.

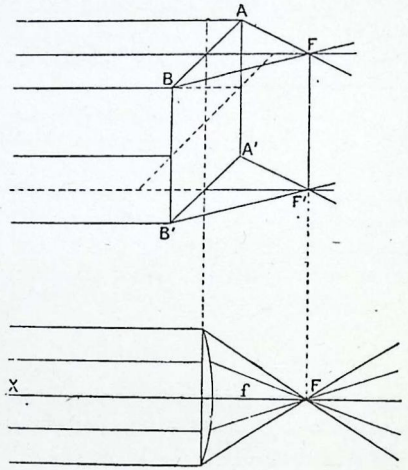


Fig. 364

Es fácil, refiriéndose a la figura, representarse la forma del haz refractado. Se deduce que, a través de semejante lente, la imagen de un punto luminoso situado en el infinito no es un punto, sino una recta FF'. Para un punto luminoso próximo ocurrirá lo mismo. Su imagen será una recta. La imagen no recordará en nada la forma del objeto. Además, en el infinito, a la derecha, el fascículo formará una banda luminosa horizontal.

¿Qué sucederá ahora si se refracta un haz, emanado de un punto, a través de dos lentes superpuestas, una esférica y otra cilíndrica? Supongamos, por ejemplo, que se superpone a la lente cilíndrica que acabamos de estudiar una lente esférica. ¿Tendremos como imagen una recta o un punto?

Supongamos que la luz viene de izquierda a derecha y cae sobre un sistema $ABCD$, compuesto de una lente esférica convergente y de una lente cilíndrica convergente de generatrices verticales (fig. 365).

La experiencia y la teoría demuestran que recibiendo el haz refractado sobre una pantalla, como habitualmente se hace para ver en dónde se forman las imágenes reales, se encuentra primero una recta luminosa vertical FF, es la primera recta focal. Si continuamos alejando de la lente la pantalla, se encuentra una segunda recta focal $F'F'$, horizontal. Por lo tanto, en este caso, la imagen de un punto será una recta vertical, o una recta horizontal, según la posición de la pantalla con relación a la lente, pero jamás un punto. El mismo efecto es producido por una lente única si no tiene la misma potencia en todos los meridianos. Supongamos, por ejemplo, que se practique una sección de una lente por un plano vertical que pase por el eje. Se encontrará, como antes hemos indicado, un foco a una distancia f, correspondiente a cierta potencia del meridiano vertical de la lente. Haciendo ahora girar el plano de sección alrededor del eje, como antes hemos hecho, si la figura no cambia, la lente es de revolución y conocemos sus efectos. Si, por el contrario, la curvatura de los meridianos cambia a medida que gira el plano, los rayos contenidos en este plano no se cortan, después de refractados, en un mismo punto a la distancia constante f de la lente: la lente es denominada astigmática.

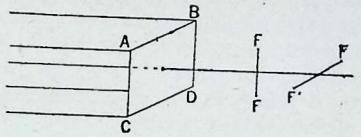


Fig. 365

En el caso en que dos secciones *perpendiculares entre sí* correspondan *una al mínimum de curvatura*, y *la otra al máximum*, con paso gradual de una a otra por los meridianos intermedios, se dice que la lente tiene el astigmatismo regular. La imagen de un punto se compone entonces de dos rectas perpendiculares entre sí; la más próxima, es paralela al meridiano de la curvatura menor; la más lejana, paralela al meridiano de la curvatura mayor.

Lo mismo ocurre con un dioptro de curvaturas desiguales, *con un máximum y un mínimum de curvatura en los dos meridianos perpendiculares entre sí.*

Semejante lente, o un dioptro de curvaturas desiguales, se conducen, pues, como el sistema resultante de la superposición de una lente esférica y de una lente cilíndrica. Los mismos resultados se obtienen también con un dioptro ordinario esférico, ante el que se coloca una lente cilíndrica.

Por consiguiente, si se toma un sistema óptico centrado que dé imágenes claras de los objetos, es decir, a través del que la imagen de un punto es un punto, y se coloca delante de este sistema una lente cilíndrica, se le convierte en un sistema astigmático regular.

A la inversa: si se tiene un sistema astigmático regular, para quitarle su astigmatismo y transformarlo en un sistema que dé imágenes claras de los objetos, en el que la imagen de un punto sea un punto, es necesario, por un procedimiento cualquiera, anular el efecto de la lente cilíndrica que entra en su constitución.

¿Cómo se puede anular el efecto de una lente cilíndrica? Tomemos una lámina de cristal de caras paralelas y tallemos de ella un volumen que, visto de cara, sea un rectángulo (fig. 366). Como indica la figura, en perspectiva se podrá separar de este volumen una lente cilíndrica convexa; es la parte sombreada de la figura. Quedará una lente cilíndrica cóncava que tendrá la misma dirección de generatrices. El conjunto de estas dos lentes superpuestas da una lámina de caras paralelas, que no desvía los rayos luminosos. Podremos designar estas dos lentes cilíndricas por el nombre de lentes complementarias. Tienen la misma potencia, pero la una es divergente y la otra convergente.

Dicho esto, consideremos un sistema astigmático regular, que podremos siempre considerar como constituído por un sistema no astigmático, más una lente cilíndrica. Para anular el efecto de esta lente cilíndrica, bastará superponerle la lente complementaria, siendo paralelas las generatrices de manera que las dos lentes cilíndricas formen una lámina de caras paralelas.

Hemos supuesto, en las explicaciones precedentes, que el

astigmatismo de un sistema provenía de la presencia en el mismo de una lente cilíndrica convergente; para destruir este astigmatismo, es preciso compensar esta lente con la lente complementaria divergente.

Se obtienen también evidentemente los efectos de astigmatismo introduciendo en un sistema centrado una lente cilíndri-

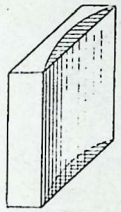


Fig. 366

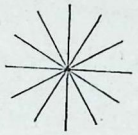


Fig. 367

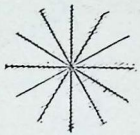


Fig. 368

ca divergente; será preciso entonces, para hacer desaparecer el astigmatismo, compensarla por una lente cilíndrica convergente complementaria.

El ojo humano está con frecuencia afectado de astigmatismo; vamos a ver cómo se reconoce prácticamente este astigmatismo y cómo se encuentra la lente correctora.

El ojo astigmático, mirando un punto luminoso, no puede formar en su retina una imagen puntiforme; la imagen del punto luminoso se compone de dos pequeñas rectas; cuando una de estas rectas se encuentre en la retina, se tendrá la misma impresión que si el objeto mirado fuese una recta. Supongamos que este mismo ojo mire una estrella formada de líneas que se cortan en un punto (fig. 367); cada punto de la figura dará como imagen sobre la retina una pequeña recta, y todas estas pequeñas rectas serán paralelas entre sí. Supongamos que sean horizontales, ¿cuál será la deformación de la imagen retiniana? Para darnos cuenta tracemos, para cada punto de la figura, una pequeña recta horizontal cuyo medio esté en este punto. La imagen retiniana tendrá un aspecto análogo al representado en la figura 368.

No hay necesidad de decir que estando el objeto (fig. 367) compuesto de rectas continuas, las pequeñas rectas de la figu-

ra 368 estarán más en contacto de otras, es decir, que habrá, en realidad, un ensanchamiento de los brazos de la estrella, y no pequeñas rectas separadas unas de otras, como representa la figura.

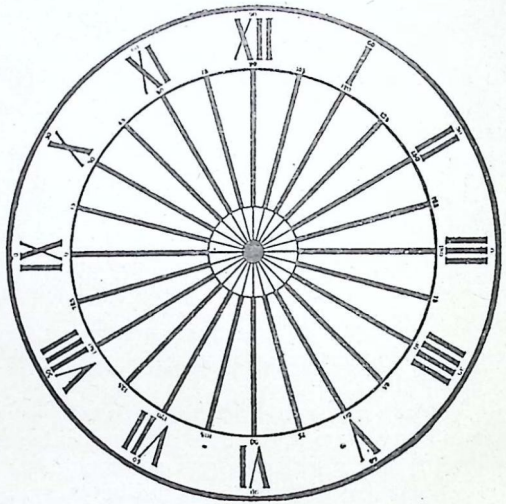


Fig. 369

La rama horizontal de la estrella será la única que permanecerá clara y que dará una buena imagen; todas las demás ramas son tanto menos claras cuanto más se alejen de la horizontal. Por lo tanto, si colocando una persona frente a una estrella de la forma llamada de cuadrante horario, es decir, componiéndose de diámetros lineales (fig. 369) de una circunferencia dispuestos en una especie de esfera de reloj, con el fin de poder fácilmente designarlos por la hora a que corresponden, acusa esta persona una visión mejor para un cierto diámetro que para los otros, es astigmático.

Para corregir el astigmatismo de un ojo, es preciso hacerle llevar una lente cilíndrica. La experiencia y la teoría nos demuestran que para tener una buena corrección, esta

lente cilíndrica debe estar colocada delante del ojo de manera que sus generatrices o, lo que es lo mismo, que su eje esté orientado perpendicularmente a la línea de mejor visión.

La experiencia que acabamos de describir nos hace, pues, saber no solamente que el ojo examinado es astigmático, sino de qué manera se deberá orientar el eje de la lente correctora.

La dirección de este eje está indicada en las lentes del comercio.

Una vez encontrada la orientación del cristal corrector, es preciso saber, además, si este cristal corrector ha de ser convergente o divergente y cuál es su valor; esto se encuentra por tanteos. Se comienza por tomar un cristal cilíndrico divergente débil, se le coloca delante del ojo en la buena orientación, preguntando al sujeto si su vista ha mejorado por esta operación. Si os responde afirmativamente, se toman cristales cada vez más fuertes, recomenzando el mismo ensayo hasta que todas las líneas del cuadrante horario sean vistas igualmente bien; en este momento, el astigmatismo estará corregido.

Si cuando se ensayan los cristales cilíndricos divergentes más débiles, el sujeto dice que su astigmatismo aumenta, se ensayan los cristales convergentes, colocando siempre el eje perpendicularmente a la dirección mejor vista y ensayando cristales cada vez más fuertes, hasta corrección.

Claro está que aparte del astigmatismo, puede estar afectado un ojo de miopía o de hipermetropía, que habrá que corregir aparte, después de supresión del astigmatismo.

Ahora es ocasión de que nos preguntemos de dónde procede el astigmatismo del ojo. La experiencia nos demuestra que depende de una irregularidad de curvatura de la córnea. Esta córnea es, en general, de revolución alrededor del eje visual del ojo, es decir, que su radio de curvatura es el mismo para un meridiano vertical, horizontal u oblicuo. Pero ocurre que esta igualdad no subsiste y que los diferentes meridianos tienen los radios de curvatura diferentes, teniendo uno de ellos un valor máximo, y el meridiano perpendicular un valor mínimo. En estas condiciones, el ojo será astigmático

regular. Puesto que el cristalino no está afectado en sí de ningún astigmatismo, todo el defecto del ojo provendrá de la córnea.

Partiendo de esto, se puede determinar el astigmatismo estudiando las imágenes que se forman por reflexión sobre la córnea.

Cuando se mira una imagen que se forma por reflexión sobre un espejo esférico convexo, esta imagen es semejante al objeto; por ejemplo, si el objeto es una circunferencia en papel blanco, la imagen será una circunferencia. Esta imagen variará de magnitud según las diversas condiciones de la experiencia, curvatura del espejo, distancia del objeto, etc.

En particular, si la distancia del objeto al espejo es siempre la misma, la imagen será tanto más grande cuanto mayor sea el radio de curvatura del espejo.

Si se repite la experiencia con un espejo de curvas desiguales, se aprecia que la imagen está deformada, un círculo se convierte en una elipse, siendo el eje mayor de la elipse paralelo al radio mayor de curvatura del espejo, y el eje pequeño paralelo al meridiano de menor radio de curvatura.

En esto tenemos un medio de reconocer si una córnea es de revolución o si forma parte de un ojo astigmático.

Para ello, el observador se coloca frente al sujeto examinado; cogiendo con la mano una rodaja de papel blanco iluminada, ya por la luz del día, ya por una luz artificial, se mantiene la rodaja a la altura del ojo del sujeto, mirando la imagen que se forma por reflexión. Si esta imagen es un círculo, el ojo examinado está desprovisto de astigmatismo. Si, por el contrario, la imagen es una elipse, el eje mayor y el eje menor de esta elipse dan las direcciones de los radios mayor y menor de curvatura de la córnea.

Entre los dos ejes de la elipse existirá una diferencia tanto mayor cuanto más acentuado sea el astigmatismo, y se concibe que, mediante aparatos de medición apropiados, se puedan examinar las imágenes que se producen por reflexión sobre la córnea, y deducir el cristal corrector.

El principal de estos aparatos, el mejor como precisión y el más práctico es el oftalmómetro de Javal.

Se compone esencialmente de un anteojo (fig. 370) mediante el que se observan las imágenes que se forman por reflexión en la córnea del sujeto, mirando el observador por el ocular *O*. Las dos miras *M* y *M'* iluminadas por la luz natural, o por una luz artificial, forman sus imágenes en la córnea. Según lo que antes hemos dicho, si la córnea es de revolución, la recta que une las dos miras *MM'* debe tener

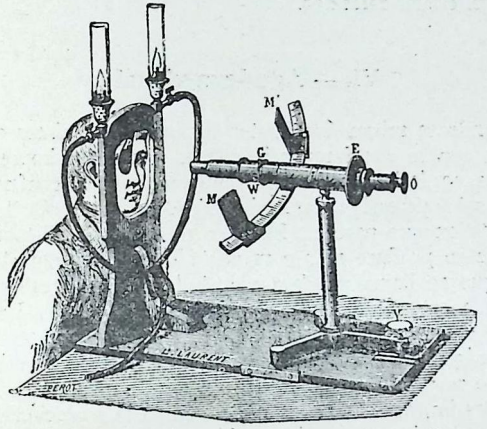


Fig. 370

una imagen de tamaño constante, cuando se hace girar el brazo que lleva *MM'* alrededor del eje del anteojo, es decir, cuando la recta *MM'* pasa de la horizontal a la vertical. En efecto, hemos visto que, en este caso, la imagen de un círculo es un círculo, es decir, que un diámetro *MM'*, del círculo, tendrá una imagen de longitud constante cuando pase por las diversas inclinaciones.

Si, por el contrario, la córnea es astigmática, habrá una posición para la cual la imagen de una recta *MM'* pasa por un máximum de longitud, mientras que para una posición perpendicular pasa por un mínimum. Esto equivale a decir que, mirando a través del anteojo las imágenes de dos miras *MM'*, y haciendo girar el brazo que las lleva alrededor del

eje del anteojo, si el ojo no es astigmático, la distancia de las dos imágenes queda invariable. Si, por el contrario, es astigmático, la distancia de las dos imágenes varía, pasa por un máximum para un meridiano y por un mínimum para el meridiano perpendicular al primero.

Un dispositivo especial permite medir la magnitud de estas variaciones y da inmediatamente, por una simple lectura, el valor del cristal corrector.

VI. — Agudeza visual

Cuando se miran dos puntos luminosos, próximos el uno al otro, ocurre con frecuencia que se tienen dos impresiones distintas, es decir, que los dos puntos no parecen confundidos en uno solo; pero si van aproximándose cada vez más, llega un momento en que parecen fundirse en uno solo. Esta fusión aparente se produce más o menos fácilmente según el valor de lo que se llama agudeza visual del ojo observador. Las causas de este fenómeno son fáciles de concebir. La capa sensible de la retina se compone de elementos yuxtapuestos, si las imágenes de dos puntos están suficientemente próximas para que se produzcan sobre un mismo elemento, hay fusión de las dos impresiones. Para que se tenga la sensación de dos puntos separados es preciso, evidentemente, no sólo que las imágenes de los dos puntos recaigan sobre dos elementos diferentes, sino, además, que estos elementos no estén contiguos, es decir, que entre ellos haya por lo menos un elemento no impresionado. De ello resulta que, para un alejamiento dado del ojo, los dos puntos *AB* deben tener una separación mínima por bajo de la que hay fusión de las imágenes. Naturalmente, esta fusión de las imágenes no depende más que de la distancia de las imágenes retinianas *a, b,* obtenidas uniendo *A* y *B* con el centro óptico del ojo, o, lo que es lo mismo, cualquiera que sea el alejamiento del ojo de *AB,* el fenómeno no depende más que del valor del ángulo α. Cuando la fusión de imágenes *A* y *B* se produce por un valor del ángulo α igual a 1' se dice, por convención, que el ojo tiene la unidad de agudeza visual. Si la fusión se produce ya para

un ángulo α = 2' la agudeza visual es ½, y así sucesivamente.

¿Qué haremos para medir prácticamente la agudeza visual? En rigor, se podrían tomar dos puntos luminosos y hacer variar su distancia hasta que el observador viera producirse su fusión. De la distancia de estos puntos y del alejamiento del observador se podría deducir el ángulo α.

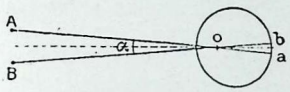


Fig. 371

Pero la experiencia demuestra que es éste un mal método para las necesidades de la práctica médica. Es preciso ser ya buen observador para sorprender el momento de la fusión de las dos imágenes y operando sobre cualquier persona se tienen, de un momento a otro, los datos más contradictorios.

He aquí ahora el método empleado en la práctica corriente. Consideremos un cuadrado (fig. 372) dividido en 25 cuadrados, más pequeños, iguales entre sí. Podemos, como indica la figura, ennegrecer cierto número de cuadrados de modo que se forme la letra *E*.

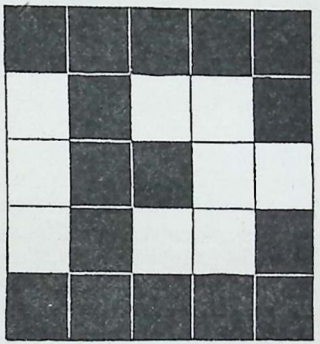


Fig. 372

Para una dimensión conveniente del cuadrado, y una distancia determinada del sujeto al cuadro sobre el que está dibujada la letra, la altura de esta letra aparece bajo un ángulo de 5'. El intervalo que separa dos cuadrados negros que comprenden un cuadrado blanco aparece sensiblemente bajo un ángulo de 1', y el sujeto se encuentra en las condiciones en que debe poder distinguir unas de otras las líneas negras, si tiene una agudeza visual igual a 1. Podrá, pues, leer la letra, pero no la leerá si disminuye de dimensiones o si se aleja más del cuadro.

Se colocarán, pues, unas junto a otras, una serie de letras

análogas y se pedirá al sujeto que las lea; si puede hacerlo, su agudeza visual es, por lo menos, igual a 1. Si no las puede leer, se procurará hacer que lea caracteres más gruesos. Forzando cada vez más la dimensión de las letras, se llegará a una magnitud de letras que podrá leer a 5 m. Si las letras correspondientes son, por ejemplo, tres veces más altas que las que corresponden a la agudeza visual 1, se dirá que su agudeza visual es $\frac{1}{3}$.

Las letras de las diferentes dimensiones útiles en la práctica, están dispuestas en un cuadro llamado escala optométrica. Al lado de cada dimensión de letras se encuentra la indicación de la agudeza visual correspondiente, para la lectura a 5 m.

El modelo de cuadro más generalizado es el de Snellen, en el que las dimensiones sucesivas de las letras son tales que las agudezas visuales correspondientes están medidas por 1, $\frac{2}{3}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{10}$. A él se refieren generalmente las indicaciones dadas en las observaciones o los reglamentos.

Monnoyer ha propuesto otra escala en la que las agudezas visuales varían según una ley decimal: 1; 0,9; 0,8, etc., pero no está tan generalizada como la de Snellen.

Cuando el sujeto sometido a examen lee a 5 m. el carácter más fino de la escala, tiene una agudeza visual igual o mayor que la unidad. Se le dice entonces que se aleje de la escala y que se coloque en el límite en que puede todavía leer los caracteres en cuestión. Es evidente que cuanto más puede separarse de la escala mejor es su agudeza visual. Si puede, por ejemplo, ir hasta 10 m., lo que es extremadamente raro, tiene una agudeza visual doble que la del sujeto que lee a 5 m., es decir, que tiene 2. Si puede ir hasta 6 m., tiene $^6/_5$; en general, se divide por 5 la distancia mayor a la que todavía lee. En rigor, podría utilizarse una sola línea de caracteres para determinar todas las agudezas visuales. A un sujeto que no leyere a 5 m., se le haría acercar al cuadro; si hubiese de llegar a 2,5, su agudeza visual sería $\frac{1}{2}$, si hubiese de ir a 1 m., sería de $\frac{1}{5}$, es decir que, como para las agudezas superiores a la unidad, se dividirá la distancia límite a que puede realizarse la lectura por 5, para tener el valor de la agudeza visual.

Este procedimiento tiene un gran inconveniente: para las distancias muy próximas interviene la acomodación, y la magnitud de las imágenes retinianas varía por este motivo. Es necesario, para practicar las mediciones, eliminar la acomodación, es decir, mantenerse siempre a una distancia bastante grande del cuadro de las letras, y esto es lo que necesita la serie de caracteres de dimensiones crecientes a partir de los leídos a 5 m. con la agudeza visual igual a la unidad.

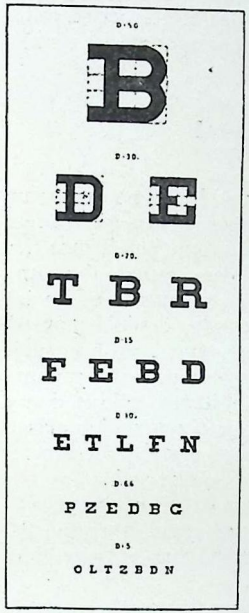


Fig. 373

Se ha tomado como base la distancia de 5 m., y elegido una dimensión de caracteres conveniente para dar a esta distancia la agudeza unidad, pero se hubiera podido tomar, de la misma manera, cualquier distancia: 4, 6, 8 m., etc., eligiendo otra dimensión de caracteres para dar la unidad de agudeza a cada una de estas distancias. Esta elección se ha hecho atendiendo a consideraciones de orden práctico; no se puede exigir un gran alejamiento del cuadro de letras, porque las dimensiones de las habitaciones no se prestarían a ello; además, la distancia de 5 m., es suficiente, porque, en estas condiciones, la visión se realiza sin acomodación apreciable.

Hay que hacer, además, una advertencia importante: Teniendo por fin la medida de la agudeza visual, informar sobre el estado de la retina, es preciso que en esta determinación los resultados no sean falseados por una anomalía de refracción.

Un sujeto podría tener una agudeza excelente por parte de su retina, pero siendo simplemente miope, no leería los ca-

racteres finos del cuadro y seríamos inducidos en error. De la misma manera, estando enterados de su miopía, no se sabría qué parte atribuir a la miopía y qué parte corresponde a la sensibilidad de la retina en el defecto de agudeza visual.

Es, pues, necesario siempre, en las mediciones de agudeza visual, comenzar por corregir las anomalías de refracción antes de proceder a esta medición.

VII. — **Campo visual**

Cuando, con un solo ojo, miramos un objeto, no vemos un punto único. Si el ojo no se desplaza, sino que permanece inmóvil, existe una pequeña región en que percibimos los detalles con una precisión particular; pero vemos al mismo tiempo, con más o menos limpieza, todo lo que se ve en las inmediaciones de esta región. Por ejemplo, desdoblemos un diario; es fácil darse cuenta, alejándose un metro, poco más o menos, que únicamente pueden leerse un pequeño número de caracteres sin desplazar el ojo. No obstante, todo el diario y aun los objetos de las inmediaciones, son percibidos más o menos vagamente, tanto peor cuanto más separados están lateralmente del punto de fijación. Se dice que todos los objetos así percibidos están en el campo visual. El campo visual, para una posición determinada del ojo, es, pues, la región del espacio en la que debe encontrarse un punto para ser percibido, estando el ojo inmóvil.

El estudio del campo visual es importante en extremo, porque nos informa sobre el estado de la retina. Hay, en efecto, un campo visual normal, sensiblemente el mismo para todos los individuos. Si en un sujeto se aprecia que en este campo normal existen lagunas, regiones en que la visión no existe, es preciso deducir que hay en la retina puntos correspondientes que están alterados. Ocurre, por ejemplo, para fijar las ideas, que, mirando delante de sí, toda la región superior del espacio parece obscura, se puede deducir que existe una lesión extensa en toda la parte inferior de la retina, generalmente un desprendimiento.

¿Cómo se determina el campo visual? Existen dos procedimientos: el del campímetro y el del perímetro.

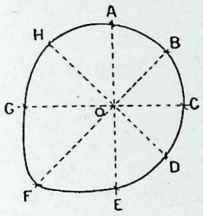


Fig. 374

El campímetro es un sencillo cuadro vertical marcado en un punto *o* con una señal (fig. 374), una cruz, por ejemplo. Se coloca el sujeto frente a este cuadro, estando el ojo que se examina en la perpendicular al cuadro en *o* y se le dice que fije la mirada en este punto *o*. Después, se pasea por el cuadro un objeto, por ejemplo, un trozo de carbón si el cuadro es negro, se le aproxima cada vez más a *o*, de arriba abajo hasta que el sujeto dice que lo ve, se marca así un punto *A*, límite superior del campo. Se repite la misma operación para cierto número de direcciones, en general ocho, después se unen todos los puntos *ABCD*, etc.; la línea obtenida limita el campo visual en el cuadro. Es evidente que esta línea *ABCD*, etc., depende de la distancia a que el ojo se encuentra del cuadro, es necesario pues, adoptar de una vez para siempre una posición bien determinada en la que el sujeto deberá poner el ojo. Esta posición está bastante próxima del cuadro, so pena de tener un campo inmenso que no se podría representar más que en un plano de enorme extensión; de ello resulta que el menor error en la posición del ojo acarrea diferencias considerables en la medición del campo; por otra parte, este instrumento es de un manejo delicado cuando se busca cierta precisión. Además, presenta otro inconveniente: el campo normal es muy extenso en ciertas direcciones; así hacia fuera, a la derecha para el ojo derecho, a la izquierda para el izquierdo alcanza 90° de la línea

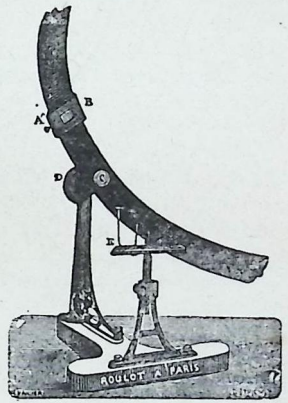


Fig. 375

de mira, y el punto correspondiente, C o G no pueden representarse en el campímetro. Este instrumento no es verdaderamente aplicable más que en los casos en que el campo visual está estrechado.

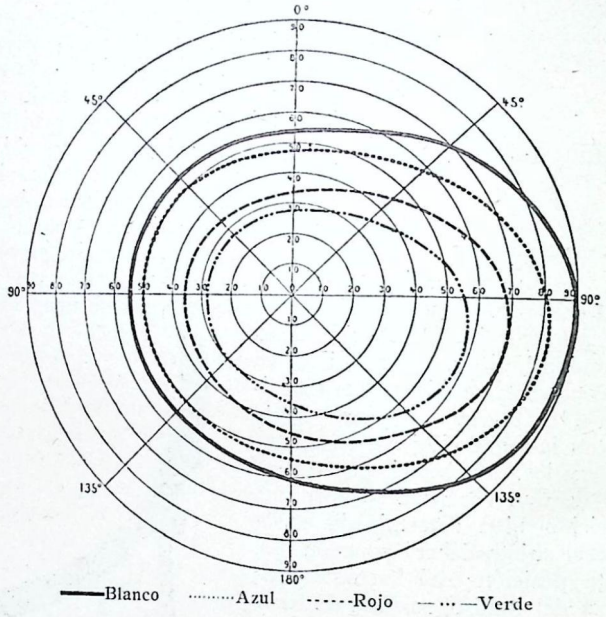


Fig. 376

El perímetro está más generalizado y es más práctico que el campímetro. Se compone esencialmente de una banda semicircular montada sobre un pie por su parte media (fig. 375), de modo que se puede girar alrededor de un diámetro correspondiente a este punto medio C, como indica la figura. El sujeto apoya su mentón sobre un soporte E de manera que su ojo esté en el centro de la banda semicircular, y fija su mirada en C. Se coloca el arco en un plano horizontal y se lleva poco a poco la corredera AB del borde del arco hacia el centro C. La corredera, pintada de negro como todo el arco, lleva un trozo de papel blanco o coloreado que se destaque bien sobre el fondo obscuro. En el momento en que el sujeto dice que percibe el pequeño papel se lee la división correspondiente del arco. Se transporta el valor leído, que representa cierto número de grados, sobre un diagrama en donde diversos círculos concéntricos limitan la separación de los distintos ángulos con la línea de mira que cae sobre el punto o. Se tiene así un punto A, y repitiendo la misma operación para diversas direcciones haciendo girar el círculo del perímetro alrededor de su eje, se marcan tantos puntos como se desean y uniéndolos por medio de una línea continua se tiene una representación del campo visual. Por este método se determina directamente el ángulo límite del campo en las diversas direcciones.

El campo visual así obtenido difiere según el color del trozo de papel empleado para la exploración; la figura 376 da este campo visual normal para los colores que se utilizan en la práctica. En ciertos casos patológicos, el orden de los campos visuales para los diversos colores podrá estar alterado, o bien, como antes hemos dicho, podrá estar modificada la forma del campo.

VIII. — **Propiedades de la retina**

La llegada de la luz a la retina es la que, normalmente, da lugar a las impresiones luminosas. Se enseña en los libros de anatomía que esta retina está compuesta de muchas capas; la última de ellas, es decir, la más posterior con relación a la dirección de llegada de la luz, llamada membrana de Jacob o capa de los conos y de los bastoncillos es la única directamente excitable por la luz. He aquí la experiencia sobre la que está fundada esta opinión.

Delante de la capa de los conos y de los bastoncillos se encuentran vasos sanguíneos, estos vasos hacen sombra sobre lo que se encuentra detrás de ellos; esta sombra, recayendo sobre la membrana de Jacob, considerada como la capa sensible, debería ser percibida, y no ocurre nada de esto. Pero es fácil de demostrar que esto depende de diversas causas, en

particular de que por hábito se prescinde de la impresión producida por estas sombras fijas. Basta, en lugar de dejar estas sombras inmóviles, desplazarlas sobre la capa de los conos para que inmediatamente sean vistas. He aquí cómo se opera para ello. Coloquemos delante del ojo una cartulina con un agujero *O* (fig. 377) y miremos un cielo despejado a través de este orificio. Admitamos que *A* sea un vaso. La luz, penetrando por *O*, entra en la pupila, como está indicado en la figura, por trazos continuos, y la sombra de *A* se proyecta en *a* sobre la capa de los conos. Bajemos la tarjeta, el orificio *O* se colocará en *O'*; resultará entonces en el ojo un haz representado por trazos discontinuos y la sombra de *A* vendrá a caer sobre *a'*. La sombra del vaso es, por lo tanto, desplazada sobre la capa de los conos; cada vez que desplacemos la cartulina perforada resultará un desplazamiento de la sombra *a*, que vendrá a caer sobre elementos retinianos previamente iluminados y durante breves momentos se verá esta sombra. Después, habrá que desplazarla de nuevo si no se la quiere perder. Si se anima el cartón de un ligero movimiento de vaivén de una frecuencia aproximada de dos movimientos por segundo y se mira a través del agujero un cielo despejado, se ve también una magnífica arborización formada por la sombra de los vasos que se desplaza sobre la retina. Esta experiencia, conocida con el nombre de árbol vascular de Purkinje, demuestra que la capa de los conos situada detrás de estos vasos es sensible.

Hagamos notar que no puede haber muchas capas dotadas de esta propiedad, porque la imagen de los objetos exteriores no puede formarse simultáneamente con limpieza sobre estas diversas capas; si hubiese muchas, resultaría una confusión de imágenes, lo que no ocurre.

Se puede también, por una experiencia muy notable, mostrar directamente que las fibras del nervio óptico no son en sí mismas excitables por la luz. Cuando se mira la retina de frente, se ve un punto situado en las inmediaciones del polo posterior del ojo, un poco hacia dentro, una mancha circular blancorrosada. Es la papila, o punto de entrada del nervio óptico en el ojo. Este punto de la retina es ciego, como lo ha demostrado Mariotte de dónde el nombre de mancha de Mariotte o *punctum cœcum*.

He aquí cómo se demuestra esto, para el ojo derecho, por ejemplo. Marquemos sobre un papel una señal *A* (fig. 378). A una distancia *AB* hacia la derecha, aproximadamente igual a la separación de los ojos, hagamos una mancha *B*, de medio centímetro de diámetro, aproximadamente. Después, cerrando el ojo izquierdo, miremos fijamente *A* separándonos, aproximadamente, veinticinco centímetros del papel, vemos desaparecer la mancha *B*; su imagen recae en una región ciega de la retina. Estudiando de cerca la cuestión por medio de medidas y de dibujos, se ve que esta región ciega corresponde a la papila.

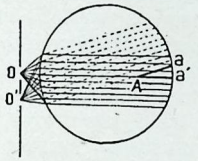


Fig. 377

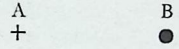


Fig. 378

Existe, por el contrario, en la retina, un punto que corresponde a un máximum de sensibilidad, es aproximadamente el polo posterior del ojo. La retina sufre allí una pequeña depresión conocida con el nombre de fosa central; esta fosa central está en medio de la *mancha amarilla* o *macula lutea*. Allí es en donde la visión de los detalles es más perfecta y a esta fosa central es donde se lleva la imagen de los objetos cuando se quieren percibir los más pequeños detalles. Como esta región es bastante limitada, se concibe porqué no le corresponde en el campo visual más que una extensión muy pequeña en donde se pueda realmente ver bien los detalles de los objetos.

La fosa central que da lugar a la mayor agudeza visual pierde sus ventajas en la percepción de los colores. Se ha demostrado que para apreciar los colores es conveniente servirse de los bordes de la mancha amarilla, es decir, que no hay que mirar directamente el objeto, sino dirigir su mirada un poco de lado. En particular el azul, no podría, según ciertos autores, ser percibido más que de esta manera.

Cuando la luz cae sobre la retina, no es inmediatamente

percibida. Hay, como para todos los fenómenos fisiológicos, un período latente, es decir, cierto intervalo de tiempo entre el momento de la excitación y el momento de la entrada en actividad del órgano excitado.

Por otra parte, una vez excitada la retina, la sensación luminosa no desaparece instantáneamente después de cesar la excitación. Supongamos que se acaba de apagar un punto luminoso, durante cierto tiempo, que se puede evaluar en $^1/_{10}$ de segundo aproximadamente, la persona que miraba este punto luminoso cree verlo todavía. Es lo que se denomina persistencia de las impresiones luminosas sobre la retina, propiedad que ha recibido numerosas aplicaciones prácticas. Si una persona mira un objeto, se puede apagar periódicamente la luz que ilumina este objeto, durante un tiempo que no sea mayor de $^1/_{10}$ de segundo, y la persona continuará viendo el objeto como si estuviese constantemente iluminado. He aquí una aplicación de esta experiencia. Si se presenta un objeto al ojo y se le hace aparecer periódicamente, por un procedimiento cualquiera, bastará que la desaparición dure muy corto tiempo para que el observador crea ver el objeto fijo en su sitio. Si ahora, en lugar de presentar siempre el mismo objeto, se presenta una serie de objetos de forma gradualmente variable, el observador creerá ver un objeto fijo que se deforma ante sus ojos. Este es el principio del cinematógrafo, en el que se hacen pasar rápidamente ante los ojos una serie de fotografías sucesivas de una vista, tomadas a cortos intervalos. El cinematógrafo no es, por lo demás, en sí mismo, más que un perfeccionamiento de un juguete muy generalizado llamado zootropo, que consiste en una serie de imágenes que representan los diversos tiempos de un movimiento, que se hacen desfilar rápidamente ante los ojos en un cilindro giratorio alrededor de su eje. Este juguete es demasado conocido para tener necesidad de describirlo.

Ahora bien; ¿por qué mecanismo las terminaciones nerviosas en la retina son excitadas por la luz incidente? Esta excitación no parece realizarse directamente, sino por el intermedio de las transformaciones que sufren ciertos pigmentos que rodean los elementos retinianos. Entre estos pigmentos hay uno denominado púrpura retiniana que ha sido objeto de numerosos estudios, sobre cuyas funciones no existe todavía acuerdo, pero que desempeña ciertamente un papel considerable en la visión.

Si inmediatamente después de sacrificar un animal conservado en la obscuridad se le extirpa un ojo y se extrae la retina no operando más que en la penumbra o a la luz roja, se aprecia que esta retina ofrece un color rojo púrpura, que a la luz del día, cambia primero en amarillo y después se decolora por completo. En la obscuridad se regenera el color de púrpura.

Se puede fijar esta materia colorante de modo que se haga inalterable a la luz, sumergiendo la retina en una solución de alumbre. Kühne ha podido obtener así optógramas, es decir, verdaderas fotografías retinianas de los objetos exteriores. Basta para ello tomar el ojo de un animal conservado en la obscuridad y exponerlo durante cierto tiempo en la cámara obscura frente a una ventana. Se abre el ojo inmediatamente lo más rápidamente posible en la solución de alumbre, y se aprecia sobre la retina la presencia de un optógrama de la ventana con sus barrotes.

La púrpura retiniana se disuelve en una solución de sales biliares, y en este estado conserva la propiedad de decolorarse a la luz y regenerarse en la obscuridad.

Esta púrpura retiniana no se encuentra más que en los bastoncillos, no existe en la fosa central, que únicamente contiene conos. Relacionando este hecho con lo que hemos dicho a propósito de la visión de los colores, se comprenderá porqué ciertos autores han atribuído a la púrpura retiniana un papel considerable en esta visión de ciertos colores, en especial del azul.

IX. — **Visión binocular**

La visión binocular tiene por efecto dar lugar a la sensación de relieve; gracias a ella, el observador que se encuentra frente a un paisaje tiene la noción de los diversos planos del mismo, o también mirando un cuerpo de tres dimensiones se da cuenta del valor de cada una de ellas. Consideremos un cuerpo de forma geométrica sencilla, un tetrae-

dro, por ejemplo, que representamos en perspectiva en la figura 379. La base *ABC* se supondrá aplicada contra un plano vertical, por ejemplo, una pared, ante la cual estará el observador. El vértice estará en *S*, en la perpendicular *OP* bajada desde el punto *O*, en donde se encuentra el ojo, hasta la pared. Cada uno de los puntos *A, B, C, S*, formará su imagen en la retina. Supongamos ahora que el punto *S* se desplaza y se coloca en S', la forma del tetraedro cambiará, pero la imagen de los cuatro vértices del tetraedro sobre la retina no habrá sufrido ninguna modificación. *A, B, C* no se han desplazado, y lo mismo ha ocurrido evidentemente con sus imágenes retinianas. *S* se ha desplazado siguiendo la recta que le une al ojo y basta remitirse a la formación de las imágenes en el ojo para comprender que la imagen retiniana ha permanecido la misma. Por lo tanto, el observador debe experimentar la misma impresión mirando *ABCS* que mirando *ABCS'*; podemos hasta decir que la impresión no cambiará, cualquiera que sea la posición de *S* en la recta *OP*, que *S* esté en *P*, lo que da una figura plana que esté delante de la pared, lo que da una pirámide que tiene más o menos relieve o que esté detrás de la pared, lo que daría una pirámide en hueco. Con la visión monocular no se comprende, pues, que se pueda experimentar la sensación del relieve de los objetos.

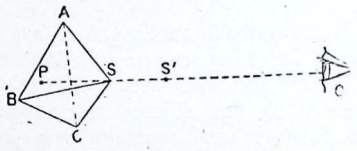


Fig. 379

Hay, no obstante, que hacer una restricción. Si el punto *S* se encuentra muy delante o muy detrás del plano *ABC*, el ojo no se podrá acomodar a la vez en *S* y en *ABC*, las variaciones de acomodación irán acompañadas de la sensación de aproximación o de alejamiento. Además, a consecuencia de la educación, del conocimiento de la mayor parte de los objetos que nos rodean, nos basta verlos monocularmente para ponerlos en relieve. Estas dos acciones, educación y acomodación, nos permiten, pues, hasta cierto punto, hacernos cargo del relieve de los objetos, pero gracias a la visión binocular este efecto será llevado al más alto grado de perfección.

Es fácil comprender que cuando miramos un objeto cuyos puntos no están todos en el mismo plano, las imágenes de este objeto sobre las dos retinas no son idénticas. Supongamos, en efecto, un objeto constituído simplemente por tres puntos *A, B, C* (fig. 380) estando el punto *C* delante de los otros dos. El ojo izquierdo está en *G*, el ojo derecho en *D*. Para tener las dos imágenes retinianas basta unir *A, B, C* a los centros ópticos *O* y *O'* de los dos ojos y prolongar las rectas así obtenidas hasta las retinas; se tendrán, en el ojo izquierdo, las imágenes *a, b, c* y en el ojo derecho *a', b', c'*. Se ve inmediatamente que los dos conjuntos *a, b, c* y *a', b', c'* no son idénticos; en el de la izquierda el punto *c* está más cerca de *b* que *a*, en el de la derecha, el punto *c'* está más lejos de *b'* que de *a'*. Si se representan estas dos imágenes de frente se tiene la figura 381.

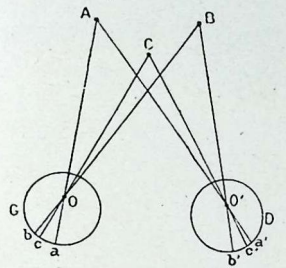


Fig. 380

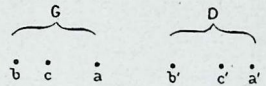


Fig. 381

Gracias a esta diferencia entre estas dos imágenes retinianas, se experimenta la sensación del relieve de *C* delante de *AB*.

En efecto, si mediante un artificio se produce sobre las dos retinas dos imágenes idénticas, se tiene siempre la impresión de una figura plana. Si, por el contrario, se producen dos imágenes diferentes convenientes, se tiene una sensación de relieve.

Este resultado se obtiene por medio del estereóscopo. En este instrumento se mira con los dos ojos a través de los orificios *O* y *O'*; *O* para el ojo izquierdo, *O'* para el derecho (fig. 382). En *E* y *E'* se encuentran dos dibujos y gracias al diafragma opaco *DD'* el ojo izquierdo no puede percibir más que *E* y el derecho más que *E'*.

En estas condiciones, coloquemos en *E* y en *E'* dos figu-

ras idénticas, por ejemplo, tres puntos equidistantes, *A B, C,* a la izquierda; *A', B', C',* a la derecha (fig. 383, I). No tendremos ninguna sensación de relieve, nos parecerá ver tres puntos en línea recta igualmente alejados de los ojos, los tres en el plano *EE'*. Esto depende de que las imágenes en el ojo *G* y en el ojo *D* son idénticas. Pero coloquemos en *E* el dibujo *A C B* de la figura y en *E'* el dibujo *A', C', B'* (fig. 383, II), se formará sobre las dos retinas imágenes

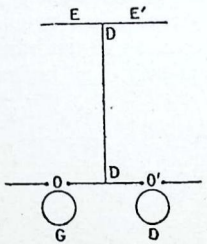


Fig. 382

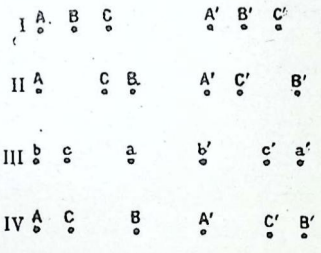


Fig. 383

invertidas como *b, c, a* y *b', c', a'* (fig. 383, III), no idénticas y por ese solo hecho y aunque los objetos que miramos estén realmente colocados ambos a dos en el plano *EE'*, tendremos una sensación de relieve. Nos parecerá que *C* está delante del plano *EE'*. Si se hubiesen mirado dos dibujos, tales como *ACB, A'C'B'* de la figura 383 IV, habría parecido que *C* estaba detrás del plano *EE'* pasando por *AB*.

Esta experiencia puede variarse de muchas maneras; se ha generalizado mucho desde el progreso de la fotografía. Basta colocar en un estereóscopo, en *E* y *E'*, dos fotografías tomadas desde dos puntos diferentes, que tengan cierta separación horizontal, para tener una sensación de relieve tanto más pronunciada cuanto mayor es esta separación. Si se colocase a cada lado la misma fotografía, la sensación de relieve no sería más que mediana y resultaría únicamente de nuestra educación y del conocimiento del objeto visto.

Para que la visión estereoscópica se realice en buenas condiciones, es preciso que haya fusión de las dos impresiones que resultan de las dos imágenes. Supongamos que se coloca

en el estereóscopo, en *E* y *E'*, únicamente un punto a cada lado; ocurre con mucha frecuencia, mirando a través de los orificios *O* y *O'*, que se tiene la impresión de dos puntos luminosos, hay, como se dice, diplopía. Esto depende de que las imágenes no se forman en puntos concordantes de las dos retinas. En efecto, si miramos un punto *A* (fig. 384), lo vemos, en general, sencillo, los puntos *a* y *a'*, en donde se forman las dos imágenes de *A* se llaman concordantes. El punto

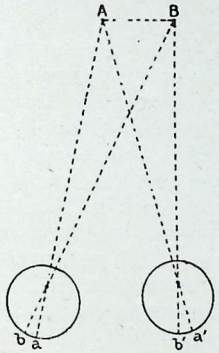


Fig. 384

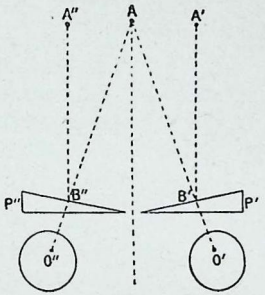


Fig. 385

B, próximo y situado a la misma distancia de los dos ojos, formará sus imágenes en *b* y *b'*. Este punto *B* se ve también sencillo *b* y *b'* son, pues, también puntos concordantes de las dos retinas.

Se concibe perfectamente que cuando se mira binocularmente un punto determinado, los dos ojos deben tener una convergencia conveniente, para que las imágenes sobre las dos retinas se encuentren en puntos concordantes. Cuando, mirando en un estereóscopo como el de la figura 382 se quiere obtener la impresión de un solo objeto, es preciso llevar las imágenes en los dos ojos sobre puntos concordantes de las dos retinas, y para ello es indispensable dar a los dos ojos una convergencia apropiada. Esto no se realiza siempre fácilmente y entonces se ve doble.

Se remedia esta diplopía colocando delante de las aber-

turas del estereóscopo dos prismas convenientemente orientados, destinados a modificar la dirección en que los rayos luminosos llegan al ojo. Supongamos, por ejemplo, que los dos ojos *O'* y *O"* miren los dos puntos *A'* y *A"* (fig. 385), la experiencia demuestra que, en general, si la observación es directa, se les ve dobles. Esto depende de que se acomoda la vista a la distancia en que se encuentran los puntos *A'* y *A"*; simultáneamente ligada a esta acomodación, se produce una convergencia de los ejes de los dos ojos, de modo que las direcciones de los ejes se corten en un punto *A*. Si los dos ojos miraran directamente *A* se le vería simple. Por lo tanto, coloquemos delante de los ojos los dos prismas *P'*, *P"*, las aristas hacia dentro. Sabido es que un rayo cualquiera que atraviese un prisma es desviado hacia la base, por lo tanto, si el ángulo del prisma es convenientemente elegido, el rayo *A'B'* se convertirá, después de pasar el prisma, en *B'O'*, todo ocurrirá como si este rayo viniese de *A*. Lo mismo pasa con *A"B"O"*, que también parecerá venir de *A*. La luz llega, pues, a los dos ojos de *A'* y *A"*, como si partiese realmente de *A*, se ve un punto único en *A*.

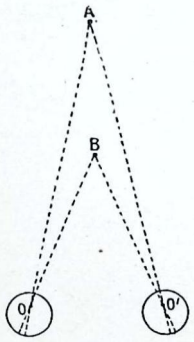


Fig. 386

La convergencia de los ejes de los dos ojos debe variar con la distancia a la que se encuentran los objetos que se miran. Si por ejemplo, se mira el punto *A* (fig. 386), los ejes de los dos ojos deben converger hacia *A;* si se mira el punto *B*, deben converger hacia *B;* resulta que si la convergencia es conveniente para *A*, no lo es para *B*, y a la inversa. Dicho de otro modo: si se miran dos objetos igualmente alejados del ojo, viendo uno simple, se ve el otro doble.

Esta experiencia es fácil de realizar. Coloquémonos frente a una ventana y cerca de ella. Fijemos la mirada de nuestros dos ojos en un barrote vertical; apreciaremos que un objeto colocado a lo lejos, por ejemplo, una chimenea que se destaque bien sobre el cielo, nos parecerá desdoblada; si, por el contrario, miramos la chimenea, veremos doble el barrote de la ventana.

Ocurre algunas veces que la convergencia de los dos ojos no está bien reglada; hay, cuando se mira un punto, exceso o defecto de convergencia. Esto puede proceder de una parálisis que afecte los músculos del ojo o de cualquiera otra causa. Sea como fuere, en este caso, se ven dobles los objetos que se quieren mirar; este defecto es conocido con el nombre de estrabismo. El estrabismo puede ser, pues, convergente o divergente.

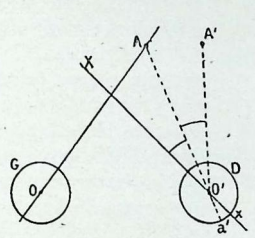


Fig. 387

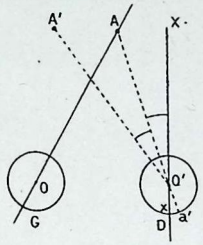


Fig. 388

Supongamos ahora el estrabismo convergente; el ojo izquierdo, por ejemplo, estará bien orientado, su eje óptico estará dirigido hacia el punto *A*, que se mira (fig. 387). Pero para el ojo derecho, el eje *O'X* no pasa por *A*. La imagen de *A* se forma, no en *x*, en donde debería encontrarse si el ojo estuviese bien orientado, sino en *a'*. Todo ocurre como si, estando el ojo bien orientado, tuviese un punto luminoso en *A'*. En realidad, el observador cree ver un punto en *A'* con su ojo derecho, un punto en *A* con su ojo izquierdo. Se dice que hay diplopía homónima, es decir, que cada imagen está del lado del ojo correspondiente. Si se cierra el ojo derecho, se ve desaparecer la imagen derecha, y a la inversa.

Supongamos ahora el estrabismo divergente, el ojo izquierdo está bien orientado, pero el eje óptico *O'X* del ojo derecho no converge bastante (fig. 388).

La imagen de *A*, en lugar de formarse en *x*, en donde se debería encontrar, se forma en *a'*. Todo ocurre como si,

estando el ojo bien orientado, hubiese un punto luminoso en *A'*. La diplopía se llama, en tal caso, cruzada. Si se cierra el ojo derecho, se ve desaparecer la imagen de la izquierda, y a la inversa.

En ciertos casos, cuando la diplopía no es demasiado acentuada, se la puede hacer desaparecer por el empleo de prismas convenientes. Siendo los rayos que atraviesan un prisma, desviados hacia la base, es evidente que para conducir el rayo *AO'* (fig. 387) en la dirección *O'X*, es preciso colocar delante del ojo *O'* un prisma de base externa. En el caso de la figura 388 es necesario, por el contrario, emplear un prisma de base interna.

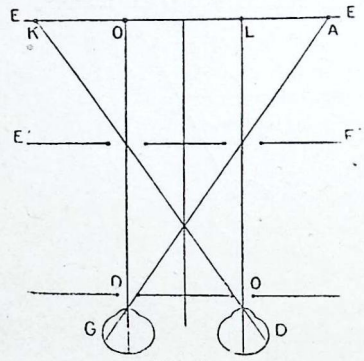


Fig. 389

Diploscopo de Rémy. — El diploscopo de Rémy permite reconocer fácilmente el menor defecto o exceso de convergencia de los ojos. He aquí el principio de este instrumento, del que hay diversos modelos.

El sujeto mira a través de dos orificios que corresponden a los dos ojos *G* y *D* (fig. 389), y procura leer una palabra de cuatro letras, KOLA, por ejemplo, sobre la pantalla *EE'*. Una segunda pantalla, dotada de orificios convenientemente colocados, como indica la figura, no permite al ojo izquierdo más que ver las vocales O y A, quedando las consonantes K y L ocultas para él. Para el ojo derecho, ocurre lo contrario. A pesar de ello, si los ojos tienen su convergencia normal, el sujeto lee la palabra KOLA, encontrándose las letras regularmente dispuestas; pero si hay exceso de convergencia, por ejemplo, es sabido (fig. 389) que hay diplopía homónima, las letras vistas por el ojo aparecen desplazadas hacia el exterior; o, lo que es el mismo, el grupo de las vocales OA se desplaza más o menos, a la izquierda con relación al grupo

de consonantes, dando apariencias tales como KOLA, KO LA, OKAL.

Si, por el contrario, hay insuficiencia de divergencia, el sujeto verá el grupo OA desplazarse hacia la derecha con relación a las consonantes, y leerá KOLA, K OL A, KLOA, o algo análogo. Colocando ante los ojos prismas de ángulo apropiado y convenientemente orientados, se restablece la visión normal.

X. — Optómetros

Los optómetros son instrumentos destinados a determinar rápidamente el grado de ametropía de un ojo, por una simple lectura sobre una escala graduada.

Los dos únicos modelos que se encuentran en la práctica son el de Perrin y Mascart y el de Badal.

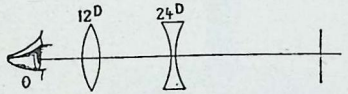


Fig. 390

El optómetro de Perrin y Mascart (figs. 390 y 391) se componen esencialmente de un tubo de latón que lleva en una extremidad, del lado ocular, una lente convergente de 12 dioptrias. En el otro extremo, a una distancia de esta lente igual a dos veces su distancia focal, se encuentra una pequeña pantalla que lleva los caracteres y signos que se trata de distinguir. En el intervalo comprendido entre la lente convergente y la pantalla se encuentra una lente divergente de 24 dioptrias que puede desplazarse de un extremo a otro del tubo.

Cuando la lente divergente está a la derecha contra la pantalla, la imagen de la pantalla a través de esta lente coincide sensiblemente con el objeto. Encontrándose el foco de la lente convergente a mitad del tubo, el ojo que mira la imagen de la pantalla recibe rayos convergentes; debe, pues, ser hipermétrope para ver claramente los caracteres.

Cuando la lente divergente está a la izquierda contra la lente convergente, su conjunto forma una lente divergente,

los rayos que vienen de la pantalla son, después de su paso a través del instrumento, muy divergentes al llegar al ojo.

A medida que la lente divergente se desplaza en toda la longitud del tubo desde la pantalla hasta la lente convergente, los rayos emergentes, primero convergentes, a la salida, se hacen cada vez menos convergentes, después paralelos, después cada vez más divergentes. Buscando cuál es la posición de esta lente, en la que el ojo ve claramente los caracteres, se deduce la ametropía de este ojo por una simple lectura sobre una graduación. Hay que hacer notar que hay diversas posiciones de la lente para las que el ojo puede leer, acomodándose más o menos; es preciso buscar el límite extremo de lectura del lado de los rayos menos divergentes, es decir, separando lo más posible la lente divergente del ojo; entonces es cuando el ojo no está acomodado.

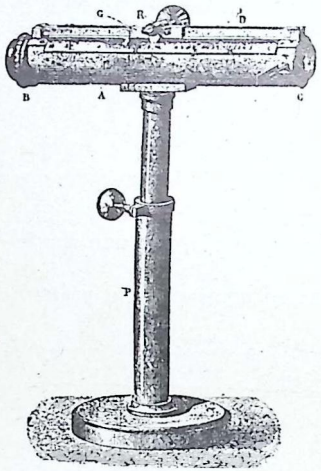


Fig. 391

Utilizando el optómetro de Perrin y Mascart, así como el de Badal, se puede medir, no sólo el grado de ametropía de un sujeto, sino también su amplitud de acomodación. Basta, para ello, buscar los límites extremos entre los que puede ver; uno de ellos corresponde a la visión no acomodada, el otro a la visión acomodada al máximum. Supongamos, por ejemplo, que se encuentren como límites — 2 y — 7; esto significa que el cristal — 2 permite al sujeto ver en el infinito; es el cristal corrector de su miopía. Pero este mismo sujeto puede todavía ver con — 7, lo que equivale a 5 dioptrias, que ha de hacer de acomodación al pasar de — 2 a — 7.

Es fácil de ver lo que ocurre en cada caso; el cristal menos divergente es siempre el cristal corrector, su diferencia con el cristal más divergente representa la amplitud de acomodación.

Así, un sujeto que viera de + 3 a — 5, sería un hipermétrope de 3 dioptrias que tendría 8 dioptrias de amplitud de acomodación.

El aparato de Perrin y Mascart tiene dos inconvenientes: uno consiste en el hecho de que la graduación correspondiente a las diversas ametropías no es igual, los trazos están muy separados unos de otros en una región, y muy próximos en otra. La sensibilidad del instrumento no es, pues, la misma para todas las ametropías. Pero tiene un defecto todavía más grave: cuando se mira la imagen de la pantalla y se desplaza la lente divergente, la magnitud de la imagen varía enormemente, se puede, pues, ser inducido a error por la persona que se examina. Puede acusar una vista mejor para una imagen más grande que para otra más pequeña y, sin embargo, más clara.

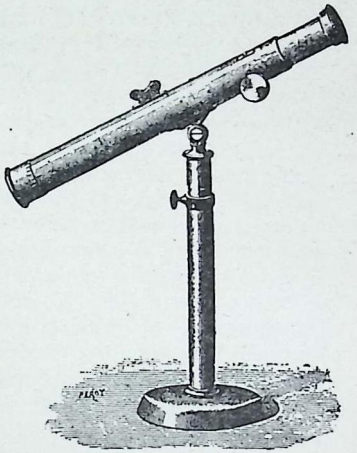


Fig. 392

El optómetro de Badal (figs. 393 y 394) está exento de estos defectos. Se compone esencialmente de un tubo hacia uno de cuyos extremos se encuentra una lente que tiene 6,5 c. de distancia focal. Una pequeña pantalla portadora de los signos que hay que leer se desplaza a lo largo del tubo y el ojo está colocado de manera que su centro óptico concuerda con el foco de la lente. Cuando el objeto está contra la lente, la imagen lo está también, los rayos llegan al ojo como partiendo de un objeto situado a 6,5 c. de este ojo, son muy divergentes. A medida que el objeto se desplaza hacia la derecha, estos rayos se hacen cada vez menos divergentes, cuando el objeto está en el foco F' son paralelos, después se hacen convergentes. Este instrumento funciona, pues, como el de Perrin

y Mascart, pero se ve fácilmente que durante el desplazamiento del objeto la imagen permanece de magnitud constante. En efecto, por el vértice del objeto tracemos una paralela AA' al eje óptico, este rayo se refractará según $A'F$, pasando por el centro óptico del ojo, puesto que este centro óptico concuerda con el foco de la lente. La imagen del vértice del objeto se encuentra en la línea $FA'X$, y para tener la imagen retiniana bastará unir al punto F el punto de $FA'X$ en que se encuentra la imagen formada por la lente. La imagen retiniana estará siempre en a. Se ve, pues, que siempre, sea la que fuera la posición de AB, se tendrá la misma línea AA', el mismo rayo refractado $A'F$ y la misma imagen retiniana a. La imagen retiniana es, pues, de magnitud constante. Se ve que la graduación del optómetro está equidistante en todo su recorrido y, por consiguiente, está exento de los dos inconvenientes del de Perrin y Mascart. No obstante, no hay que perder de vista que este instrumento debe estar bien reglado: nunca está uno cierto de que el sujeto sometido al examen, coloca el centro óptico de su ojo en concordancia con el foco; esto depende de demasiados elementos para que este ajuste sea perfecto.

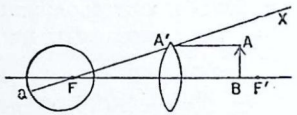


Fig. 393

XI. — **Oftalmoscopio**

El oftalmoscopio es un instrumento que permite observar la retina o determinar las ametropías del ojo.

Se compone esencialmente de un espejo destinado a iluminar el fondo del ojo. Para obtener este resultado, se coloca al lado de la persona sometida al examen una luz L (fig. 394), una lámpara o un mechero de gas; el observador O, armado de un espejo, proyecta la luz reflejada sobre el ojo del observado O'. Es conveniente utilizar un espejo convergente que proporciona mejor iluminación que el espejo plano. El espejo presenta en el centro un agujero circular, a través del cual mira el observador para examinar el ojo del observado.

Como se mira la retina a través de los medios refringentes del ojo, lo que se ve en realidad es una imagen de esta retina; esta imagen puede ser real e invertida, o virtual y directa. Examinemos sucesivamente estos dos casos.

Ante todo, es preciso recordar el principio del retorno inverso de los rayos, según el cual si un objeto forma una imagen a través de un sistema óptico cualquiera, considerando esta imagen como un objeto, la imagen de este nuevo objeto se superpone al objeto primitivo, los rayos luminosos se propagan siguiendo el mismo camino que precedentemente, pero en sentido inverso.

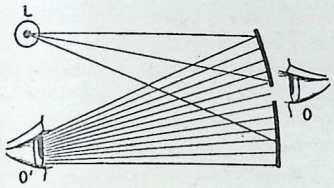


Fig. 394

Dicho esto, consideremos un ojo miope O', cuyo *punctum remotum* se encuentra en el plano PR (fig. 395). Esto quiere decir que, no estando acomodado este ojo, la imagen real e invertida de los objetos situados en el plano PR se forma claramente sobre la retina. Resulta, por lo tanto, según el principio de retorno inverso de los rayos, que estando iluminada la retina de O' su imagen real e invertida se forma en el plano PR. Bastará que el ojo observador colocado en O se acomode, respecto al plano PR para ver claramente la imagen que se forma en el plano PR, o servirse para ello de una lupa, que se colocará detrás del agujero del oftalmoscopio.

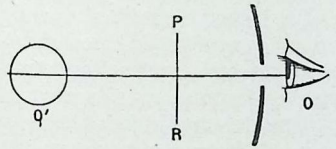


Fig. 395

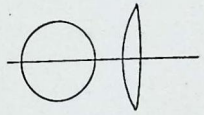


Fig. 396

Estas explicaciones respecto a las imágenes invertidas no se aplican más que si el ojo observado es bastante miope para que su *punctum remotum* se encuentre delante del observador,

pero es fácil conducir todos los ojos a este caso: para ello basta dotarlos de una lente fuertemente convergente. Sabido es que si se coloca delante del ojo de un emétrope una lente convergente (fig. 396) no ve el infinito, se ha convertido en miope. Lo mismo ocurre para un hipermétrope, si la potencia de la lente colocada delante de su ojo es superior a la de su cristal corrector. La lente que se emplea en oftalmoscopia con este fin, tiene aproximadamente de 13 a 14 dioptrías; por consiguiente, en todos los casos en que no se trata de una hipermetropía excepcional, se podrá transformar el ojo observado en ojo miope y obtener una imagen real e invertida delante del observador.

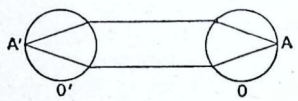


Fig. 397

Es muy importante no confundir esta lente colocada delante y cerca del ojo observado para hacerle miope, con la lente que los observadores de acomodación, insuficiente, colocan detrás del agujero del oftalmoscopio, para que les sirva de lupa y mirar la imagen real producida por la primera lente.

La lente de 13-14 dioptrias sostenida por la mano del observador, le sirve, en el caso de que la imagen de la retina no le aparezca con gran limpieza, para enfocar como se hace con el microscopio, separando o aproximando el sistema óptico al objeto que se quiere mirar. La misma lente sirve, además, para otro uso: permite conducir al campo los diversos puntos de la retina. Cuando se mira al microscopio, se desplaza la preparación bajo el objetivo para explorarla en sus diversas partes. Se podría obtener el mismo resultado desplazando el cuerpo del instrumento por encima de la preparación: una maniobra análoga a ésta es la que se ejecuta paseando la lente delante del ojo observado, de derecha a izquierda, de arriba abajo, etc., de modo que se vean sucesivamente las diferentes regiones de la retina.

Pasemos ahora a la observación de la imagen directa. Admitamos, desde luego, que el observador *O* y el observado *O'* sean emétropes y no acomodados (fig. 397). Un punto *A'* de la retina observada emite un haz cónico divergente que sale del ojo por la abertura de la pupila. Como este ojo mira al infinito,

en virtud del principio de retorno inverso de los rayos, los rayos emergentes serán paralelos entre sí. Cayendo estos rayos paralelos entre sí sobre el ojo observador, que también mira al infinito, penetran en él y forman una imagen clara sobre la retina en *A*. Por consiguiente, el ojo observador ve claramente la retina de *A'*. Todo ocurre como si el ojo observador mirase la retina de *O'* a través de una lupa formada por el sistema óptico de *O'*, estando el objeto colocado en el foco.

Supongamos ahora el ojo observado hipermétrope (figura 398). Los rayos partidos de *A'* no serán paralelos entre sí a la salida. Sabido es que el ojo hipermétrope no es bastante refringente y se conduce como un ojo emétrope provisto de

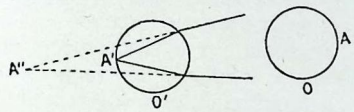


Fig. 398

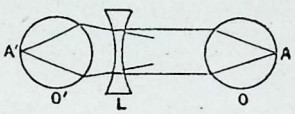


Fig. 399

una lente divergente. Los rayos que salen del ojo hipermétrope no acomodado serán, por lo tanto, divergentes, parecen partir del punto *A''*, y bastará al ojo observador acomodarse para *A''* para ver claramente la imagen de la retina en *O'*. Este es también el caso del observador con la lupa, estando el objeto entre el foco y la lente que forma la lupa.

Tomemos, por último, el caso en que el ojo observado fuera miope (fig. 399). Los rayos que parten de *A'* y salen de este ojo formarían entonces un haz convergente. Semejante haz no podría, como es sabido, formar una imagen clara sobre la retina de *O*. Es preciso, pues, colocar entre *O* y *O'* una lente divergente antes de su llegada a *O*. Si es paralelo, formará sobre la retina de *O* una imagen clara *A* sin que *O* acomode. Si, por el contrario, la lente *L* es más potente y el haz se ha hecho divergente, será preciso que el ojo *O* acomode para que se forme sobre su retina una imagen clara, como en el caso de la observación del ojo hipermétrope.

Si, por último, el observador no es emétrope, no hay más que añadirle un cristal corrector que le lleve a la emetropia para encontrar los tres casos que acabamos de examinar.

Con el fin de hacer pasar fácilmente entre O y O' las lentes deseadas, ciertos oftalmoscopios están provistos de una serie de cristales montados sobre un disco o sobre otro dispositivo. Estos oftalmoscopios se llaman de refracción; hay un número considerable de modelos.

Determinación de una emetropía por medio del oftalmoscopio. — Se puede encontrar el cristal corrector de una emetropía con el oftalmoscopio de refracción, observando la imagen directa e investigando el cambio de lente que transforma una imagen clara en una imagen turbia. Este método exige una habilidad bastante grande y no es muy exacto; hay, por el contrario, otro procedimiento, llamado de la esquiascopia, que no exige ningún aprendizaje; es de la mayor exactitud.

He aquí cómo se opera. Se toma un oftalmoscopio de espejo plano y colocada la lámpara, como de costumbre, al lado del sujeto, nos colocamos a 1 metro de este sujeto e iluminamos. Se observa entonces que la pupila parece luminosa en su totalidad. Si se hace girar ligeramente entre los dedos el mango del oftalmoscopio, de manera que se desplace lateralmente la mancha luminosa que se produce sobre la cara, se aprecia que la pupila es invadida por una sombra. Según el modo cómo aparece esta sombra, se pueden sacar diferentes consecuencias.

En primer lugar, la sombra puede marchar en el mismo sentido que la mancha luminosa, se llama directa.

Puede marchar en sentido contrario de la mancha luminosa, entonces es inversa.

Por último, puede aparecer y desaparecer de repente, sin que se pueda decir en qué sentido marcha.

Estudiemos ahora cómo se puede deducir de la manera como tiene lugar la invasión de la sombra pupilar el grado de emetropía del sujeto. Supongamos que el observador haga girar el espejo alrededor del eje vertical en el sentido indicado por la flecha en la figura 400. La experiencia diaria nos enseña, sin que sea necesario insistir, que la mancha luminosa formada sobre el rostro del sujeto se desplaza entonces de izquierda a derecha con relación al observador, mientras que la imagen virtual del manantial de luz S pasa de s_1 a s_2. Como el ojo

examinado no está, en general, acomodado para la distancia de estas imágenes, los conos de rayos que de cada uno de ellos caen en la pupila PP', formarán dos círculos luminosos $a_1\ b_1$ y $a_2\ b_2$ sobre el fondo del ojo. La zona luminosa se desplaza

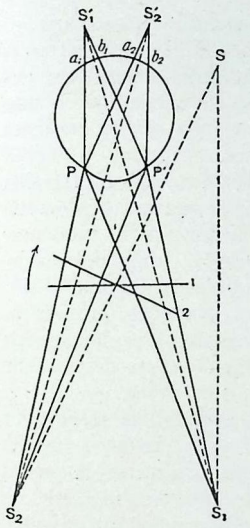


Fig. 400

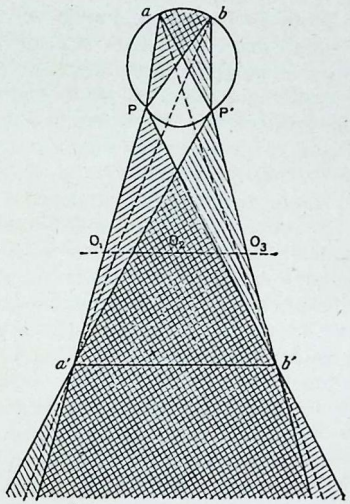


Fig. 401

sobre la retina en el mismo sentido que la mancha luminosa sobre la cara del sujeto.

Veamos ahora bajo qué aspecto será percibido este fenómeno por el observador. En virtud del principio de retorno inverso de los rayos luminosos, para que un punto de la pupila del sujeto parezca iluminado, es preciso que los rayos que unen el ojo del observador con el punto considerado de la pupila del sujeto caiga, después de refractados, sobre la parte iluminada de la retina. Consideremos especialmente una extremidad P del diámetro pupilar horizontal (fig. 401) el punto será luminoso para el observador si la pupila de éste está comprendida en el cono $a'Pb'$ que corresponde al conjunto de rayos

emitidos por todos los puntos iluminados de la retina que pasan por el punto P.

De la misma manera, la otra extremidad P' del diámetro pupilar parecerá iluminada si la pupila del observador se encuentra en el cono $a'P'b'$.

Naturalmente, si la pupila del observador está situada en la zona común a los dos conos $a'Pb'$ y $a'P'b'$, las dos extremidades de la pupila, así como todos los puntos intermedios, parecerán iluminados. Si, por el contrario, se encuentra en uno solo de los conos, la extremidad de la pupila correspondiente al cono al que es exterior aparecerá obscura.

Cuando la zona luminosa ab se desplaza sobre la retina de izquierda a derecha, la imagen $a'b'$ se desplazará de derecha a izquierda, puesto que es de sentido inverso a ab. Como únicamente los desplazamientos relativos de la pupila del observador y de los rayos emergentes del ojo observado son los interesantes para la demostración, podemos suponer que, en lugar de que sea la imagen $a'b'$ la que se desplace de derecha a izquierda, que sea el ojo del observador el que se desplace de izquierda a derecha.

Consideremos ahora el caso en que la pupila del observador se encuentra entre el ojo observado y la imagen que da de su propia retina. En estas condiciones, mientras la pupila del observador esté fuera del haz de rayos salido del ojo del sujeto, la pupila observada parecerá completamente obscura.

Cuando la pupila del observador penetre en O_1 en este haz, sólo la extremidad P parecerá iluminada. Para la posición O_2 la pupila entera aparecerá luminosa, y cuando la pupila esté en O_3, en el momento de salir del haz, sólo el punto P' parecerá también iluminado no enviando el resto de la pupila ningún rayo luminoso al ojo del observador.

El observador tendrá, pues, la impresión de que la sombra pupilar se desplaza en el mismo sentido que él, de izquierda a derecha, o, si está inmóvil y es la zona luminosa la que camina de izquierda a derecha, tendrá la impresión de una sombra que invade la pupila en el mismo sentido que el desplazamiento de la mancha luminosa sobre la cara del sujeto.

Un razonamiento análogo demuestra que si la pupila del

observador está situada detrás del conjugado de la retina, tiene lugar el aspecto inverso; el punto P' parece iluminado el primero y el punto P el último. La sombra pupilar parece entonces marchar en sentido contrario de la mancha luminosa sobre la cara del sujeto.

Un caso particularmente interesante es aquel en que la pupila del observador se encuentra en el plano de acomodación del ojo observado. Entonces, desde que la pupila del observador penetra en la imagen $a'b'$ de la parte luminosa de la retina del sujeto, las dos extremidades P y P' de la pupila observada aparecen simultáneamente iluminadas. La pupila permanecerá iluminada en su conjunto hasta que el ojo del observador sale de la imagen $a'b'$; en este momento la retina se hará completamente obscura en todos sus puntos. Si el sujeto relaja su acomodación, se puede entonces precisar inmediatamente su grado de ametropía. En efecto, puesto que el observador está a 1 metro del sujeto, se trata de un miope de una dioptria, es decir, que se corrige por un cristal de una dioptria.

Si la sombra está invertida, es que el *punctum remotum* está delante del observador, el observado es, pues, también miope, pero tiene más de una dioptria de miopía. Entonces se procura corregirla, para lo que se hace pasar por delante del ojo una serie de lentes divergentes de potencia creciente. Llega un momento en que se observa de nuevo la invasión en masa de la sombra; el cristal más débil produce también la sombra invertida, el cristal más fuerte la sombra directa. Cuando, en estas condiciones, se nota el fenómeno de la sombra en masa, se puede deducir que el ojo, provisto de su cristal, tiene tambien una dioptria de miopía; es necesario, pues, forzar en una unidad la potencia del cristal para tener la corrección perfecta. Si — 3 daba la sombra en masa, — 4 sería el cristal corrector.

Cuando al principio de la observación la sombra es directa, esto indica que el *punctum remotum* del sujeto está detrás del observador, es decir, es virtual. Se repite la misma serie de operaciones que antes con cristales convergentes. Cuando se llega al cristal que da la sombra en masa, el ojo tiene de nuevo una dioptria de miopía; es preciso, pues, para tener la correc-

ción, superponer un cristal — 1 al cristal convergente que produzca este efecto, lo que viene a restar una unidad al valor de la potencia del cristal convergente empleado. Si, por ejemplo, + 3 es este cristal que da la invasión en masa, + 2 es el cristal corrector. Se comprende, pues, que si esta invasión es producida por el cristal + 1, se encuentra como cristal corrector *O*, es decir, que se trata de un emétrope.

Si el sujeto es astigmático, se llega a resultados diferentes desplazando sucesivamente la mancha luminosa en los meridianos de mayor y menor curvatura. Los números de los cristales que dan la sombra en masa en cada uno de estos exámenes, disminuídos en una unidad, representan la potencia óptica del ojo para los meridianos observados, y por esto mismo indican el grado de astigmatismo del sujeto.

Advertencia importante. — Cuando se hace llegar la luz a un ojo, tanto para observar la retina como para aplicar el método de la sombra pupilar, hay que recomendar al sujeto que no mire el espejo. Sin esto, la luz cae en el fondo del ojo sobre la parte más sensible de la retina, por reflejo la pupila se contrae, no presenta más que una abertura muy pequeña y la observación se hace muy difícil.

He aquí la orientación de elección del ojo observado. Se dice al sujeto que mire hacia el observador del lado de la oreja del mismo nombre que el ojo examinado y a unos veinte centímetros hacia fuera, mirando un punto lejano detrás del observador. En estas condiciones, la luz cae en las inmediaciones de la pupila, región poco sensible, la pupila se dilata mucho, lo que facilita la observación. En este caso, por lo demás, el observador ve inmediatamente la pupila, que es un punto de referencia importante y cuyo examen es capital en las exploraciones oftalmoscópicas.

XII. — **Endoscopia**

Los tejidos vivos no son, en general, transparentes para la luz ordinaria; y no se puede ver directamente lo que pasa en las cavidades del cuerpo. A lo más, es posible, gracias a una iluminación intensa, percibir sombras o reconocer la transluci-

dez mayor o menor de una región. De esta manera, colocando una luz en el interior de la boca se puede reconocer si los senos maxilares son translúcidos o no, y si, por consiguiente, están vacíos o contienen una substancia opaca. El examen de la translucidez de los tejidos puede prestar grandes servicios; exige, no obstante, una interpretación juiciosa. Un cuerpo opaco en un tejido translúcido puede escapar a la observación; así, en general, no se ve el testículo en el examen por transparencia del hidrocele. He aquí la razón.

Supongamos que la luz viene de izquierda a derecha, en el caso de la figura 402, la superficie izquierda del escroto está iluminada, difunde la luz en todas direcciones y, para el ojo

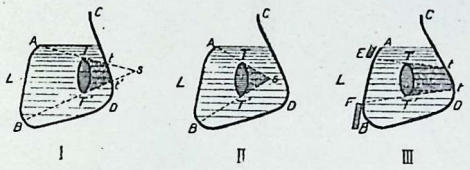


Fig. 402

observador colocado a la derecha, se convierte en la verdadera fuente de iluminación. Si el testículo no está bastante próximo a la pared derecha del escroto (fig. 402, II), no proyecta sombra y no se le ve; es necesario, para que aparezca, o que se desplace hacia la derecha (fig. 402, I), o que la superficie iluminada a la izquierda quede bastante reducida (fig. 402, III); basta para comprenderlo, recordar lo que hemos dicho acerca de la formación de las sombras.

Cuando las cavidades que se desea explorar tienen un orificio de comunicación con el exterior, se aprovecha este orificio para examinar el interior de la cavidad; se practica lo que se denomina endoscopia. La primera condición para poder examinar el interior de una cavidad es iluminarla; esto puede hacerse de dos maneras: o tomando una fuente de luz externa y dirigiendo la luz por medio de un dispositivo conveniente al lugar sometido a la observación; es la endoscopia con luz exterior; o introduciendo la fuente luminosa en la cavidad; es la endoscopia con luz interior.

El problema que se plantea es análogo en suma, a aquel con que se tropieza cuando se quiere mirar en el fondo de una llave: la dificultad está en iluminar el fondo de esta llave y de mirar allí dentro al mismo tiempo, es decir, en no colocar la cabeza entre la fuente luminosa y la llave para no proyectar sombra, ni la luz entre la llave y el ojo, para no ser deslumbrado.

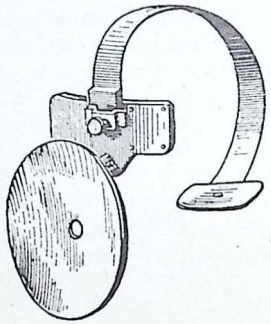


Fig. 403

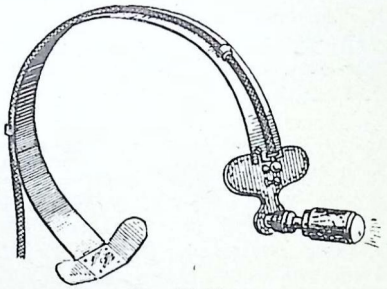


Fig. 403 bis

En los casos más sencillos, cuando se quiere mirar el fondo de la garganta, del conducto auditivo o del ojo, se coloca una luz al lado de la persona que se ha de examinar, después por medio de un espejo sostenido con la mano o sujeto a la frente, se dirige la luz venida de la lámpara en la dirección del objeto que se ha de examinar. Al mismo tiempo, se mira a través de un agujero que tiene el espejo (fig. 403). La figura 403 representa un espejo de esta clase que se pueda sostener en su sitio mediante un resorte que lo sujeta a la cabeza. En la figura 403 bis, está reemp'azado el espejo por una pequeña lámpara eléctrica que envía la luz en la dirección conveniente.

Para el ojo y el conducto auditivo externo, el espejo perforado basta para el alumbrado, se puede así ver directamente la región que se ha de examinar; no ocurre lo mismo en el caso de la laringe, que se encuentra oculta detrás de la base de la lengua. Se emplea entonces un artificio bien conocido:

se introduce en la boca un pequeño espejo sostenido por un tallo metálico y se proyecta la luz que él recibe en buena dirección, lo que es fácil de conseguir. Al mismo tiempo, se mira la imagen de la glotis en este pequeño espejo, como lo representa la figura 404.

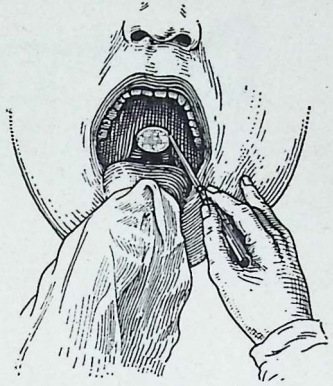


Fig. 404

Si se trata de examinar el interior del esófago, del estómago o de la vejiga, la cosa es más delicada, y sobre todo para este último órgano la endoscopia ha progresado considerablemente en estos últimos años.

El uretroscopio de Désormeaux (fig. 405) se componía de una sonda *S* en la que se colocaba una montura que llevaba la lámpara *L*, cuya luz, reflejada sobre el espejo *m*, suministraba el alumbrado. La observación se hacía, ya directamente a través del agujero del espejo, ya mediante un pequeño anteojo de Galileo que se podía adaptar detrás de este agujero. Este

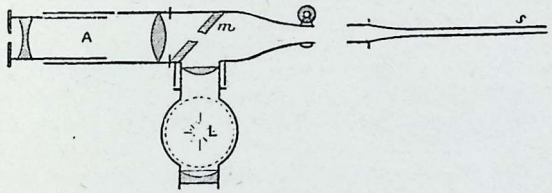


Fig 405

instrumento ha sufrido diversos perfeccionamientos de detalle, pero, en general se prefiere hoy día utilizar los cistoscopios de luz interior. El tipo de estos instrumentos es el de Nitze (fig. 406). El extremo de la sonda lleva una pequeña lámpara eléctrica que, por una abertura lateral, ilumina la

región que se desea examinar. Esta misma región se ve por el tubo del instrumento, gracias a un sistema óptico compuesto de lentes y de un prisma de reflexión total. Las observaciones

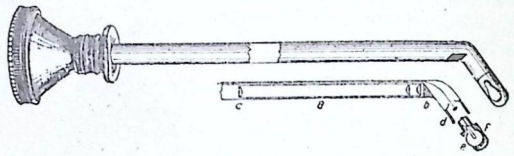


Fig. 406

se hacen distendiendo ligeramente las paredes de la vejiga mediante la introducción de un líquido transparente, y empleando cistoscopios de diferente curvatura, según la región que se

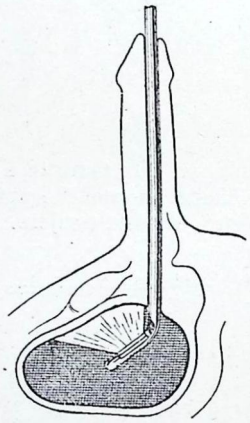


Fig. 407

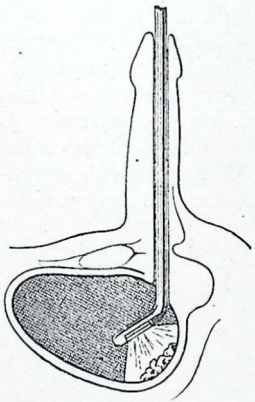


Fig. 407 bis

haya de explorar. Así, las figuras 407 y 407 bis, representan los cistoscopios de Leiter, para la observación de la región anterior o de la región posterior de la vejiga.

El sistema óptico de los cistoscopios de luz interior ha sido modificado por diversos cirujanos, pero todos estos instrumentos se fundan en los mismos principios. Se les puede proveer, en su extremidad, de aparatos, asas galvánicas, pinzas, etcétera, que permiten practicar algunas pequeñas operaciones sin recurrir a la talla.

XIII. — **Lupas**

Cuando deseamos ver los detalles de un objeto lo aproximamos al ojo lo más posible con el fin de aumentar la magnitud de las imágenes retinianas. Pero es sabido que llega un momento en que estando la acomodación en su máximum no se puede continuar esta aproximación sin que pierdan

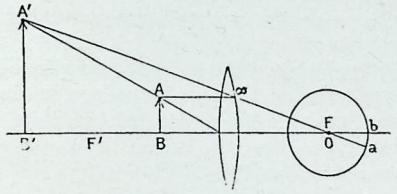


Fig. 408

su limpieza las imágenes retinianas. Se utiliza entonces una lupa, cuyo fin es, por consiguiente, proporcionar imágenes retinianas claras más grandes que las que se pueden obtener en las mejores condiciones de visión a simple vista.

La lupa más sencilla consiste en una lente convergente que se coloca cerca del ojo, estando situado el objeto que se quiere examinar entre la lente y el foco. En este caso, siendo AB el objeto, su imagen es $A'B'$. Esta imagen es directa, y es la que el ojo ve. Para tener la imagen retiniana A' basta unir A' al centro óptico O del ojo y prolongar esta recta hasta la retina.

Aquí hay que hacer una advertencia importante. Para encontrar la imagen del punto A, se traza una recta $A\alpha$ paralela al eje de la lente. Después de la refracción, esta recta se convierte en αF, que pasa por el foco. La imagen A' de A estará en parte sobre $F\alpha$. Si el centro óptico del ojo coincide con el foco F (fig. 408) la recta que une A' al centro óptico del ojo

será así precisamente αF. Ahora bien; cuando AB se desplaza, aproximándose o alejándose de la lente, el rayo $A\alpha$ no cambia, αF es, por consiguiente, siempre la misma, cualquiera que sea la posición de AB con relación a la lente y, por consiguiente, cualquiera que sea la posición de la imagen $A'B'$, la imagen retiniana ab será de tamaño constante. En estas condiciones, poco importa que se acomode o no, se sacará siempre la misma ventaja de la lupa.

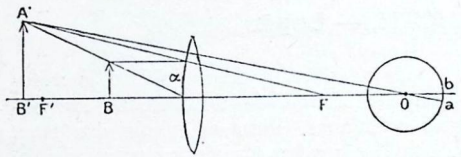


Fig. 409

Pero si el centro óptico del ojo está más alejado de la lente que el foco F (fig. 409), se ve, repitiendo el mismo razonamiento que, uniendo $A'O$ para obtener la imagen retiniana a, ab será tanto más grande cuanto más se aleje de la lente hacia la izquierda $A'B'$. El ojo observador tiene, pues, interés en relajar su acomodación lo más posible y, para que la imagen se aleje, se deberá también alejar el objeto AB de la lente. En el caso de un ojo emétrope, será conveniente que $A'B'$ se encuentre en el infinito; se observa entonces, colocando AB en el foco F' de la lente.

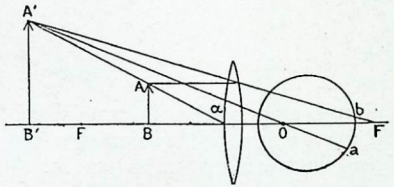


Fig. 410

Por último, si el centro óptico del ojo está más próximo a la lente que el foco F (fig. 410) se ve inmediatamente que la imagen retiniana ab será tanto más grande cuanto más cerca de la lente está $A'B'$.

En este caso, conviene observar, con el máximum de acomodación y aproximar el objeto a la lente hasta que la imagen se forme en el *punctum proximum*.

Resulta de lo que antecede que, con las lupas de gran distancia focal, estando el centro óptico del ojo generalmente delante del foco, es conveniente, para tener la imagen lo mayor posible, observar con el máximum de acomodación. Por el contrario, con las lupas de corta distancia focal, el centro óptico del ojo está detrás del foco, y se ve en las mejores condiciones posibles relajando su acomodación.

Cuando no se tiene necesidad de una gran amplificación, la lupa formada de una simple lente basta, en general, pero a medida que se toman aumentos cada vez mayores se ven aparecer una serie de defectos o aberraciones, que perjudican a la buena calidad de las imágenes y que es preciso eliminar.

En primer lugar, nos encontramos las aberraciones de esfericidad. Sabido es que cuando tiene lugar la refracción a través de una superficie esférica, la imagen de un punto no es rigurosamente un punto. Los rayos que se refractan sobre los bordes no van a concurrir al mismo punto que los que pasan por el centro. A medida que nos alejamos del eje, este error se hace cada vez más importante, y esto, claro está, con tanta mayor rapidez cuanta mayor es la curvatura de las superficies refringentes. Cuando se emplean lentes de grande aumento, es preciso, pues, so pena de tener malas imágenes, limitarse a la refracción producida por el centro solamente de estas lentes, lo que causa una gran pérdida de luz. Pero la experiencia y la teoría enseñan que se puede sortear la dificultad asociando convenientemente muchas lentes unas detrás de otras. Esta asociación varía según los modelos, y estaría fuera de lugar hacer aquí un estudio teórico.

En segundo lugar, tenemos las aberraciones cromáticas. No siendo la luz simple, como es sabido, y siendo desigualmente refractadas las diversas radiaciones que la componen, se tiene, cuando se forman imágenes por las lentes, focos, e imágenes diferentes para cada una de las radiaciones. Estas imágenes no se superponen, en general, o, por lo menos, no lo hacen más que de una manera muy imperfecta, de lo que resultan sobre sus bordes fenómenos de coloración que alteran su limpieza. Basta, para darse cuenta de este hecho, mirar, con una gran lente convergente, empleándola como lupa, la imagen de un dibujo negro sobre fondo blanco. Según la posición de la lente con relación a este objeto, se ve que se

producen, alrededor de la imagen de cada trazo, irisaciones de color azul y amarillo anaranjado.

Este defecto se consigue compensarlo también por combinaciones de lentes, y así se fabrican lo que se llaman lupas acromáticas; todos los buenos instrumentos deben estar así corregidos.

Por último, hay aberraciones de forma merced a las que la imagen no es semejante al objeto. Mirando a la lupa una figura plana, la imagen no es plana; no se tiene enfocado si-

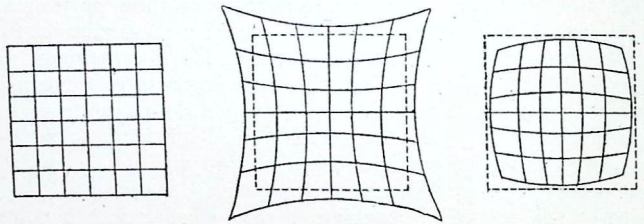


Fig. 411

multáneamente el centro y la periferia de la imagen. Y lo que es más grave, la imagen está deformada en el plano. Si, por ejemplo, se mira un cuadrado cuadriculado (fig. 411, I), se tiene ya el aspecto II llamado deformación en reloj de arena, ya el aspecto III llamado deformación en barrilete. Esta clase de aberración, que lleva el nombre de distorsión, es una de las más difíciles de corregir; para reducirla al mínimum se asocian varias lentes, como se hace para suprimir las otras aberraciones.

Diversos modelos de lupas. — Se pueden dividir las lupas en lupas simples y lupas compuestas, según estén fabricadas con una o muchas lentes destinadas a la compensación de las aberraciones.

Entre las lupas simples señalaremos en primer lugar la lupa de Wollaston (fig. 412), que está compuesta de dos lentes planoconvexas, que no constituyen en realidad más que una sola lente. Entre estas dos lentes se encuentra un dia-

fragma perforado destinado a eliminar todos los rayos inmediatos a los bordes y a reducir así las aberraciones. Se puede de este modo llegar a observar en condiciones pasables, hasta con lupas que forman una pequeña esfera.

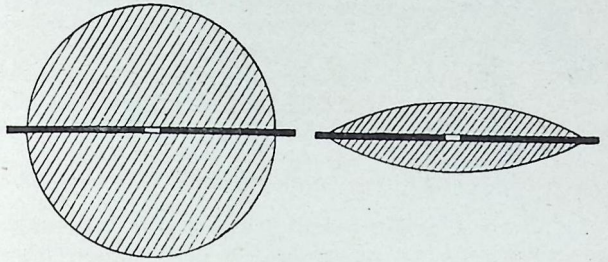


Fig. 412

La lupa de Brewster no se distingue (fig. 413) de la de Wollaston más que en que está tallada en una sola pieza.

Por último, la lupa de Stanhope es un pequeño cilindro de cristal terminado, por una parte, en una superficie esférica, y

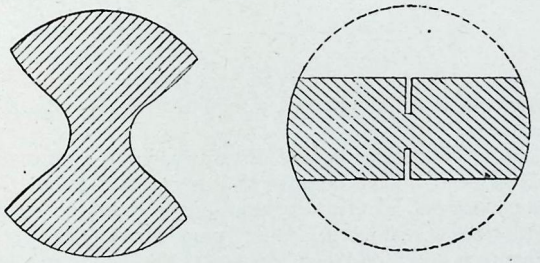


Fig. 413

por otra en un plano contra el que se adosa el objeto que se desea examinar. En este caso, se observa, en realidad, a través de un dioptro.

Entre las lupas compuestas citaremos el doblete de Wollaston (fig. 415) constituído por dos lentes planoconvexas

dispuestas de manera que las partes planas miren al objeto y el ojo observador se encuentre del lado de la convexidad. Se puede, a voluntad, hacer variar la distancia entre las dos lentes por medio de un movimiento de tornillo, para que el observador pueda graduárselo para su vista.

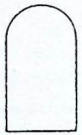


Fig. 414

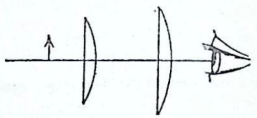


Fig. 415

La lupa de Chevalier o de Brücke (fig. 416) está también muy generalizada. Es, en realidad, un anteojo de Galileo, es decir, que está compuesta de un objetivo, lente convergente y de un ocular, lente divergente. Se puede, a voluntad, hacer variar la distancia del objetivo para modificar el aumento del instrumento.

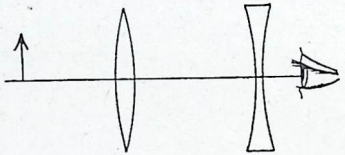


Fig. 416

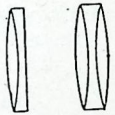


Fig. 417

Una de las ventajas de este dispositivo es su gran distancia frontal es decir, distancia entre el objeto y el objetivo, lo que permite observar, al mismo tiempo que se practican sobre los objetos ciertas maniobras, tales como direcciones, etc.

Hagamos notar que, con frecuencia, las lentes que entran en la composición de las lupas, tanto simples como compuestas, están constituídas en realidad por dos o tres lentes unidas por bálsamo (fig. 417). Hay, por ejemplo, una lente divergente de un cristal determinado con una o dos lentes convergentes de otra clase de cristal. Es el procedimiento con más frecuencia empleado para eliminar las aberraciones cromáticas.

Para evitar el tener que sostener las lupas con la mano,

para poder, por ejemplo, disecar bajo una lupa, es preciso mantenerla en un soporte. Con este fin, se han imaginado diversos dispositivos; el que hoy día está más generalizado es el representado en la figura 418, o es una variante de este modelo. Mediante un movimiento de cremallera, se puede enfocar el objeto colocado sobre una platina, las dos aletas laterales permiten apoyar las manos durante el trabajo de disección.

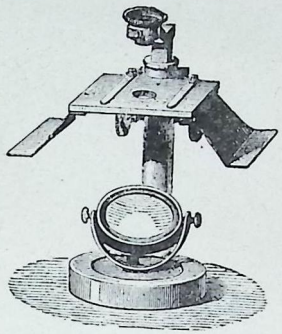


Fig. 418

Las lupas de que nos acabamos de ocupar tienen el inconveniente de no utilizar más que la visión monocular, por lo que el relieve de los objetos es imperfectamente percibido. Es conveniente con frecuencia emplear lupas binoculares. Para los pequeños aumentos, la lupa de Berger da muy buenos resultados (fig. 419). Está constituída por dos lentes convenientemente inclinadas y descentradas.

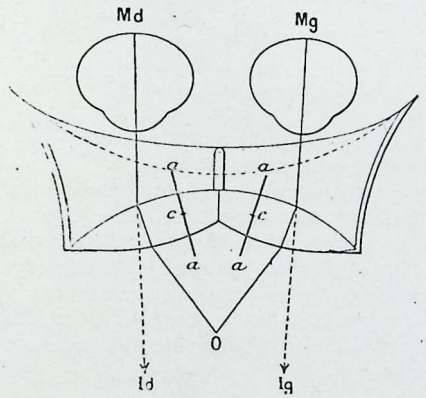


Fig. 419

Este descentramiento permite fusionar más fácilmente las imágenes. El conjunto de las dos lentes está sujeto por una montura de ebonita, sostenida delante de los ojos por una cinta

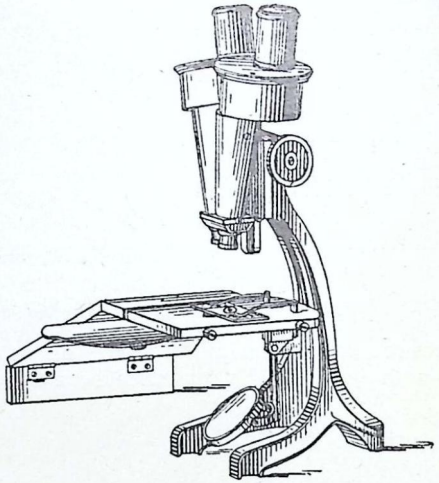


Fig. 420. — Lupa binocular Zeiss

que rodea la cabeza o por un resorte análogo al de los espejos frontales empleados en laringoscopia.

Para los grandes aumentos, se está obligado a recurrir a las lupas binoculares del modelo Zeiss, por ejemplo.

Estas lupas están constituídas por verdaderos microscopios provistos, entre el objetivo y el ocular, de un sistema de prismas enderezadores de las imágenes; recuérdese que con un microscopio ordinario se tienen imágenes invertidas. Se puede variar el aumento cambiando los objetivos montados sobre un soporte común.

XIV. — **Microscopios**

Cuando la amplificación obtenida por las lupas no es suficiente, se recurre al microscopio. Este instrumento es una com-

binación de lentes que dan una imagen invertida de los objetos examinados y cuyo aumento puede ser muy grande. En vista de su importancia, nos detendremos un poco en su descripción.

El microscopio se compone esencialmente de un objetivo que supondremos provisionalmente que es una simple lente convergente, y de un ocular que reduciremos también a una lente convergente.

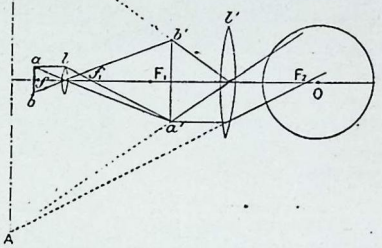


Fig. 421

El objeto *ab* (figura 421) que ha de ser examinado está colocado más allá del foco *f* del objetivo, y forma una imagen real e invertida *a'b'*, que se puede ver directamente colocando el ojo en *O* y acomodando para el plano *a'b'*, pero que se observa más generalmente con la lente ocular *l'* formando lupa y dando una imagen virtual *AB*, que es la que mira el ojo.

Es bueno que nos demos cuenta de la marcha de un haz luminoso que parte de un punto cualquiera del objeto *a*, por ejemplo (fig. 422). Todos los rayos que parten de *a* y que serán utilizados, forman un haz cónico que tiene su vértice en *a* y su base en la lente *l*; después de refractados, estos rayos convergerán en *a'*, se entrecruzarán allí y caerán sobre la lente *l'*. Allí se refractarán de nuevo y la atravesarán, formando un haz cónico divergente cuyo vértice estaría en *A* si se prolongasen los rayos hacia la izquierda. Estos rayos no pasan por *A*, pero para el ojo colocado en *O* parece que vienen de allí; por esto se llama *A* una imagen virtual.

Se ve fácilmente en la figura 422 que, para un punto del objeto muy próximo al eje, el haz luminoso penetrando en el objetivo *l* cae por completo en el ocular *l'*, atraviesa el microscopio y puede llegar al ojo. Pero si el punto *a* se aleja cada

vez más del eje, lateralmente, llega un momento en que el haz luminoso, después de haberse entrecruzado en a', no caerá por completo en el objetivo, será detenido en parte y tendrá un déficit tanto mayor cuanto más se aparte el punto a del eje.

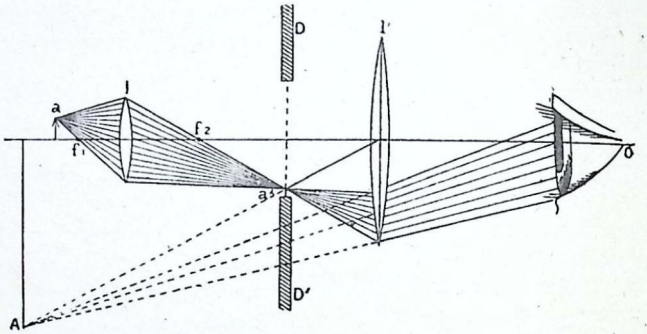


Fig. 422

Resulta de ello que el centro de la imagen parece muy luminoso, pero que, a partir de cierta distancia de esta imagen, se obscurece gradualmente. Se evita esto, y se obtiene un campo de iluminación uniforme colocando en el plano DD', en donde se forme la imagen real producida por el objetivo, un diafragma circular que no deje pasar más que el haz que cae por completo en la lente ocular.

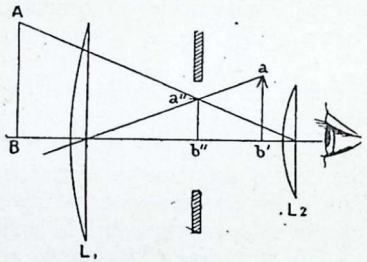


Fig. 423

Oculares. — En todos los microscopios actualmente en uso, el ocular no es simple. Se adopta, generalmente, la combinación llamada de Huyghens, compuesta de lentes planoconvexas, estando la convexidad vuelta del lado de donde viene la luz. La primera lente, L_1 (fig. 423), está colocada delante del plano en donde debería formarse la imagen $a'b'$ suministrada por el objetivo. De ello resulta que esta imagen es transformada en otra imagen real $a''b''$, que es definitivamente mirada a la lupa a través L_2, dando la imagen virtual AB. El diáfragma se coloca entonces en el plano $a''b''$. La lente L_1 lleva el nombre de lente de campo.

La elección del ocular de Huyghens está basada en la consideración que es él el que mejor permite corregir las aberraciones que hemos señalado a propósito de la lupa, y que podrían ser muy importantes con los grandes aumentos a que se llega con el microscopio.

Objetivos. — Los objetivos también son compuestos; están formados por un número mayor o menor de lentes, hasta seis y aún más. Por ejemplo, un objetivo podrá comprender tres lentes planoconvexas L_1, L_2, L_3, colocadas unas a continuación de otras. Cada una de ellas con el fin de corregir las aberraciones cromáticas, estará compuesta de dos lentes de substancias diferentes unidas con bálsamo, una de ellas será planocóncava, la otra biconvexa.

Prescindiendo de la cuestión de aumentos, los objetivos pueden dividirse en dos grandes clases: los objetivos a seco y los objetivos de inmersión; para comprender la utilidad de estos últimos, es preciso que antes entremos en algunos detalles referentes a la manera de cómo están hechas las preparaciones de los objetos que se quieren examinar.

Preparación. — Los objetos que se miran al microscopio deben siempre ser muy pequeños, y salvo excepción, se les observa por transparencia. Con este fin están colocados sobre una lámina de cristal llamada portaobjeto o sencillamente lámina, que descansa sobre una platina horizontal. El eje del microscopio es vertical, perpendicular a la platina, estando el objetivo dirigido hacia abajo, la iluminación se realiza por medio de un espejo dispuesto debajo de la platina que proyecta de abajo arriba la luz natural o artificial.

Se enfoca la preparación elevando o descendiendo el cuerpo del microscopio por medio de deslizamiento de frotamiento suave en un anillo o de una cremallera para la primera aproximación, y acabando la operación con un tornillo micrométrico.

Para poder de esta manera ser observado por transparencia, el objeto debe tener muy poco espesor; consistirá, pues, en un corte muy delgado de un tejido o en un pequeño fragmento disociado de manera que estén separados sus elementos. Con mucha frecuencia se emplearán materias colorantes, acerca de las que nada hemos de decir en este sitio, para diferenciar ciertas partes de la preparación que toman el color, de otras que no lo toman o no lo toman tan bien. Este corte o este fragmento de tejido disociado no está sin revestir sobre el portaobjetos, sino que se le sumerge en un líquido apropiado y se cubre con un cubreobjetos o laminilla. Esta práctica sirve para substraer la preparación a la desecación, al polvo y a alteraciones diversas, pero además tiene un fin de orden óptico. Basta, para convencerse, mirar un objeto pequeño, un filamento de algodón, por ejemplo, sucesivamente a seco o inmergido en un líquido: en el primer caso no se notan ninguno de los detalles, que aparecen con una gran precisión cuando se mira el filamento en el líquido; en el aire, el pequeño cuerpo parece opaco; no lo es en el líquido. Este hecho es fácil de comprender. Cuando la luz atraviesa un cuerpo poroso, como un filamento de algodón, este filamento contiene aire, la luz pasa por una serie de capas de aire y de materia sólida, resulta una serie de reflexiones y de refracciones que dan lugar a pérdidas de luz y a cambios de dirección. Este efecto será tanto menor cuanto más se aproxime al suyo propio el índice de refracción del medio en que esté sumergido. Una experiencia muy sencilla pone bien en evidencia este hecho. Coloquemos en un frasco una varilla de cristal haciéndola pasar a través de un agujero del tapón que la sostendrá. Si el frasco no contiene más que aire, y se mira el vástago, sobre un fondo blanco, será muy visible, y hasta parecerá negro sobre sus bordes. Introduzcamos agua, parecerá más transparente, tendiendo a desaparecer las zonas negras de los bordes. Si reemplazamos el agua por bálsamo del Canadá, cuyo índice de refracción es muy próximo al del cristal, apenas se podrá percibir la varilla. Concíbese que un manojo de semejantes varillas parecerá muy opaco en el aire, pero se hará cada vez más transparente a medida que se sumerja en líquidos cuyo índice se aproxime cada vez más al suyo. El

mismo fenómeno se produce para cualquier cuerpo; un filamento de algodón, por ejemplo, o un fragmento de tejido del organismo. En algunos líquidos estos cuerpos se harán completamente transparentes y, para percibirlos, será necesario recurrir a la coloración; si esta coloración está bien hecha, se está en excelentes condiciones para ver todos los detalles del cuerpo. Ahora se concibe la importancia que tiene la elección del líquido que sirve para incluir las preparaciones. Según que se incluya en el agua, en la glicerina, más refringente que el agua, o el bálsamo, se obtendrán efectos diferentes y la ne-

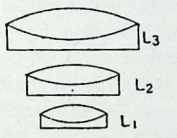


Fig. 424

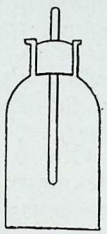


Fig. 425

Fig. 426

Fig. 427

cesidad de una buena coloración se dejará sentir tanto más cuanto más se aproxime al de los tejidos el índice de refracción del líquido. Se pueden observar los tejidos del organismo sin coloración, en el agua o en el agua salada; en la glicerina se tendrá más transparencia, pero ciertos detalles se escaparán si no se colora; por último, en el bálsamo, se tendrá una transparencia admirable, pero es preciso emplear excelentes procedimientos de coloración. Más adelante veremos que el empleo, para la inclusión, de líquidos de índice de refracción elevado tiene, además, otro fin.

Tomemos ahora cualquier preparación y examinémosla con un objetivo a seco. Los detalles que podemos distinguir no dependen únicamente del aumento del microscopio y particularmente del objetivo empleado; nos encontramos limitados, en esta percepción de detalles por lo que se denomina ángulo de abertura. Tomemos como objeto tipo una serie de pequeños puntos o pequeñas líneas paralelas (fig. 426), con el fin de dis-

tinguir unos de otros por medio del microscopio. Si cada uno de estos puntos diese como imagen un punto matemático, bastaría buscar un aumento suficiente para que el intervalo entre dos puntos pudiese ser apreciado por el ojo. Pero no ocurre así. Está demostrado que, sea la que fuere la percepción del microscopio empleado, la imagen de un punto es una pequeña mancha rodeada de uno o dos pequeños círculos alternativamente obscuros y luminosos (fig. 427), que van degradándose poco a poco en cuanto a intensidad. Este es un hecho ligado a la constitución de la luz, del que no nos podemos desembarazar; se dice que la imagen del punto está rodeada de círculos de difracción. Si estos círculos son demasiado grandes con relación a la distancia de las dos imágenes puntiformes, hay confusión entre estas dos imágenes; se ve una sola en lugar de dos. Ahora bien; la dimensión de los círculos de difracción está ligada a lo que se denomina ángulo de abertura del objetivo, definido del modo siguiente. Sea *O* un punto situado en el eje óptico del microscopio sometido al examen (fig. 428). Desde *O* tracemos un rayo hasta el borde de la primera lente del objetivo llamada lente frontal, α es el ángulo de abertura. Cuanto mayor es este ángulo α, menores son los círculos de difracción, y mejor separadas unas de otras estarán las imágenes de puntos próximos. Este ángulo α es el que limita la utilidad que se puede sacar de un objetivo. Le corresponde cierta separación de los puntos o de las líneas paralelas, por debajo de la cual hay forzosamente confusión, mezclándose unos con otros los círculos de difracción.

Consideremos ahora un objetivo que tenga un ángulo de abertura α determinado; ¿tendremos interés, en igualdad de ángulo α, en aumentar indefinidamente el aumento? Evidentemente no; cuando el aumento sea suficiente para distinguir con claridad los más finos detalles separables por el objetivo de ángulo α, no habrá ninguna ventaja en aumentar. Es como si se preguntase, para una persona de vista normal, la dimensión de los tipos de imprenta de los diarios: es evidente que se los podría hacer dobles o décuples, pero no se leería entonces mejor de lo que se podría leer con los tipos ordinarios.

Es, pues, el ángulo de abertura el que limita el aumento útil; por lo tanto, es evidente que este ángulo se puede aumentar indefinidamente, no puede alcanzar 90°; por consiguiente, hay un límite en el aumento deseable de los objetivos a seco. Este límite es alcanzado, y hasta superado, por la mayor parte de los constructores. Buscando aumentos cada vez mayores, se aumentarían las dificultades, ya muy grandes, para la supresión de las aberraciones y no se verían detalles. Desde el punto de vista práctico, se comprende que en la compra de un

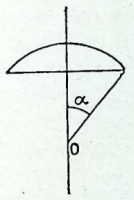


Fig. 428

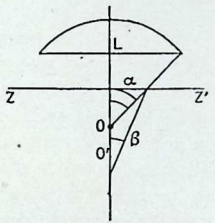


Fig. 429

Fig. 430

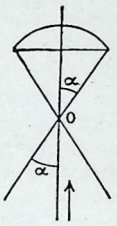


Fig. 431

objetivo no hay que dejarse seducir únicamente por el aumento, sino dar la preferencia a los objetivos de gran abertura.

En la descripción precedente se ha supuesto que el objeto mirado estaba colocado en el aire; ¿qué ocurre cuando se observa una preparación? En el aire se estaba enfocado en *O* (fig. 429), y el ángulo formado por el último rayo útil con el eje era α. Si suponemos el objeto cubierto por una laminilla cuya cara superior es *ZZ'*, y el líquido de inclusión del mismo índice de la laminilla, se ve que, mirando *O* supuesto en el aire, se está enfocado en *O'* de la preparación, puesto que el último rayo útil forma con el eje el ángulo β y se refracta a la salida de la laminilla separándose de la normal. La distancia frontal, distancia del objeto a la primera lente, *OL*, ha aumentado, se ha convertido en *O'L*. El ángulo α, correspondiente al rayo extremo que entra en el microscopio, no ha cambiado, y la finura de los detalles que es posible ver es la misma.

Supongamos ahora que se introducen entre la parte superior de la laminilla y la lente frontal un líquido. Si este líquido tiene el mismo índice de refracción que la laminilla, los rayos luminosos se propagarán en línea recta desde el punto observado hasta la lente frontal, como tenía lugar en el aire (fig. 430); se tiene entonces lo que se llama un objetivo de inmersión. Los detalles que se pueden percibir con semejante objetivo son también tanto más finos cuanto mayor es el ángulo α; pero su dimensión disminuye cuando el índice de refracción del líquido que precede a la lente frontal aumenta. Supongamos, por ejemplo, que este índice de refracción sea 1,5, los detalles perceptibles serán 1,5 veces más pequeños que si se observase con la misma abertura α y un objetivo a seco. Si el líquido de inmersión tiene un índice de refracción inferior al de la laminilla e igual a n, al salir del cubreobjetos tiene una refracción análoga a la que tiene lugar con los objetivos a seco, pero los detalles son n veces más pequeños que en el caso de la observación a seco.

Es, pues, interesante, para la observación de los detalles muy finos, interponer, entre la lente frontal y la laminilla, líquidos de inmersión de gran índice; para ello, es preciso que los objetivos estén especialmente construídos y corregidos de sus aberraciones con este fin. Pero, para conseguir de ellos todo lo posible, son necesarias otras condiciones.

En primer lugar, el medio en que se hace la inclusión de la preparación debe tener un índice de refracción por lo menos igual al del líquido de inmersión colocado por encima de la laminilla. Tan es así, que los objetivos llamados de inmersión homogénea, es decir, para los que el líquido de inmersión, aceite de cedro, tiene el mismo índice que el cubreobjetos, no dan todo su efecto más que para las preparaciones incluídas en el bálsamo del Canadá.

En segundo lugar, la iluminación de la preparación debe hacerse con rayos convergentes cuyo rayo extremo forme con el eje del microscopio un ángulo por lo menos igual a α. Como es sabido, la luz está generalmente dirigida de bajo o arriba, a través de la preparación, sirviéndose de un espejo convergente. Para que un objetivo de inmersión de ángulo de abertura α dé todo su efecto, los rayos lumínicos de iluminación deben llegar al objeto examinado O formando un cono de abertura por lo menos igual a α. Como este ángulo α puede ser muy considerable, el simple espejo convergente no basta y se utiliza, en tal caso, un concentrador cuyo modelo más perfecto es el de Abbe (fig. 432). Se compone de dos o tres lentes convergentes muy potentes, desembarazadas en gran parte de su aberración cromática por asociación con lentes di-

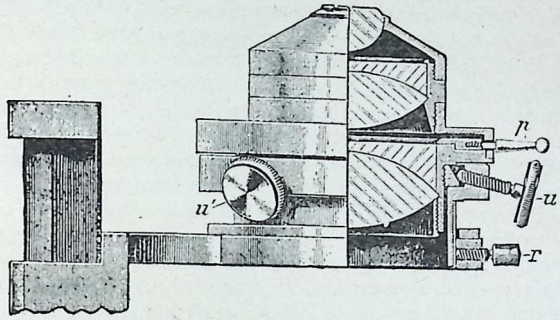


Fig. 432

vergentes, de las que la superior es planoconvexa, con el plano dirigido hacia arriba. La luz debe estar proyectada por un *espejo plano* de bajo arriba y formar a la salida un cono muy convergente hacia cuyo vértice se colocará el objeto que hay que observar. Para que no se produzca refracción y reflexión entre la última lente del concentrador de Abbe y el portaobjetos, se puede colocar una gota de líquido entre estas dos superficies para suprimir la capa de aire que allí habría; *por no tomar esta precaución, que se descuida con mucha frecuencia, el rendimiento del microscopio es defectuoso.*

Hay, además, un punto sobre el que interesa llamar la atención: es la influencia ejercida por el espesor de la laminilla. En el caso del objetivo de inmersión homogénea, esta influencia es nula, puesto que el líquido interpuesto entre la laminilla y la lente frontal tiene el mismo índice de refracción que la

laminilla, y todo ocurre como si el objeto estuviese sumergido en este líquido de inmersión. Pero tomemos el objetivo a seco: sabido es que, para tener una hermosa imagen, es preciso que este objetivo esté corregido de las diversas aberraciones; ahora bien, estas correcciones dependen del espesor del cubreobjetos, a cada objetivo corresponde un espesor para obtener buenas imágenes. En el comercio se encuentran modelos graduados que permiten hacer la determinación de este espesor más favorable. Se componen esencialmente de una lámina de cristal sobre la que se ha pegado con bálsamo una serie de laminillas de espesor determinado. Cada una de estas laminillas está plateada en su parte inferior, y sobre esta capa plateada se han trazado líneas quitando la capa de metal. Se observan estos testigos al microscopio y se busca para cada objetivo la laminilla a cuyo través se ven las líneas con más claridad, sin aberraciones sobre sus bordes. Así se ha determinado la mejor laminilla que corresponde al objetivo. Hecho esto mediante un compás de gruesos o con un calibre especialmente construído para ello, se miden las laminillas de las cajas que se compran en el comercio y se les clasifica por espesores. El día en que se desea hacer una preparación perfecta, destinada a ser observada con un objetivo ya conocido, se toma una laminilla correspondiente a la mejor corrección de este objetivo.

Lo que acabamos de decir para los objetivos a seco es también verdad para los objetivos de inmersión en el agua. Se puede sortear la dificultad que resulta de los diversos espesores de la laminilla recurriendo a los objetivos de corrección. Estos objetivos están provistos de un anillo que, girando, produce un desplazamiento, según el eje, de una de las lentes del objetivo; según la posición de esta lente, el objetivo está corregido para diferentes espesores de laminilla. Cuando se utilice, pues, este objetivo, será preciso, haciendo girar el anillo, buscar por un tanteo la posición que hay que darle para obtener la mejor imagen. Este anillo lleva, además, una graduación que indica la posición que hay que darle para los diversos espesores de la laminilla. Si se conoce el cubreobjetos de una preparación, la corrección se hará, pues, inmediatamente.

Medidas hechas en la preparación. — Para determinar, por medio del microscopio, la magnitud de un objeto, se puede utilizar un ocular micrométrico o la cámara clara.

El ocular micrométrico no difiere de los demás oculares más que por la presencia, en el plano del diafragma, de una escala micrométrica en cristal. De ello resulta que, observando un objeto pequeño, se ve simultáneamente la imagen del objeto y el micrómetro, y se puede, por consiguiente, contar el número de divisiones de este micrómetro que corresponden a la magnitud que hay que medir. Si se sabe a qué valor métrico corresponde cada división para el objetivo que se utiliza, se deduce el valor de la magnitud estudiada. Para ello, de una vez para siempre, se observa con este objetivo, un pequeño micrómetro objetivo que se coloca en lugar de la preparación; este pequeño micrómetro estará, por ejemplo, dividido en centésimas de milímetro y, observando con el ocular micrométrico, se contará a cuántas centésimas de milímetro corresponde una división del micrómetro ocular.

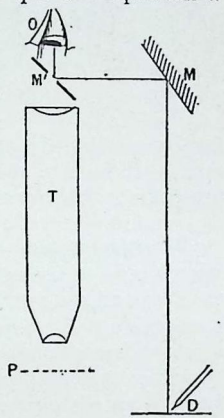


Fig. 433

Otro procedimiento consiste en dibujar con la cámara clara el objeto que se quiere reproducir, junto a un micrómetro reproducido a la misma escala. He aquí cómo están construídas estas cámaras claras. Consideremos el tubo del microscopio T (fig. 433) provisto de su objetivo y de su ocular; se observa la preparación P colocando el ojo en O. Pongamos sobre la mesa, al lado del microscopio, un papel sobre el que se ejecutará el dibujo D. La luz procedente del papel se reflejará sobre un primer espejo inclinado M, después sobre otro espejo M' y llegará al ojo. Si el espejo M' está perforado se podrá ver simultáneamente la preparación P a través de este agujero y del microscopio, y por una doble reflexión, el papel D sobre el que se dibuja. En general, en lugar de emplear dos espejos se utilizan prismas de reflexión total que dan mejores imágenes que el espejo, y que no se empañan (fig. 434).

Por último, con frecuencia se reunen los dos prismas de reflexión total en uno solo; de esta manera están hechas la mayor parte de las cámaras claras del comercio (fig. 435).

Claro está que el prisma colocado debajo del ojo debe estar perforado o tener una porción que constituya una lámina de caras paralelas, para que permita la observación directa de la preparación.

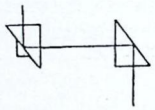


Fig. 434

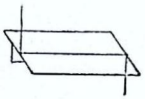


Fig. 435

Con ayuda de la cámara clara se puede reproducir en el papel un dibujo de la preparación estudiada. Basta después, para poder practicar las medidas, reemplazar la preparación por un micrómetro que se dibuja en las mismas condiciones y añadir así al dibujo una pequeña escala representando fracciones de milímetro.

Ultramicroscopio. — Cuando se observa una preparación al microscopio se proyecta habitualmente la luz de abajo arriba en el eje mismo del instrumento. El campo aparece así muy iluminado, y los objetos, para ser vistos, deben destacarse sobre el fondo luminoso, ya por su opacidad, ya por su coloración. Los organismos pequeños, células, bacterias, etc., no pueden ser observados en el estado vivo, pero se les llega a ver mediante el siguiente artificio. En lugar de iluminar la preparación de abajo arriba, se dirige la luz horizontalmente, de manera que resulte perpendicular al eje del microscopio, cuyo campo queda obscuro. Si, no obstante, la luz encuentra un objeto capaz de difundirla, este objeto se ilumina y se hace visible. Supongamos, por ejemplo, que se tienen células en suspensión en un líquido perfectamente transparente, la luz lo atraviesa sin iluminarlo, todo ocurre como cuando un rayo solar pasa por un aire perfectamente desprovisto de polvo, el rayo solar no hace el aire luminoso, y un espectador colocado lateralmente no tiene, en manera alguna, conocimiento del paso del rayo. Pero si en este aire se encuentran pequeñas partículas, polvo fino, se iluminan y se les ve aunque no se reciba directamente el haz de luz.

Este mismo fenómeno es el que se produce en la visión llamada ultramicroscópica: no se ven los objetos opacos o coloreados sobre fondo claro, sino que se les observa iluminados y luminosos sobre fondo negro. Así se pueden observar los infinitamente pequeños en estado vivo, sin preparación previa de ninguna clase. Conocidos son los servicios que presta actualmente este método para establecer ciertos diagnósticos dudosos.

No es este lugar de describir la manera cómo está dispuesto el sistema de iluminación para la observación ultramicroscópica; se han imaginado muchos métodos y todos consisten, en principio, en proyectar un haz luminoso muy intenso, procedente de un pequeño arco eléctrico, o de una lámpara Nernst, en una dirección tal que la preparación esté intensamente iluminada sin que penetre la luz directamente en el microscopio.

Por lo demás, este método lleva equivocadamente el nombre de Ultramicroscopia; no se trata de ver cuerpos más pequeños que los que se ven por los métodos habituales, por lo menos en lo que se refiere a las aplicaciones médicas, sino verlos en otras condiciones. El nombre de Ultramicroscopia viene de que el método ha sido imaginado y es todavía utilizado para el estudio de partículas metálicas de dimensiones demasiado pequeñas para ser descubiertas por el microscopio ordinario, en particular para las investigaciones sobre los metales coloidales. En las aplicaciones biológicas no se trata de Ultramicroscopia, sino sencillamente de observaciones sobre fondo nergo.

Microscopio polarizador. — Con frecuencia interesa observar pequeños objetos a la luz polarizada, particularmente para ver si están dotados de la doble refracción. Se coloca en tal caso, en la montura inferior destinada al condensador Abbe, un polarizador constituído por un pequeño prisma de Nicol que es el que polarizará la luz que cae sobre la preparación. Por encima del ocular se coloca un segundo Nicol que desempeña el papel de analizador. Este analizador puede girar alrededor del eje del microscopio, de modo que se puede producir a voluntad la extinción o el paso de la luz como hemos

dicho en el parágrafo que trata de la polarización en general. El funcionamiento de esté aparato es absolutamente el mismo que el del dispositivo descrito con motivo de la polarización; únicamente se ha introducido entre el polarizador y el analizador un sistema óptico de aumento destinado a dar imágenes aumentadas de pequeños objetos.

SEXTA PARTE

ELECTRICIDAD

I. — Principios generales de la electricidad

Los cuerpos pueden estar, en estado llamado neutro, no manifestando ninguna propiedad eléctrica, o pueden estar electrizados. Como se enseña en los tratados elementales, los cuerpos, en tal caso, se dividen en cuerpos electrizados positivamente y cuerpos electrizados negativamente. Cualquiera que sea el concepto que se pueda tener acerca de la naturaleza de la electricidad, se puede considerar que todo ocurre como si estos fenómenos eléctricos fueran debidos a dos flúidos diferentes: la electricidad positiva y la electricidad negativa. La primera se desarrolla en una barra de cristal frotada con un trapo, la segunda en una barra de resina frotada con una piel de gato. Una y otra electricidad atraen los cuerpos ligeros. Cuando los cuerpos son conductores, se cargan en su superficie, en contacto del vidrio o de la resina frotados, de electricidad positiva o de electricidad negativa. Una vez cargados, se aprecia que son repelidos por los cuerpos que llevan la misma electricidad que ellos y, por el contrario, son vivamente atraídos por los cuerpos cargados de electricidad de especie contraria.

Todo ocurre como si los cuerpos en estado neutro contuviesen un flúido neutro descomponible en un flúido positivo y otro negativo. Estos dos flúidos, puestos en contacto, se combinan para dar, si están en la misma proporción, flúido neutro. Cada uno de estos flúidos, positivo o negativo, repele el flúido

del mismo nombre y atrae el flúido de nombre contrario; si un cuerpo está cargado positivamente, sufre una atracción de toda carga negativa y una repulsión de toda carga positiva. Cuando está cargado negativamente, ocurre lo contrario.

Cuando una carga A, positiva o negativa (pongamos positiva, para fijar las ideas), se encuentra próxima a un cuerpo conductor B en el estado neutro, el flúido neutro de este conductor es descompuesto *por influencia*, siendo atraída la electricidad negativa a las inmediaciones de A, lo más próximo posible. Entonces pueden ocurrir dos cosas. Si se aproximan mucho los cuerpos A y B (fig. 436) la carga positiva de A se combina con el flúido negativo inmediato con producción de una chispa y da flúido neutro. Después de alejado A, B queda cargado de flúido positivo. Si en lugar de aproximarlos tanto que estalla la chispa, se pone B en comunicación con el suelo, el flúido positivo repelido lo más lejos posible, corre a la tierra y, después de cortada la comunicación, el conductor queda cargado negativamente.

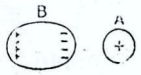


Fig. 436

Coulomb, que ha estudiado con gran cuidado las atracciones y repulsiones eléctricas, ha demostrado que las fuerzas en juego responden a las mismas leyes que la de la gravitación, es decir, que son proporcionales a las cantidades de electricidad y están en razón inversa del cuadrado de la distancia.

Un gran número de fenómenos eléctricos pueden interpretarse con esta hipótesis de los dos flúidos, y es muy cómoda para la mayor parte de las explicaciones.

Cualquiera que sea el concepto que se tenga de los fenómenos eléctricos, se aprecia que la electricidad se propaga de muy diferente manera a través de los cuerpos según su naturaleza. Si se tiene en la mano una varilla de cristal, se puede, sin inconveniente, introducir la extremidad de la misma en una llama hasta conseguir la fusión; si queremos repetir la experiencia con una varilla de cobre, no lo podemos conseguir, porque rápidamente nos vemos obligados a soltarla a consecuencia de la propagación del calor hasta los puntos de donde se tiene cogida. Lo mismo ocurre con la electricidad: ciertas substancias son llamadas aisladoras, es

decir, que la electricidad no se propaga por su intermedio; otras son denominadas buenas conductoras. En realidad, no existen dos clases distintas de cuerpos, unos aisladores y otros conductores; todos los intermediarios existen entre la plata, que parece el más favorable para la fácil propagación de la electricidad, y la parafina, que parece ser el que menos se presta a ello. Esta cuestión la examinaremos más de cerca. Era necesario recordar estos principios generales antes de pasar adelante para no tropezar a cada paso con explicaciones demasiado largas.

II. — Leyes y unidades eléctricas

Para comprender las leyes y unidades eléctricas, nos serviremos de comparaciones de los fenómenos eléctricos con otros diversos fenómenos.

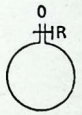


Fig. 437

En primer lugar, consideremos un matraz que comunica con la atmósfera por un orificio O. Si la llave R (fig. 437) está libremente abierta, la presión del aire en el interior del matraz es la misma que la de la atmósfera. Podemos disminuir y aumentar la presión en el matraz; el peso del gas que en él estará contenido será proporcional a la presión. Por otra parte, si hacemos variar el volumen del matraz, a presión igual el peso del gas contenido será proporcional al volumen. Además, claro está, que este peso dependerá de la naturaleza del gas; podrá, pues, siempre estar representado por $P = KVp$, siendo K un número dependiente de la naturaleza del gas, V el volumen y p la presión.

Tomemos ahora un cuerpo y calentémosle. A medida que sube la temperatura, le habremos proporcionado cada vez más calor. La experiencia demuestra que la cantidad de calor absorbido por el cuerpo es proporcional al aumento de temperatura, al volumen del cuerpo y a una constante que depende de la naturaleza de este cuerpo. Tendremos, por lo tanto, para representar esta cantidad de calor una fórmula análoga a la precedente $Q = KVT$, Q representa la cantidad de calor y T el aumento de temperatura.

Por último, pasemos a la electricidad. Llevemos una carga creciente a un cuerpo convenientemente aislado: a medida que el cuerpo toma esta carga creciente, aumenta lo que podríamos llamar la temperatura eléctrica, o la presión eléctrica, y que se denomina *potencial*. Cuando un cuerpo está cada vez más caliente, irradia cada vez más hacia sus inmediaciones; cuando un vaso contiene un gas, las fugas son tanto más importantes cuanto más elevada es la presión; de la misma manera, cuanto más elevado sea el potencial a que se encuentra un cuerpo, más grandes serán las chispas que de él se saquen, más pierde fácilmente por los soportes. Encontramos, además, para el aumento de carga, una fórmula análoga a la precedente, $Q = \alpha CV$, en la que V representa el aumento de potencial, C una constante denominada la capacidad del cuerpo. En el caso del calor, la capacidad calorífica dependía del volumen V y de una constante K, variable con la substancia del cuerpo, diferente según que se tratase del cobre, del hierro, del agua, etc. En electricidad, la capacidad depende de otros elementos. La naturaleza del cuerpo no tiene ninguna influencia sobre ella, sea de cobre o de hierro, es lo mismo mientras sea conductor y pueda la electricidad esparcirse por él. La experiencia demuestra que esta capacidad C depende, por el contrario, de la forma del cuerpo y de su posición respecto a los cuerpos vecinos. Tomemos una masa de plomo, una esfera, por ejemplo, aislada en el espacio, tendrá cierta capacidad eléctrica. Deformemos esta esfera, no cambiaremos la masa, su capacidad calorífica permanecerá la misma, pero su capacidad eléctrica cambiará. Tomemos ahora esta masa de plomo y, sin cambiar nada, aproximémosla a otros cuerpos, este sólo desplazamiento modificará también su capacidad eléctrica, tanto más cuanto más cerca del otro cuerpo sea llevada.

Cuando hemos considerado una masa de gas encerrada en un matraz, hemos hablado de su *presión* y de su *peso*; para el calor y la electricidad, no hemos considerado más que *aumentos de temperatura, aumentos de calor, de potencial,* etc. Esto depende de que si queremos realizar prácticamente una presión nula en un vaso que contenga un peso cero de gas, no usamos generalmente un cero de temperatura absoluta,

sino un cero convencional, a partir del cual contamos, no temperaturas absolutas, sino aumentos de temperatura, y lo mismo para las otras magnitudes. Cuando hablamos de una temperatura de 5°, queremos decir una temperatura en 5° más elevada que la de nuestro cero convencional, mientras que cuando hablamos de una presión de 5 cm. de mercurio, esta medida es absoluta sin convención de un cero. Para que el paralelismo fuera perfecto, hubiéramos podido suponer que al principio el matraz contenía cierta cantidad de gas y no ocuparnos más que de los aumentos de peso que varían proporcionalmente a los aumentos de presión.

Hemos, pues, llegado, en suma, a la primera fórmula fundamental $Q = \alpha CV$ que relaciona entre sí las cantidades de electricidad Q con la capacidad del cuerpo C y su potencial de carga V.

Cuando se toman dos vasos, dos matraces por ejemplo, que contengan un mismo gas a una presión diferente, y se les pone en comunicación por medio de un tubo, el gas se derrama del vaso de mayor presión al vaso de menor presión. La cantidad de gas que se derrama en un tiempo dado es tanto mayor cuanto más grande sea la presión. Pero interviene otro elemento: es la resistencia que el gas encuentra al paso a través del tubo de comunicación. Es evidente que, en igualdad de circunstancias, la cantidad de gas que se derrame será tanto menor en el mismo tiempo cuanto más reducido sea el calibre del tubo.

De la misma manera, cuando se establece una diferencia de temperatura en las dos extremidades de una varilla de metal, el calor se propaga de la parte más caliente a la más fría. Esta propagación es tanto más importante cuanto más elevada es la diferencia de temperatura. Para una misma diferencia de temperatura, la cantidad de calor que pasa varía con la comunicación; pasa menos a través de un hilo delgado y largo que a través de un hilo grueso y corto. Puede decirse que el calor encuentra cierta resistencia a su propagación, o que el conductor ofrece cierta resistencia al paso del calor.

En la propagación de la electricidad, se encuentra también el mismo hecho. Pongamos en comunicación, por medio de un hilo, dos conductores de potencial diferente: la electrici-

dad se derramará, digámoslo así, del cuerpo de potencial más elevado hacia el cuerpo de potencial más bajo. La cantidad de electricidad que pasa por segundo, que designaremos por I, es proporcional a la diferencia de potencial entre los dos cuerpos, y está en razón inversa de la resistencia R del circuito. Esto es lo que expresa la fórmula $I = \beta \frac{V}{R}$, llamada fórmula de Ohm, en la que I representa la cantidad de electricidad que pasa por segundo, designado generalmente con el nombre de intensidad de la corriente.

Si el paso es uniforme, se deduce inmediatamente que en el número de segundos t, la cantidad que pasa está representada por la fórmula $Q = \gamma It$.

Por último, existe una cuarta fórmula importante en extremo. Cuando un conductor es atravesado por una corriente eléctrica, se calienta; este hecho es, en la actualidad, de una noción demasiado corriente para que haya lugar de insistir. El calor desprendido en un hilo es, como sabemos, equivalente a cierta cantidad de energía. La experiencia demuestra que este calor desprendido y la energía equivalente crecen de una manera proporcional a la resistencia del hilo y al cuadrado de la intensidad I, es decir que, representando esta energía por W, se tiene $W = \varepsilon RI^2$. Esta es la ley de Joule.

Tenemos, pues, las cuatro fórmulas siguientes fundamentales:

$$[1] \qquad Q = \alpha CV$$

$$[2] \qquad I = \beta \frac{V}{R}$$

$$[3] \qquad Q = \gamma It$$

$$[4] \qquad W = \varepsilon RI^2$$

que contienen seis clases de magnitudes: cantidades de electricidad Q, capacidades eléctricas C, diferencias de potencial V, resistencias eléctricas R, intensidades de corriente eléctrica I, energías eléctricas W.

Para medir todas estas cantidades ha sido necesario elegir unidades. Estas unidades podían haberse elegido arbitrariamente; pero entonces, como hemos demostrado a propósito de las medidas en general, las fórmulas habrían conservado los

factores constantes α, β, γ, ε. Por el contrario, por una prudente elección, en cuyo detalle no podemos entrar en este sitio, estos coeficientes han desaparecido, como se ha hecho desaparecer en el coeficiente en las medidas de superficie, de volumen, etc.

Estas fórmulas se han convertido en:

$$[5] \qquad \begin{cases} Q = CV \\ I = \dfrac{V}{R} \\ Q = It \\ W = RI^2 \end{cases}$$

En esta forma son empleadas en electricidad.

He aquí las unidades que han producido la desaparición de los coeficientes.

Unidad de resistencia. — La unidad de resistencia llamada Ohmio, es la resistencia de una columna de mercurio a 0° que tenga un milímetro cuadrado de sección y aproximadamente 1,06 m. de longitud.

Unidad de diferencia de potencial. — Esta unidad se denomina el Voltio. Para dar una idea de ella, diremos que hay 1,08 v de diferencia de potencial entre los dos polos de una pila de Daniell.

Unidad de intensidad. — La unidad de intensidad es el Amperio, que es la intensidad de corriente que se produce en un circuito cuya resistencia es de un Ohmio, con una diferencia de potencial de un voltio en las extremidades del circuito.

Unidad de cantidad. — Es el Culombio; representa la cantidad de electricidad que pasa en un segundo en un punto de un circuito recorrido por una corriente de un amperio.

Unidad de capacidad. — Es el Faradio, o capacidad del cuerpo cuyo potencial crece en un voltio por un aumento de carga de un culombio.

Unidad de potencia. — Es el Vatio, o cantidad de energía consumida por segundo en un circuito que tenga un Ohmio de resistenca y sea recorrido por una corriente de un amperio.

Es sumamente importante, como se comprende, en la aplicación de las fórmulas [5] expresar las magnitudes eléctricas por medio de las unidades que acabamos de definir; únicamente con esta condición se obtienen resultados exactos. Por ejemplo, si se toma la primera de esas fórmulas, multiplicando la capacidad de un cuerpo expresada en faradios por su aumento de potencial expresado en voltios, se tiene su acrecentamiento de carga en culombios. Lo mismo para las demás fórmulas.

No obstante, ocurre lo que se produce para las demás medidas; las unidades pueden, en ciertas circunstancias, ser demasiado grandes o demasiado pequeñas. En la práctica, el faradio es generalmente excesivamente considerable; se toma entonces el microfaradio, unidad un millón de veces más pequeña que el faradio. Desde aquel momento, multiplicando las capacidades así medidas por el aumento de potencial, se tiene el acrecentamiento de carga medido en microculombios, unidad un millón de veces más pequeña que el culombio. Se utiliza también con frecuencia el megohmio, que vale un millón de ohmios, y miliamperio, que vale una milésima de amperio. Las otras subdivisiones o múltiplos son poco empleadas.

Con frecuencia, algunas de estas fórmulas son transformadas. Así si en $W = RI^2$ se reemplaza I por su valor $I = \frac{V}{R}$, se deduce

$$[6] \qquad W = \frac{V^2}{R}$$

que nos da la potencia en función de la resistencia y del voltaje.

Si no se hubiese reemplazado más que un solo I por $\frac{V}{R}$, se hubiese tenido:

$$[7] \qquad W = IV$$

Esta última fórmula es de uso frecuente; para tener la energía consumida por segundo en un circuito, se mide la intensidad de la corriente que lo recorre, la diferencia de potencial en las extremidades del circuito, y se multiplica el uno por el otro.

Todas estas consideraciones de unidades y de fórmulas resultan muy sencillas después de leer atentamente lo que sigue, particularmente lo que se refiere a las medidas.

III. — Producción de la electricidad

La electricidad puede ser utilizada bajo dos formas muy diversas; según las exigencias de esta utilización, es necesario recurrir a medios de producción muy variados. Puede ocurrir que se desee una pequeña cantidad de electricidad a alto voltaje, como se puede tener necesidad de una pequeña cantidad de calor a elevada temperatura, o se puede necesitar un rendimiento considerable continuo, o una corriente alterna, etc. Vamos a examinar sucesivamente los diferentes dispositivos generales que el médico puede tener necesidad de utilizar.

IV. — Máquinas estáticas

Las antiguas máquinas de frotamiento no se emplean en la actualidad; hasta la máquina llamada de influencia, tipo Holtz, ha sido abandonada. No se encuentra, por decirlo así, más que las máquinas Wimshurst, con sectores o sin sectores, es decir, que llevan o no sobre los discos en ebonita zonas recubiertas de estaño. En los casos de máquinas con sectores (fig. 438) basta poner el aparato en marcha para que, si está en buen estado, se ponga a funcionar. En el tipo sin sectores (fig. 439) es preciso un cebamiento preliminar que, por lo demás, se hace con mucha sencillez; basta para obtenerlo tocar con el dedo uno de los discos en un sitio determinado.

Estas máquinas, cuya descripción detallada ni su teoría

hemos de hacer aquí, necesitan unos cuidados de conservación extremadamente minuciosos. Producen electricidad a muy alto potencial, que puede alcanzar y aun pasar de 50,000 voltios, pero tienen muy escaso rendimiento. Este rendimiento crece, claro está, con la superficie de los discos y con su número. Generalmente, se prefiere aumentar el número de los discos (fig. 440) más que hacer crecer la superficie por encima de cierto límite que corresponde, aproximadamente, a 50 ó 60 cm. de diámetro. La ebonita es, en efecto, una substancia que se deforma con bastante facilidad, y los grandes discos no se conservan planos, lo que compromete rápidamente la buena marcha del aparato.

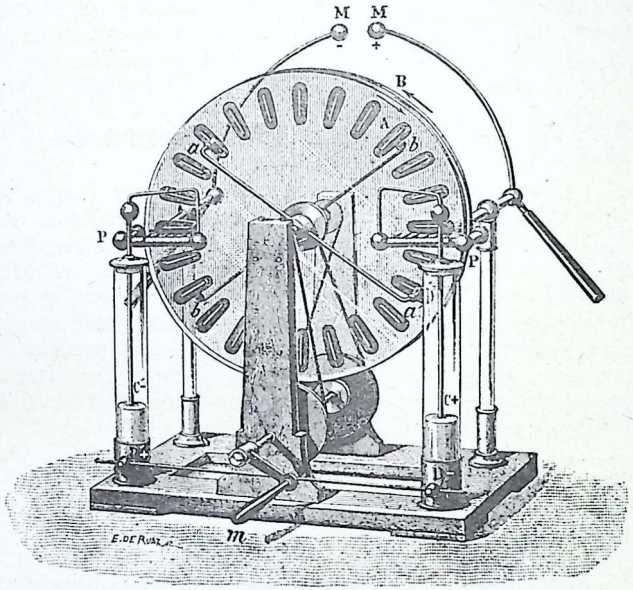


Fig. 438

La máquina de Wimshurst se utiliza principalmente cuando se quiere cargar estáticamente un cuerpo con alto potencial,

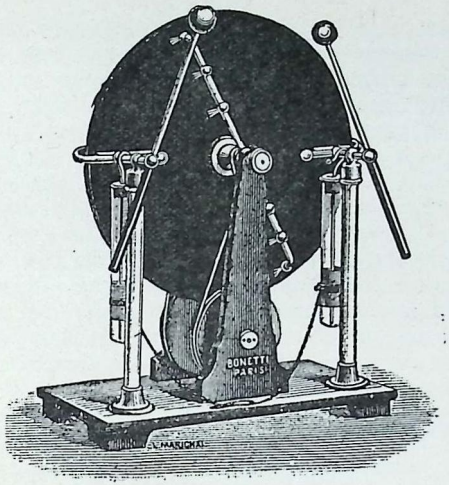


Fig. 439

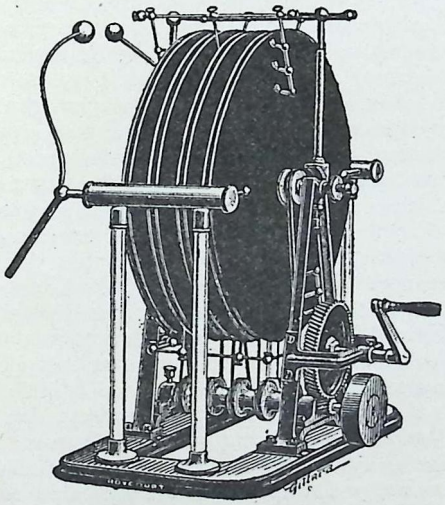


Fig. 440

estando este cuerpo suficientemente aislado para que el rendimiento, bastante débil, de la máquina, baste a cubrir las pérdidas. Veremos que se ha podido emplear en radiología para producir corrientes poco intensas, es decir, rindiendo una pequeña cantidad de electricidad.

V. — Pilas

Antes de entrar en la descripción de las pilas empleadas en Medicina, es indispensable recordar ciertos principios sobre los que descansa su construcción y su empleo, sin entretenernos, no obstante, en largas consideraciones teóricas acerca del origen de la producción de la electricidad en estas condiciones.

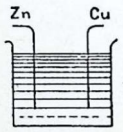


Fig. 441

Si se sumerge en el agua acidulada por el ácido sulfúrico un trozo de zinc y un trozo de cobre, se aprecia entre estos dos metales la existencia de una diferencia de potencial, el zinc se convierte en lo que se denomina polo negativo, porque parece cargarse negativamente; el cobre se convierte en el polo positivo, porque parece que se carga positivamente. Si se reune el zinc con el cobre mediante un hilo exterior, este hilo está recorrido de una manera constante por una corriente que va, por definición, del polo positivo al polo negativo.

He aquí cómo nos podemos imaginar las cosas; este concepto facilitará la comprensión de todo lo que ocurre en la pila. Estando el zinc sumergido en el líquido, se produce una diferencia de potencial al contacto de este zinc con el líquido, el zinc se carga negativamente y el líquido positivamente. El cobre se pone en equilibrio con el líquido, es un simple conductor, se le podría reemplazar por un carbón, como se hace con frecuencia, se carga positivamente. Si ahora se une el zinc al cobre mediante un hilo exterior, tiende siempre a producirse una recombinación a través de este hilo, mientras que la carga se renueva sin cesar al contacto del zinc y del líquido. El conductor realmente recorrido por la corriente se compone, pues, del líquido desde el zinc hasta el cobre, más el hilo exterior, y el transporte de electricidad en este conductor se verifica bajo la influencia de una diferencia de potencial que se produce entre el zinc y el líquido. La diferencia de potencial así obtenida, y gracias a la cual se producirá una circulación continua de electricidad, lleva frecuentemente también el nombre de *fuerza electromotriz* de la pila. Ahora es ocasión de hacer observar una cosa extremadamente importante: es que la fuerza electromotriz de una pila depende únicamente de los cuerpos que entran en su construcción y en manera alguna de su forma ni de sus dimensiones. El elemento que hace un momento hemos descrito, que es debido a Volta, tiene siempre 0,8 volt. de fuerza electromotriz. Esto no quiere decir que todos los elementos de Volta sean equivalentes, cualquiera que sea su forma. En efecto, si buscamos la intensidad de la corriente obtenida en ciertas circunstancias, sabemos que esta intensidad será determinada por la fórmula $I = \frac{V}{R}$. V será la diferencia de potencial siempre la misma para todos los elementos de Volta. R es la resistencia del circuito recorrido por la corriente. El circuito comprende el hilo exterior, más el líquido comprendido entre el zinc y el cobre, por lo tanto, según la forma de este conductor líquido, su resistencia será muy variable, resultará un valor muy diferente para la intensidad de la corriente: cuanto más débil sea esta resistencia líquida, más posible será obtener una corriente intensa en el circuito exterior. Esta resistencia del líquido es lo que se denomina resistencia interior de la pila. Se comprende fácilmente que haya interés en poseer elementos de pila de resistencia interior débil y de fuerza electromotriz elevada.

Para disminuir la resistencia interior de las pilas, es necesario aproximar todo lo posible el zinc y el otro metal, con el fin de no tener que atravesar más que una capa de líquido muy delgada. Además, hay que poner frente a frente grandes superficies, de modo que se dé al conductor líquido una gran sección. Esto conduce a elegir grandes elementos de pila.

Para aumentar la fuerza electromotriz, es preciso elegir convenientemente las substancias de que está compuesta la pila; según sean estas substancias, tendremos resultados dife-

rentes más o menos favorables. Pero existe otra consideración, que debe guiarnos en la determinación de las substancias que entran en la construcción de la pila. Volvamos al elemento de Volta. Si se monta un elemento de esta especie, se aprecia que en el momento de ponerlo en marcha da una corriente bastante intensa, pero con gran rapidez desciende esta intensidad a una fracción en ocasiones bastante pequeña de su valor primitivo. Se dice entonces que la pila se ha polarizado. ¿Qué ha sucedido? La producción de corriente va acompañada de una descomposición química del líquido de la pila, en cuyo mecanismo entraremos más adelante con algunos detalles, y cuya consecuencia es un desprendimiento de hidrógeno sobre el cobre del elemento. Se demuestra que es este desprendimiento de hidrógeno el que causa la polarización de la pila; por lo tanto, hay que procurar evitarlo; para esto, se introduce en el líquido de la pila, o por lo menos alrededor del polo positivo, un cuerpo oxidante que, obrando sobre el hidrógeno, lo transforma en agua e impide la polarización de la pila.

Por lo tanto, en el establecimiento de un modelo de pila debemos preocuparnos de tres cosas para obtener una corriente de intensidad conveniente y constante, durante cierto tiempo, por lo menos.

En primer lugar, debemos elegir nuestras substancias de manera que no tengamos polarización; esto es absolutamente fundamental. En segundo lugar, debemos buscar substancias que den una fuerza electromotriz lo más elevada posible. Por último, según que queramos obtener una corriente más o menos intensa nos será preciso tomar elementos más o menos grandes y disponer convenientemente las partes metálicas para reducir la resistencia interior. Desde luego que también habrá que tener en cuenta otras circunstancias: por ejemplo, si las pilas están destinadas a ser transportadas, deberán estar construídas de manera distinta que si han de estar fijas.

En todas las pilas que pueden interesar a los médicos, el polo negativo es de zinc. Si se utiliza el zinc ordinario, en cuanto se introduce en el líquido es atacado este zinc y se consume en pura pérdida. Se evita este inconveniente

utilizando zinc absolutamente puro, o, lo que da el mismo resultado y no es tan caro, amalgamando la superficie del zinc. En estas condiciones, para ciertos elementos, la usura es absolutamente nula cuando el circuito no está cerrado; para otras es, por lo menos, muy reducida. El polo positivo es de cobre, de carbón, en ocasiones de platino o de otro metal. El que más varía es el líquido, y más todavía el cuerpo despolarizador destinado a absorber el hidrógeno y que puede estar disuelto en el líquido o dispuesto alrededor del polo positivo en el estado sólido, pastoso o hasta líquido. En este último caso, está generalmente contenido en un vaso poroso que rodea el polo positivo, cuyas paredes se embeben de líquido, dejan pasar la electricidad, pero no permiten la mezcla rápida de los líquidos excitadores y despolarizadores.

Vamos ahora a examinar las principales pilas que pueden servir al médico.

Pila de Daniell. — No es muy usada, pero aún podría prestar algún servicio en un lugar aislado en donde fuera preciso que uno mismo montara sus elementos. Se compone de un primer vaso exterior de gres o vidrio que contiene un segundo vaso de tierra porosa. Entre los dos vasos se encuentra un cilindro de zinc amalgamado sumergido en el agua acidulada por el ácido sulfúrico al décimo. El vaso poroso contiene un trozo de cobre sumergido en una solución saturada de sulfato de cobre.

El hidrógeno, que en el elemento de Volta se desprendía sobre el cobre, descompone el sulfato de cobre en ácido sulfúrico y cobre que se deposita sobre el polo positivo.

El elemento no cambia, pues, de constitución y da una corriente constante, en tanto que la solución de sulfato de cobre permanece en buen estado de concentración. Se obtiene fácilmente este resultado introduciendo en el vaso central cristales de sulfato de cobre, que se disuelven a medida de las necesidades.

El elemento Daniell tiene una fuerza electromotriz aproximada de 1,06 a 1,08 voltios, según las condiciones del montaje. Se puede reemplazar el agua acidulada por una solución de sulfato de zinc.

Pila de Poggendorff. — En este modelo, el sulfato de cobre es reemplazado por el bicromato potásico; no hay necesidad de mantener este cuerpo junto al polo positivo mediante un vaso poroso, basta disolverlo en el agua acidulada, el cobre es reemplazado por un carbón de retorta. La solución ácida del bicromato potásico es muy oxidante, no puede haber desprendimiento de hidrógeno y la polarización es imposible.

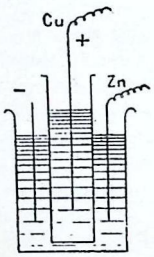


Fig 442

El inconveniente de esta pila es que el zinc se ataca aunque el circuito esté abierto; es preciso, por lo tanto, tener cuidado, cuando no está en servicio, de levantar el zinc para que no esté en contacto con el líquido. La fuerza electromotriz del elemento Poggendorff pasa un poco de 2 voltios, es el más elevado que se posee. Como no hay vaso poroso, se puede reducir mucho el espesor del líquido comprendido entre el zinc y el carbón y, por consiguiente, construir con facilidad elementos de débil resistencia interior. Estas dos condiciones reunidas, gran fuerza electromotriz y débil resistencia interior, hacen de este elemento una pila de elección para producir corrientes muy intensas, en particular para alimentar los gálvanocauterios, cuando no se tienen a mano otros procedimientos, tales como el de hacer una toma de la distribución de electricidad urbana. Para hacer la solución excitadora, es muy importante mezclar primero el ácido sulfúrico con el agua y no añadir el bicromato más que después de fría la mezcla; sin esta precaución, el líquido está perdido.

Pila Leclanché. — La pila Leclanché comprende un zinc que se encuentra en contacto de una solución de clorhidrato amónico; un aglomerado de carbón y bióxido de manganeso forma el polo positivo. El hidrógeno que se deposita sobre el polo positivo reduce el bióxido de manganeso con formación de agua; no hay, por lo tanto, polarización. En realidad, si se hace producir a la pila una corriente intensa se polariza, pero vuelve a su estado primitivo si se deja de hacer pasar la corriente. La gran ventaja de este elemento es que puede estar montado sin usura sensible cuando está en circuito abierto; siempre está a punto para servir; es, pues, la pila

por excelencia del médico. Se puede reemplazar el clorhidrato amónico por el cloruro de zinc, la pila toma entonces el nombre de pila de Gaiffe. La ventaja de esta substitución es evitar las sales trepadoras. Cuando se coloca una solución de clorhidrato amónico en un vaso, se ve que, poco a poco, sube por la superficie interna del mismo cristales de sal que acaban por alcanzar la parte superior y por desbordarse. El líquido sube por capilaridad entre la capa de sal y la pared del vaso y moja poco a poco hasta el soporte que sustenta la pila. Se evita este inconveniente parafinando la parte superior del vaso, o reemplazando el clorhidrato amónico por cloruro de zinc. Siendo este cuerpo delicuescente, no cristaliza y no sube a lo largo de la pared del vaso.

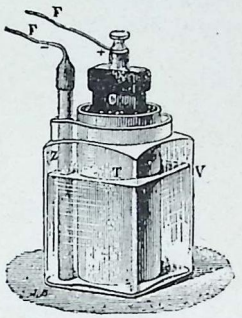


Fig 443

La fuerza electromotriz del Leclanché es aproximadamente de 1,45. Es la pila de elección siempre que los elementos deban estar montados permanentemente, pero tiene una resistencia interior demasiado grande para que le permita alcanzar grandes intensidades; por lo demás, en estas condiciones se polarizan. Es una buena pila para las condiciones corrientes de la electroterapia, porque, de ordinario, no se emplean nunca más que débiles intensidades.

Pila al cloruro de plata. — En esta pila el zinc no está amalgamado, el polo positivo es una lámina de plata rodeada de cloruro argéntico y todo sumergido en una solución de clorhidrato amónico o de cloruro de sodio. El hidrógeno que se desprende en el polo positivo obra sobre el cloruro de plata para producir ácido clorhídrico con depósito de plata. Se puede dar a esta pila muy poco volumen y hacerla muy transportable. Para esto, la lámina de zinc plana está recubierta por una capa de papel filtro embebido de la solución de clorhidrato amónico. Por encima se encuentra la lámina de plata, recubierta, por su cara interna, de cloruro de plata.

El contacto está mantenido por dos pequeñas bandas de caucho y, para evitar la evaporación, todo está encerrado en una caja cilíndrica de ebonita sobre la que se enrosca una cubierta que da paso a los dos polos de la pila.

La fuerza electromotriz de esta pila es de 1,02 voltios solamente, pero se recomienda por su pequeño volumen. Es, en particular, muy ventajosa para hacer funcionar las pequeñas bobinas de inducción portátiles. El único inconveniente que tiene es que es necesario emplearla regularmente: si permanece mucho tiempo sin utilizarse, acaba por incrustarse. Se forma sobre el zinc una capa muy resistente al paso de la electricidad que exige el que se la desmonte y se la rasque, cosa difícil de efectuar. Es, pues, conveniente utilizarla, por lo menos, una vez a la semana y, si es preciso, hacerla funcionar sin fin ninguno durante algunos minutos. Si el papel filtro se desecase, se desenroscará la cubierta, se sumergirá durante algún tiempo la pila en una solución de clorhidrato amónico o de cloruro de sodio, y después de haberla secado exteriormente se la coloca en su sitio.

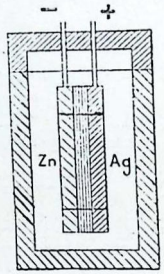


Fig. 444

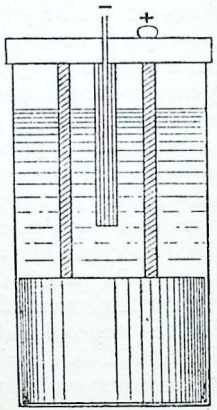


Fig. 445

Pila al bisulfato de mercurio. — La pila al bisulfato de mercurio es también muy buena para obtener la corriente

continua empleada en Medicina. He aquí cómo está generalmente constituída. A una cubierta plana está fijo un cilindro hueco de carbón de retorta.

El eje de este cilindro está ocupado por una barra de zinc y el extremo está sumergido en una solución de bisulfato de mercurio. En el frasco que contiene esta solución se encuentra un tapón de un calibre algo inferior al del frasco. Cuando la pila está en su sitio, el carbón se apoya sobre el tapón y lo hace sumergir en el fondo del líquido, cuyo nivel se eleva.

Si la pila no está en uso, en el momento en que se levanta la pila, el tapón sube a la superficie del líquido cuyo nivel baja. En estas condiciones, la pila se transporta fácilmente sin que el bazuqueo la haga desbordar; basta con no inclinarla. Esta pila es quizá la más práctica, en el caso en que hay necesidad de transportar el aparato. Suministra fácilmente sin polarización las corrientes continuas utilizadas en electroterapia. Además, cuando la pila se debilita, se la puede regenerar; con frecuencia basta con cambiar el líquido y cuando el zinc está usado se le reemplaza fácilmente por medio de piezas de recambio fáciles de encontrar en el comercio.

VI. — **Acumuladores**

Actualmente, cada vez más, se reemplazan las pilas por acumuladores.

El acumulador consiste esencialmente (fig. 446) en dos láminas de plomo, *A, B,* sumergidas en una solución de ácido sulfúrico de una densidad de 1,16 a 1,26. Hay que mantener esta densidad comprobándola de vez en cuando y añadiendo, si es preciso, agua destilada.

El acumulador se carga poniendo *A* en comunicación con el polo positivo de un generador de electricidad y *B* con el polo negativo. Una vez cargado, el acumulador funciona como una pila que tiene un polo positivo en *A* y un polo negativo en *B,* es decir, que da una corriente de sentido inverso al de la corriente de carga. Cuando el acumulador está

descargado, se le carga de nuevo. Al principio, Planté, que inventó el acumulador, lo fabricaba de la manera siguiente: Dos láminas de plomo se superponían, manteniéndolas separadas mediante un trapo o fieltro. Se arrollaba el todo en un cilindro que se sumergía en un vaso que contenía agua acidulada. Una de las láminas formaba el polo positivo, la otra el polo negativo. Se concibe que estos acumuladores, que tenían una gran superficie de electrodos muy próximos entre sí, con resistencia interior muy pequeña, permitiesen dar una corriente muy intensa. Pero exigían una formación bastante

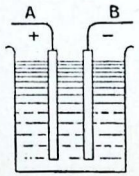


Fig. 446

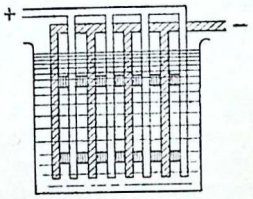


Fig 447

larga, es decir que, al principio de su empleo, se cargaban rápidamente, aun sin querer, y se descargaban muy aprisa; poco a poco el plomo se hacía cada vez más poroso, sobre todo alternando las cargas, lo que daba lugar a la formación de óxido, que se reducía en la descarga y en la carga inversa. El acumulador podía tomar cargas cada vez más grandes. Actualmente, se suprime el período de formación constituyendo los electrodos por láminas de plomo perforadas, cuyos orificios se guarnecen de óxido de plomo. Se toman entonces vasos de sección cuadrada, se introduce en ellos un número más o menos considerable de placas perforadas y se reune en un polo negativo todas las placas impares, por ejemplo, y en un polo positivo todas las placas pares (fig. 447). La separación de los electrodos está mantenida por tapones; así se tiene una gran superficie útil. La fuerza electromotriz de los acumuladores está próxima a 2 voltios, tienen una resistencia interior muy débil y son, por consiguiente, muy ventajosos siempre que se desee obtener una corriente muy intensa. Su único inconveniente es necesitar la carga previa, lo que exige un manantial

de corriente, por ejemplo, la distribución urbana. Los acumuladores son generalmente pesados y no pueden transportarse sin trabajo; además, este transporte necesita ciertas precauciones para evitar los desbordamientos del líquido y los deterioros. No obstante, actualmente se construyen modelos perfectamente cerrados, relativamente ligeros y prácticamente transportables.

Estos aparatos exigen una conservación cuidadosa, es preciso vigilar la densidad del líquido, no descargarlos completamente y no hacerles producir o tomar una corriente superior a la que indique el constructor. Si no se toman estas precauciones, se deterioran con rapidez.

VII. — **Agrupación de los elementos**

Ocurre con frecuencia que un elemento de pila no es suficiente para producir la intensidad de la corriente que se desea alcanzar; es necesario entonces agrupar cierto número

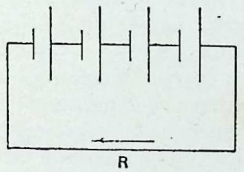


Fig. 448

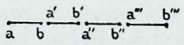


Fig. 449

de elementos y, según el modo como se hace esta agrupación, se obtienen resultados muy diferentes.

La agrupación llamada en serie se obtiene uniendo los elementos, unos a continuación de otros, de modo que el polo positivo de uno esté unido al polo negativo del siguiente, como indica la figura 448, en la que cada elemento está representado por dos trazos paralelos, representando el grande el polo positivo; la corriente circulará por el circuito exterior, de resistencia *R*, en el sentido de la flecha. Esta corriente estará obligada a atravesar todos los elementos colocados unos a continuación de otros, como resulta de la simple inspección de la

figura. Pasando a través de todos los elementos, tiene que franquear la resistencia de todos ellos; si la resistencia de cualquiera de ellos es r y hay n elementos, será nr, y añadiendo la resistencia del circuito exterior tendremos $nr + R$. Busquemos ahora la fuerza electromotiz que hace circular la corriente, teniendo uno de los elementos V. Hagamos una comparación con el calor y supongamos que colocamos de cabo a cabo una serie de cuerpos ab, $a'b'$, $a''b''$, etc., tales que en cada uno de ellos el lado b esté a una temperatura superior al lado a en cierto número de grados t; no debemos preocuparnos de cómo podría conseguirse este resultado. El punto b estará, pues, a t^0 por encima de a; a' en contacto con b se pondrá en equilibrio de temperatura con b, pero estando b' a t^0 por encima de a' estará entonces a 2 t^0 por encima de a''. De la misma manera, a'' se pondrá en equilibrio de temperatura con b', pero b'' estará a t^0 por encima de a'' a 2 t^0 por encima de a' y a 3 t^0 por encima de a; y así sucesivamente, si hay n cuerpos semejantes, el b del último estará a n t^0 por encima de a del primero.

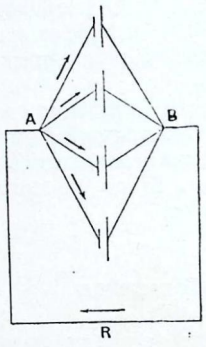


Fig. 450

Lo mismo ocurre para los elementos de la pila agrupados en serie, las fuerzas electromotrices de los diversos elementos se van sumando, y si hay n, la fuerza electromotriz de la cadena será nV. La intensidad de la corriente deberá, pues, ser dada por la fórmula $I = \frac{nV}{nr + R}$

Agrupemos ahora los elementos en batería, es decir, unamos todos los polos positivos entre sí y todos los polos negativos entre sí y unamos los polos únicos así obtenidos a las extremidades de la resistencia exterior, siguiendo las indicaciones de la figura 450. Investiguemos primero cuál es la resistencia del circuito. Tenemos la resistencia exterior R más la resistencia de la pila. Notemos que aquí la corriente no atraviesa todos los elementos colocados unos junto a otros, se divide entre los diversos elementos; todo ocurre como si

hubiera un conducto tanto más grande cuantos más elementos haya, es decir, si hay n elementos, la resistencia que la corriente encuentra pasando por la pila, en lugar de ser nr, como en el caso precedente, es $\frac{r}{n}$. La resistencia total del circuito es, pues, $R + \frac{r}{n}$.

¿Cuál es ahora la fuerza electromotriz? Si colocamos unos junto a otros los n pequeños cuerpos de la experiencia precedente, disponiéndolos como indica la figura 451, es decir, estando todos los lados a en contacto entre sí y todos los cuerpos b también en contacto entre sí, se ve que todos los a se pondrán en equilibrio de temperatura y todos los b harán lo propio, pero entre el lado a y el lado b no habrá más diferencia de temperatura que t, la misma que para un elemento tomado aisladamente. Lo mismo ocurre para las pilas, reuniendo todos los polos positivos entre sí y todos los polos negativos también entre sí; entre A y B habrá siempre la diferencia de potencial V, sea cual fuere el número de los elementos. Por lo tanto, aplicando la fórmula, se encuentra para intensidad $I = \frac{V}{R + \frac{r}{n}}$ que se puede escribir $I = \frac{nV}{nR + r}$

Conclusión. — Si se tienen n elementos de pila de fuerza electromotriz V y de resistencia r, agrupándolos en una resistencia R se tiene para la intensidad de la corriente, según que la agrupación se haga en serie o en batería:

$$[1] \qquad I = \frac{nV}{R + nr} \qquad \text{o} \qquad [2] \qquad I = \frac{nV}{nR + r}.$$

Examinemos ahora dos casos extremos, aquel en que la resistencia R es extremadamente grande y en el que, por consiguiente, frente a esta resistencia se puede despreciar r; y el caso inverso, en que R es muy pequeña y puede despreciarse frente a r. En el primer caso, las fórmulas se convierten en:

$$[1'] \qquad I = \frac{nV}{R} \qquad \text{y} \qquad [2'] \qquad I = \frac{nV}{nR} \qquad \text{o} \qquad I = \frac{V}{R}.$$

Por consiguiente, en este caso, la corriente es tanto más intensa cuanto mayor es el número de elementos con la asociación en serie. Con la asociación en batería, no hay ningún interés en aumentar este número.

Cuando podemos despreciar R tenemos:

$$[1'']\quad I = \frac{nV}{nr} \quad o \quad I = \frac{V}{r} \quad y\ [2'']\quad I = \frac{nV}{r}.$$

Por consiguiente, no hay entonces, con la asociación en serie, ningún interés en aumentar el número de elementos; por el contrario, con la asociación en batería, la intensidad crece proporcionalmente a este número.

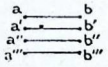


Fig. 451

De ello resulta, por lo que a la conducta que hemos de seguir se refiere, que, si se dispone de cierto número de elementos de pila, cuando se tiene una resistencia exterior muy considerable, es preciso asociarlos en serie. Cuando la resistencia exterior es despreciable, es preciso asociarlos en batería. Como ejemplo, citaremos el caso del cuerpo humano, muy resistente; cuando se le quiere atravesar por una corriente, los elementos afectados a este uso deben estar asociados en serie. El galvanocauterio, que

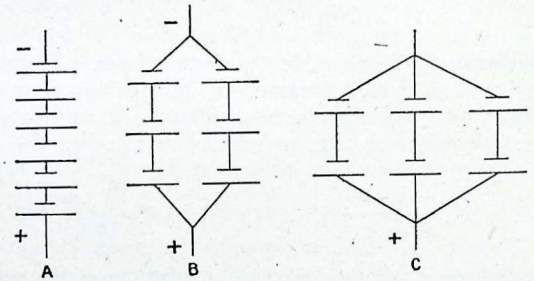


Fig. 452

tiene muy poca resistencia, necesitará, por el contrario, la asociación en batería.

Con frecuencia nos encontramos en una posición intermedia, la resistencia no es intensa, pero tampoco es nula. Hay entonces una asociación mixta, que será más conveniente

y hay que buscarla. Supongamos, por ejemplo, que se tengan seis elementos de pila, se les podrá agrupar de las cuatro maneras representadas en las figuras 452 y 453.

Se pueden poner los seis elementos en serie (A).

Se pueden hacer dos series de tres elementos cada una y asociar estas dos series en batería (B); o bien hacer tres series

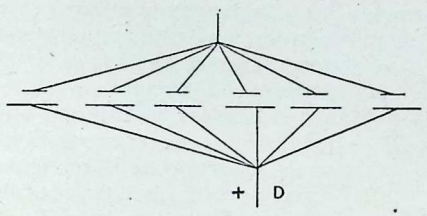


Fig. 453

de dos elementos cada una, asociados en batería (C), o, por último, asociar los seis elementos en batería (D).

Según la resistencia exterior, será ventajoso el empleo de una u otra de estas agrupaciones, correspondiendo A a un caso de una resistencia enorme, D a un caso de una resistencia casi nula, y C y B a casos intermedios.

En estos cuatro casos, la intensidad de la corriente está dada por las fórmulas:

A. $$I = \frac{6V}{R + 6r}$$

B. $$I = \frac{3V}{R + \frac{3r}{2}} = \frac{6V}{1R + 3r}$$

C. $$I = \frac{2V}{R + \frac{2r}{3}} = \frac{6V}{3R + 2r}$$

D. $$I = \frac{V}{R + \frac{r}{6}} = \frac{6V}{6R + r}$$

Si se conocen los valores de R y de r será necesario buscar cuál es el de estas fórmulas que dan el valor más pequeño

para el denominador, es decir, la mayor intensidad. Así se determinará la asociación que hay que adoptar.

VIII. — Empleo de la corriente continua

En el empleo de la corriente continua, cuyos métodos de medida serán indicados más adelante, es necesario poder interrumpir esta corriente o hacerla pasar a voluntad al circuito en que se utiliza, sin verse obligados, cada vez, a unir o a separar los hilos; es preciso también poder invertir el sentido de la corriente cuando se desee y graduar la intensidad de la misma. Con este fin se han utilizado diversos dispositivos.

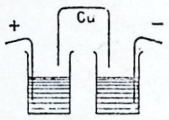


Fig. 454

Los interruptores de corriente son tan numerosos que no es posible describirlos, y cada experimentador se atiene a las circunstancias del caso para construir de nuevos. Uno de los más sencillos (fig. 454) consiste en el empleo de dos vasitos

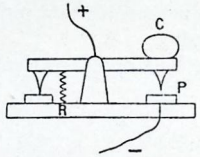


Fig. 455

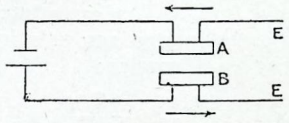


Fig. 456

con mercurio intercalados en el circuito, una pieza de cobre Cu cabalgada permite el paso de la corriente cuando se le baja y lo interrumpe cuando se le levanta de nuevo. Este dispositivo se recomienda por su sencillez y seguridad. La llave de Morse también está muy generalizada. Una pieza metálica *P* (fig. 455) está en relación con uno de los lados del circuito, cuyo otro extremo está unido a la llave *C*. Cuando se baja la llave se establece el contacto entre *CP*, la corriente pasa y se rompe cuando se retira el dedo, merced a un resorte *R* que levanta la llave. En la palanca-llave de Du Bois Reymond (figs. 456 y 457) el funcionamiento es diferente. La

pila está unida a dos piezas metálicas *A* y *B*, de donde parten también dos hilos que van hacia el objeto *E*, que hay que someter a la corriente. En el caso de la figura, la corriente pasa por este objeto, pero si se baja la llave entre *A* y *B*, toda la corriente pasa directamente de *A* a *B*, sin ir al cuerpo que hay que electrizar.

Estas indicaciones sumarias bastan. El número de inversores de corriente es también muy considerable. Los más empleados en electricidad médica y el más cómodo se compone de dos llaves de Morse, como representa la figura 458. Los ejes *O*, *O'* de las dos llaves están unidos al circuito por el

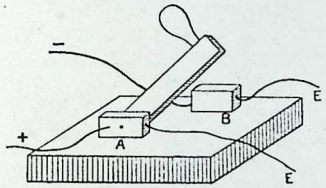


Fig. 457

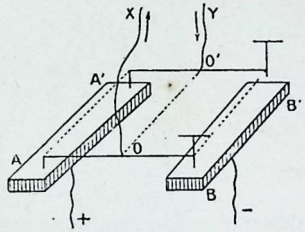


Fig. 458

que se desea hacer pasar la corriente. Durante el reposo, las dos llaves descansan sobre un bloque metálico único *AA'* unido al polo + de la pila, por ejemplo. Si se baja una de ellas establece el contacto con un bloque *BB'* unido al polo negativo. Sentado esto, bajemos la llave *A'B'* apretando con el dedo sobre el botón correspondiente. *O* permanecerá en comunicación con el polo positivo de la pila, *O'* será puesta en comunicación con el polo negativo y la corriente pasará por el circuito *XY* en el sentido de las flechas. Si, por el contrario, se baja *AB*, es *O'* la que queda en comunicación con el polo positivo y *O* la que estará en comunicación con el polo negativo, la corriente pasará por *XY* en sentido inverso al de las flechas.

Este dispositivo es muy cómodo para orientar a voluntad el sentido de la corriente en un circuito.

Ocupémonos, por último, de la graduación de la intensidad

de la corriente. Más adelante veremos cómo se mide esta intensidad; por ahora vamos únicamente a examinar los dispositivos que nos permiten hacerla variar.

En primer lugar se puede, dado un circuito, introducir sucesivamente en él un número mayor o menor de elementos. Este procedimiento es muy empleado en las pilas portátiles utilizadas en electroterapia. En este caso, la resistencia del circuito exterior, cuerpo humano, es muy grande, los elementos

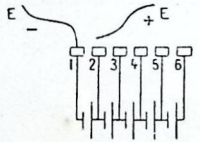


Fig. 459

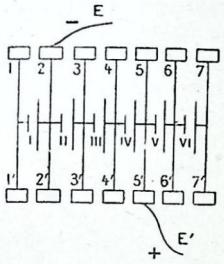


Fig. 460

deben estar agrupados en serie, y hay que estudiar cómo se pueden introducir sucesivamente un número creciente de elementos en el circuito sin romperlo. En efecto, hay necesidad absoluta de no interrumpir la corriente, pues su intensidad debe variar gradualmente y no adquirir súbitamente un valor muy elevado o descender de este valor a cero, lo que ocurriría infaliblemente si fuera preciso romper el circuito para introducir en él un nuevo elemento.

El dispositivo en uso está representado esquemáticamente por la figura 459. Los elementos sucesivos están unidos en serie y los hilos de unión de dos elementos están en comunicación con los botones metálicos 1, 2, 3, 4, etc. El primer botón está unido al polo negativo, por ejemplo, del primer elemento; el segundo botón al hilo de unión del primer elemento con el segundo, etc.

Coloquemos uno de los hilos que van al circuito por el que hay que hacer pasar la corriente sobre el primer botón. El otro estará unido a un frotador que puede deslizarse sobre los diferentes botones; se observa que cuando este frotador

está sobre el primer botón no hay ninguna corriente en el circuito; cuando está sobre el segundo, únicamente el primer elemento estará en el circuito y suministrará la corriente; sobre el tercero estarán en el circuito los dos primeros elementos, y así sucesivamente, se podrán introducir uno tras otro todos los

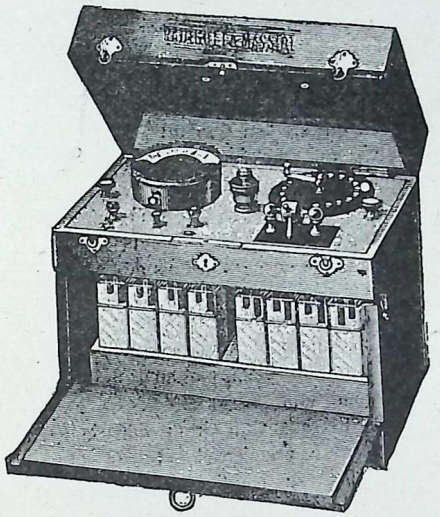


Fig. 461

elementos en el circuito y hacer crecer a voluntad la intensidad de la corriente.

Este dispositivo es conocido con el nombre de colector simple. Se puede también adoptar un colector doble en el que hay dos series de botones dispuestos como indica la figura 460, a los que están unidos los elementos. Es fácil de ver por la simple inspección de la figura, que se puede, colocando convenientemente los resortes frotadores, introducir en el circuito una serie cualquiera de elementos que se siguen. Así, en el caso que está representado, se emplean II, III y IV, el polo + está en *E'*, el polo — en *E;* el elemento *I* está fuera

del circuito de un lado, los elementos *V* y *VI* del otro lado. En general, cuando se colocan los frotadores sobre dos botones cualesquiera, se tienen en el circuito un número de elementos dado por la diferencia entre los números de orden de los botones, y el polo positivo está del lado del resorte más avanzado. Se pueden también emplear a voluntad los elementos del principio, del medio, o del fin de la serie y usarlos igualmente. El colector simple tiene, por el contrario, el inconveniente de poner siempre en servicio los primeros elementos y no utilizar más que raras veces los últimos. De ello resulta que los primeros están completamente gastados cuando los últimos todavía están en buen estado y, no obstante, hay que mandar a arreglar la pila.

En general, en las pilas médicas portátiles se emplea el colector doble. Los elementos están arreglados en una caja y unidos a un colector dispuesto sobre una tablilla que cubre los elementos; todo ello está protegido por una tapa (fig. 461). En este caso, los colectores, en lugar de ser rectilíneos, como se ha supuesto en las figuras precedentes, son circulares. Los resortes frotadores están colocados en el extremo de manivelas giratorias alrededor de un eje perpendicular al tablero y pasan así sobre los botones colocados en círculo. Esto no cambia en nada el principio del colector.

Notemos que no hay interrupción cada vez que se introduce o se suprimen sucesivamente elementos en el circuito, con la condición no obstante, que los frotadores no pierdan jamás el contacto con los botones, es decir, que no deben abandonar un botón más que cuando esté ya establecido el contacto con el siguiente; entonces únicamente hay una pequeña variación brusca de la corriente resultante de la adición o substracción de un solo elemento. Si, en un momento dado, hubiese salto del frotador de un botón a otro, habría, durante este instante, ruptura del circuito y resultaría de ello una variación brusca considerable de la corriente. Esto ocurre algunas veces en los aparatos mal reglados o mal cuidados. Propiamente hablando, no hay variación continua; en ciertos casos, el pequeño aumento o disminución brusco de intensidad que resulta de la introducción o de la supresión de un elemento es molesto. He aquí porqué en las instalaciones fijas en que no

se está obligado por el volumen o el peso, se prefiere reglar la variación de la corriente por otro método.

Se puede, en lugar de hacer variar el número de elementos, introducirlos todos en el circuito simultáneamente, teniendo en él, además del sujeto sobre quien se opera, una resistencia considerable accesoria, la corriente entonces es muy débil. Después se disminuye poco a poco la resistencia accesoria y se hace así variar la corriente a voluntad. Más adelante veremos cuáles son los aparatos que permiten hacer variar a voluntad las resistencias de un circuito. En este procedimiento hay que disponer de una resistencia enorme para tener al principio una corriente muy débil; de ello resulta una dificultad que hace preferir con frecuencia otro procedimiento llamado de la derivación.

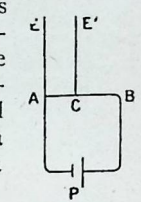


Fig. 462

La pila *P* está unida a los extremos de una resistencia *AB* (fig. 462). Los dos hilos que conducen al circuito *EE'* por el que se quiere hacer pasar la corriente, están unidos el uno al punto fijo *A*, el otro a un frotador *C*, que se desplaza sobre el conductor *AB*.

Cuando el frotador *C* está en contacto con *A*, toda la corriente circula únicamente por *PABP* sin pasar por el circuito *EE'*. A medida que se desplaza el frotador *C* de *A* hacia *B*, la resistencia *AC* se hace cada vez más grande, pasa menos corriente por *AC* y pasa más por el circuito *EE'*. Se puede, por lo tanto, desplazando el punto *C* sobre *AB*, hacer variar gradualmente la intensidad de la corriente.

IX. — **Corriente alternativa**

En las aplicaciones de la electricidad a la Medicina y a la fisiología, la corriente alternativa se obtiene siempre, por decirlo así, hasta ahora, por medio de la bobina de inducción.

Las bobinas empleadas en este caso no difieren de las que se utilizan en los laboratorios de fisiología y descritas en los tratados generales de electricidad más que en que son reglables.

Sabido es que estas bobinas se componen de un inductor ci-

líndrico *A* (fig. 463) unido a una pila y en cuyo circuito se encuentra un interruptor. Alrededor de este inductor *A* y concéntricamente a él se encuentra la bobina inducida *BB'*, cuya corriente alternativa será utilizada.

La graduación de esta corriente se hace de dos maneras. Algunas veces se introduce entre *A* y *B* un cilindro de cobre conductor que envaina a *A* y constituye una pantalla entre *A* y *B*. Cuanto más hundido está este cilindro, más disminuye la acción inductora de *A* sobre *B;* se puede, pues, por medio de este cilindro, llamado graduador, regular la intensidad de la corriente inducida que pasa por *EE'*.

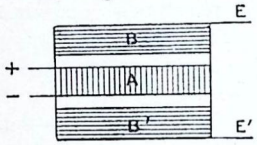


Fig. 463

Otro procedimiento consiste, estando fijo el inductor *A*, en hacer móvil el inducido haciéndole deslizar por una ranura paralela al eje del cilindro *A*. *BB'* enfundará más o menos completamente a *A*, la acción de *A* sobre *BB'* será tanto menor cuanto menos se introduzca, regulándose así la corriente inducida. La corredera por la que se desplaza *BB'*

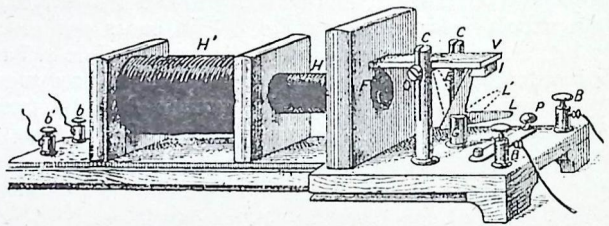


Fig. 464

está dotada de una graduación que da una referencia para las diversas observaciones, pero no hay que hacerse ilusiones acerca de su valor, porque esta graduación, absolutamente arbitraria, no da cifras proporcionadas al efecto producido por la corriente. No sabemos, actualmente, hacer una graduación racional de la corriente alternativa producida por las bobinas.

Los interruptores de la corriente primaria ofrecen las disposiciones más variadas según los constructores, pero descansan todos sobre el mismo principio que el interruptor de martillo o la campanilla eléctrica.

En algunos casos, se necesitan aparatos muy potentes, que examinaremos con más detención a propósito de las instalaciones de corrientes de alta frecuencia o de los rayos X.

X. — Máquinas dinamoeléctricas

Las máquinas dinamoeléctricas no son empleadas en electrología más que para cargar los acumuladores. Se utiliza

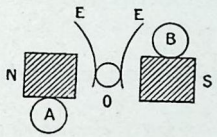


Fig. 465

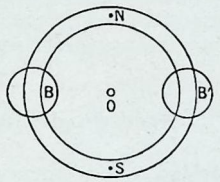


Fig. 466

para ello la máquina de Gramme, que proporciona la corriente continua necesaria para esta carga.

No obstante, ciertos constructores han establecido máquinas de tipo Clark o Pixii destinadas a reemplazar las bobinas médicas para la producción de la corriente alternativa, sería conveniente fabricar modelos más prácticos que los que actualmente se encuentran en el comercio.

En el tipo Clarke un par de bobinas *A, B* giran delante de dos polos de imán *NS* alrededor de un eje *O* que les es paralelo (fig. 465). Se produce una corriente alternativa recogida por medio de resortes *EE,* en comunicación con el circuito por el que se quiere lanzar la corriente, y que rozan sobre anillos que lleva el eje *O,* unidos a su vez al hilo de las bobinas.

En el rozamiento de los resortes *EE* sobre los anillos hay pequeñas vibraciones y resaltos imposibles de evitar, de lo que resultan perturbaciones constantes de la corriente. Por esta

razón, es conveniente reemplazar este tipo de máquina por el tipo Pixii, en el que las bobinas están fijas y los polos del imán giran delante de ellas. Como las bobinas están fijas, se puede unir directamente el hilo que llevan al circuito exterior, sin pasar por un resorte frotador, ni ningún intermediario de este género.

Es también conveniente, como ha demostrado d'Arsonval, dar al imán una forma particular. Si se toma un anillo de acero que gire alrededor de un eje O y que lleve polos imantados en las dos extremidades opuestas de un diámetro, NS, por ejemplo, se tendrá una variación extremadamente regular del campo magnético delante de las bobinas B y B'. La corriente alternativa así obtenida no presenta ningún resalto brusco en sus ondulaciones como ocurre algunas veces con los otros dispositivos. Este es, al parecer, el modelo del que hay que partir para construir un buen aparato médico práctico.

XI. — **Medida de las magnitudes eléctricas**

Intensidad. — La intensidad de las corrientes se determina habitualmente por medio del galvanómetro o del electrodinamómetro.

Sabido es que si se aproxima un circuito recorrido por una corriente a una aguja imantada móvil, orientada según la acción de la tierra, esta aguja es más o menos desviada de su posición, según la intensidad de la corriente y la posición del circuito. De la misma manera, un circuito recorrido por una corriente sufre atracciones y repulsiones por parte de otro circuito. En estos fenómenos están fundados los galvanómetros y los electrodinamómetros. Estos últimos instrumentos no se emplean en Medicina.

El sentido de la desviación de una aguja imantada bajo la influencia de una corriente ha sido dada por Ampère. Suponía para ello un hombre acostado sobre el hilo recorrido por la corriente, entrándole esta corriente por los pies y saliéndole por la cabeza. En estas condiciones, cuando el hombre mira el polo norte de la aguja imantada, este polo norte tiende a desplazarse de su derecha hacia su izquierda; el polo sur

va en sentido contrario. Por consiguiente, si la aguja estaba al principio paralela al hilo, tiende a ponerse en cruz con el hilo. Si se dispone este hilo de modo que rodee la aguja pasando sucesivamente por arriba y por debajo (fig. 467),

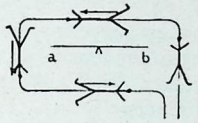


Fig. 467

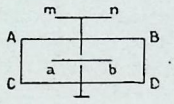


Fig. 468

se aprecia, aplicando la regla de Ampère, que los cuatro lados del cuadrilátero así formado tienen acciones concordantes sobre la aguja; así, en el caso de la figura, el polo norte tiende a venir hacia delante, el polo sur hacia atrás del plano del papel. En lugar de una sola, se le puede hacer dar al hilo un gran número de vueltas alrededor de la aguja; de esta manera se aumenta el efecto, tanto más cuanto mayor sea el número de vueltas.

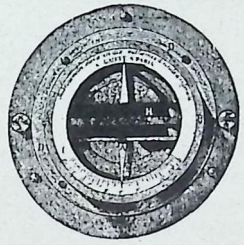


Fig. 469

Este es el más sencillo de los galvanómetros, y de esta manera estaban construídos los primeros aparatos empleados en Medicina. Consistían esencialmente (figs. 468 y 469) en una aguja imantada movible sobre un espigón rodeado por un marco $ABCD$ que lleva el hilo. La aguja ab, estaba provista, mediante un pequeño vástago transversal que atravesaba la parte superior del marco, de un índice mn, movible sobre un cuadrante graduado.

La aguja tenía siempre tendencia a orientarse según el meridiano magnético; cuando se quería hacer uso del instrumento, se hacía girar sobre su soporte la caja en que estaba encerrada, de manera que la aguja estuviese en el cero de la graduación; hecho esto, se hacía pasar la corriente para ver cuál era la desviación producida.

Si se divide en grados el cuadrante sobre el que se desplaza la aguja, se lee la desviación en grados; pero esto

no da ninguna idea del valor real de la corriente, tanto más cuanto que las desviaciones no son proporcionadas a las intensidades: una corriente que dé una desviación de veinte grados, no tiene una intensidad doble de la que produce una desviación de diez grados.

Se hace, pues, una graduación en amperios, o, para los usos médicos, en miliamperios. Esta graduación se hace por comparación, es decir, que se coloca en el mismo circuito el galvanómetro que se quiere graduar y un instrumento ya graduado, se hace pasar la corriente y se marca sobre el galvanómetro que hay que graduar la intensidad que señala el segundo instrumento. La misma operación se repite para las diversas intensidades.

Un galvanómetro así graduado en amperios y miliamperios se dice contrastado, y recibe el nombre de amperímetro o de miliamperímetro. Todos los instrumentos utilizados en la práctica médica deben estar graduados de este modo.

El amperímetro médico que acabamos de describir tiene grandes inconvenientes. En primer lugar, no funciona en cualquiera posición; hemos dicho que es preciso orientarlo para que la aguja esté en el cero cuando no pasa ninguna corriente. Si mientras se utiliza, se le desplaza accidentalmente, es preciso suspender las operaciones para volverle a colocar en el cero. Además, para que sus indicaciones sean exactas, no debe estar sometido a más campo magnético que el terrestre como orientador de la aguja. Si, lo que es frecuente, se encuentra en sus inmediaciones un imán, o hasta hierro, las indicaciones están falseadas. Así, en una sala de hospital, en las inmediaciones de una cama de hierro, siempre se tienen datos erróneos.

Para evitar este inconveniente, se emplean en la actualidad de preferencia galvanómetros de imán fijo. Si, en efecto, el imán movible se desplaza bajo la influencia de una corriente fija, se concibe que, a la inversa, haciendo fijo el imán y la bobina movible, esta última podrá girar sobre un eje cuando sea recorrida por una corriente. Consideremos un marco *ABCD* suspendido por medio de dos hilos metálicos verticales *MN, OP* que servirán para conducir las corrientes a este marco, en el que circulará en el sentido de las flechas (fig. 470). Coloquemos ahora en medio del marco un gran imán *AB*. Sabemos que si

el imán fuera móvil giraría, viniendo *A* delante del papel y *B* detrás. Si está fijo, es el marco el que va a girar, *AC* irá a parar detrás del papel y *BD* vendrá delante. Bastará dotar al marco de una saeta que se desplace sobre un limbo graduado para leer el valor de la desviación. Los hilos *MN, OP* son metálicos, según hemos dicho; sirven, además de su papel conductor, para orientar el marco por su elasticidad, de manera que esté en el cero cuando no es recorrido por una corriente. Cuando este marco sea desviado de su posición, los hilos *MN, OP* se tuercen y oponen al movimiento una fuerza tanto mayor cuanto más pronunciada es la desviación.

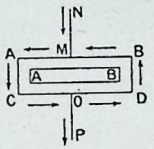


Fig. 470

En general, en lugar de poner en medio del marco un imán *AB*, se coloca un hierro dulce, y el imán es exterior al marco como representa la figura 471.

En estas condiciones, sabido es que el hierro dulce se transforma en imán temporal, mientras esté presente el imán exterior; se tiene así una acción más enérgica a consecuencia de la concentración del campo en las regiones *NS'* y *N'S*.

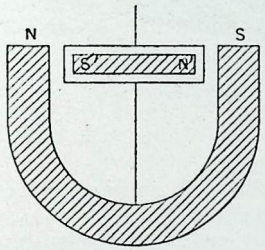


Fig. 471

Semejante galvanómetro no es sensible a las influencias magnéticas exteriores, porque el campo creado por el imán *NS* es talmente poderoso que todas las variaciones exteriores son insensibles.

Los galvanómetros médicos actualmente en uso están todos basados en este principio, no difieren unos de otros más que por detalles de forma, según que estén destinados a quedar fijos o a ser transportados y según las casas constructoras. Claro es que siempre deben estar graduados en miliamperios.

El galvanómetro no sólo debe marcar la intensidad de la corriente, sino también el sentido en que la misma circula. La saeta o el marco movible pueden desviarse hacia la derecha o hacia la izquierda del observador, y en uno y otro caso hay que saber cuál es el borne positivo o negativo del aparato.

Para resolver este pequeño problema, muy importante en la práctica, es necesario hacer una experiencia previa. Se une al galvanómetro una pila, en estas condiciones se sabe dónde está el polo positivo, se marca con el signo + sobre la cabeza del borne, se observa el sentido de la desviación y se le anota mediante una flecha o cualquiera otra indicación. Desde aquel momento, siempre que se utilice el galvanómetro

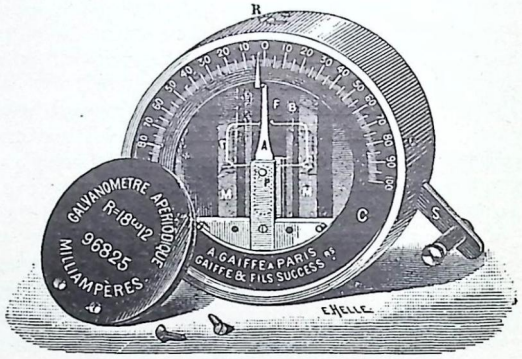


Fig. 472

el sentido de la desviación indicará si el polo positivo está en el borne marcado por el signo + o en el otro borne —.

Cuando se trata de descubrir corrientes extremadamente débiles, los galvanómetros precedentes no bastan, sino que es necesario recurrir a modelos especiales, de los que el más generalizado es el modelo Thomson. He aquí en qué consiste.

Cuando se construye un galvanómetro de imán movible según los principios antes expuestos, la aguja imantada está orientada en el meridiano magnético por el magnetismo terrestre; cuando una corriente atraviesa el instrumento, esta acción terrestre ofrece una resistencia al movimiento de la aguja. Es conveniente disminuir en lo posible el efecto de esta orientación terrestre para que la acción de la corriente sobre la aguja sea más eficaz. Se obtiene este resultado por dos procedimientos aplicados ambos simultáneamente en el gal-

vanómetro de Thomson. El equipo móvil se compone de una primera aguja imantada *ab* unida por un hilo vertical rígido a otra aguja imantada *a'b'*, paralela a la primera, pero cuyos polos están orientados en sentido inverso (fig. 473). De ello resulta que la acción de la tierra sobre *a'b'* es inversa a la ejercida sobre *ab;* si estas dos agujas fueran rigurosamente paralelas e iguales, esta acción sería nula, el equipo no se orientaría. En realidad, semejante igualdad es imposible de obtener, siempre hay un ligero predominio de una o de otra aguja y, por consiguiente, una orientación bajo la influencia de las acciones terrestres, pero las fuerzas en juego están muy reducidas en el equipo. Semejante equipo se llama estático. Además, se coloca por encima o por debajo del galvanómetro, una barra imantada dispuesta de manera que obre sobre el equipo en sentido inverso del magnetismo terrestre. En estas condiciones, el equipo está casi completamente libre, la más ligera fuerza le hará desviar de su posición.

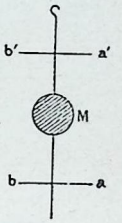


Fig. 473

En lugar de dotar este equipo de una aguja móvil sobre un cuadrante, se fija sobre ella un pequeño espejo convergente *M* (fig. 474), el cual recibe un haz luminoso que parte de un punto *P* y forma una imagen *P'* sobre una regla graduada, como representa la figura, que se supone ésta vista de arriba abajo. Si el pequeño espejo gira un ángulo muy pequeño alrededor de la vertical, la imagen *P'* se desplaza en *P''* sobre la regla graduada en una longitud tanto mayor cuanto más alejada del espejo está la imagen *P'*, es decir, que el espejo tenga una distancia focal mayor. Las menores rotaciones del espejo se leen así con una gran precisión. La imagen puede ser recibida sobre una pantalla para ser mostrada a un gran número de personas en un anfiteatro, o sobre una regla graduada de dimensiones más reducidas, sobre la que las divisiones serán más finas. La figura 475 representa un galvanómetro con equipo movible, provisto de un espejo, delante del que se encuentra una escala. El haz lu-

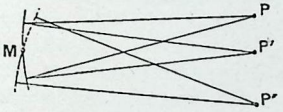


Fig. 474

minoso que parte de una luz colocada al lado de la escala es dirigido sobre el equipo por medio de un espejo inclinado.

Por último, en el Thomson, el hilo está arrollado, de manera que se consiga el máximo de efecto, sobre dos bobinas colocadas frente a frente de las dos agujas. La dirección del

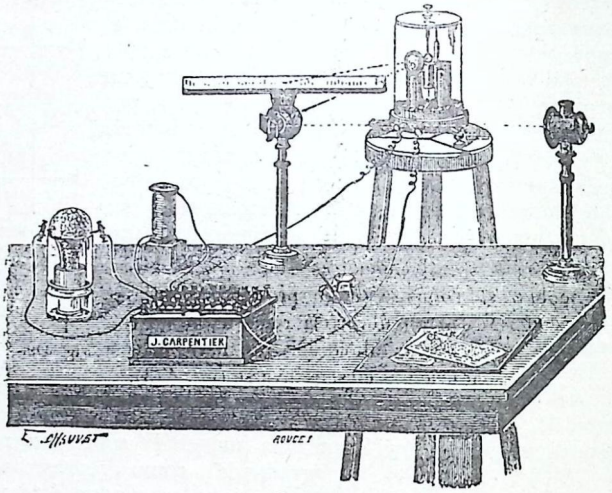


Fig. 475

hilo es inversa sobre las dos bobinas (fig. 476). Es fácil de ver por medio de la regla de Ampère, que en estas condiciones las acciones de la corriente sobre los dos imanes suman sus efectos, es decir, tienden a dar al equipo una desviación en el mismo sentido.

A propósito de este hilo hay que hacer una advertencia. ¿Cómo debe ser, delgado o largo, o grueso y, por consiguiente, forzosamente más corto? Parece, a primera vista, que sea conveniente utilizar un hilo delgado y largo, de modo que se puedan hacer gran número de vueltas de espira, de manera que cada una añada su efecto al de las demás. Esto es cierto, pero aumentando la longitud y la finura del hilo se aumenta la resistencia del galvanómetro; por consiguiente, se

disminuye la intensidad de la corriente. Hay, pues, dos acciones que se contrarrestan: disminución de la intensidad de la corriente, aumento de las vueltas de espiral. La teoría y la experiencia nos demuestran que, según los casos, hay interés en aumentar más o menos la longitud del hilo. A cada caso corresponde un hilo mejor que los demás. En la práctica no es posible tener una serie completa de bobinas, se atiende generalmente a dos casos: un par de bobinas, con hilo muy largo y muy fino y otro par de hilo más grueso. El primer par sirve cuando se debe intercalar el galvanómetro en un circuito ya muy resistente por sí mismo, en el que, por consiguiente, un aumento de resistencia procedente del galvanómetro, no disminuirá sensiblemente la intensidad de la corriente. Es el caso de las investigaciones de electrofisiología propiamente dicha, cuando se quiere descubrir las corrientes producidas por los tejidos animales, cuerpos muy resistentes, por ejemplo, por un nervio colocado en el circuito del galvanómetro. El segundo par de bobinas sirve cuando el circuito a explorar tiene por sí mismo una resistencia muy débil; cuando es, por ejemplo, un par termoeléctrico destinado a medir las variaciones de temperatura de un medio como más adelante veremos.

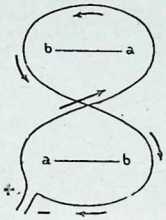


Fig. 476

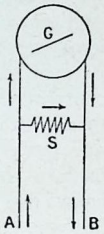


Fig. 477

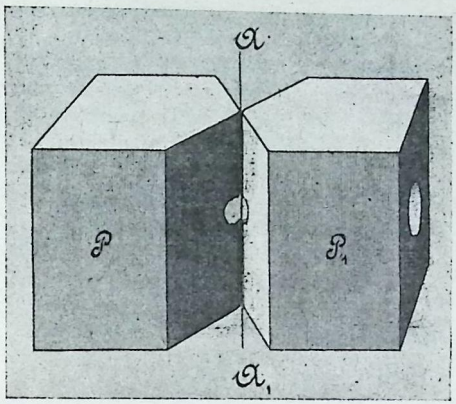
Los galvanómetros médicos destinados a medir las corrientes empleadas en terapéutica son, generalmente, poco resistentes. Tienen, en efecto, una sensibilidad suficiente con un pequeño número de vueltas del hilo, y esta débil resistencia tiene la ventaja de no cambiar las condiciones de resistencia del circuito sobre que se opera.

Ocurre con frecuencia que el galvanómetro de que se dispone es demasiado sensible para las operaciones que se desean realizar. Por ejemplo, no se puede disponer más que de un galvanómetro que marca hasta 10 miliamperios, más allá, la aguja sale de la graduación, y se desea medir hasta 100 miliamperios. Se establece un circuito derivado, es decir, que

entre los bornes del galvanómetro se coloca un hilo S de resistencia conveniente (fig. 477). La corriente, en lugar de pasar por completo por el galvanómetro se divide, una parte pasa por el galvanómetro y otra parte por el circuito derivado, como indica la figura. Si el circuito derivado deja pasar $^9/_{10}$ de la corriente, cuando se lean 5 miliamperios en el galvanómetro, pasará, en realidad, 50 por el circuito principal AB. Con frecuencia, los constructores entregan con los galvanómetros una serie de circuitos derivados que reducen las corrientes a 1/10, 1/100, 1/1000; de lo contrario, ha de preparárselos uno mismo.

Los galvanómetros muy sensibles no están generalmente contrastados. Esto se concibe teniendo en cuenta que las lecturas que se hacen dependen de la distancia focal del espejo que lleva el equipo y todavía más del grado de sensibilidad dada al instrumento por la posición del imán director. En cada caso hay, pues, que contrastar el galvanómetro que poseamos. La experiencia demuestra que no desviándose el equipo mucho del cero, las intensidades son proporcionales a las desviaciones, es decir que, leyendo en la escala 20 divisiones, se tiene una corriente doble de la que da una desviación de 10, y así sucesivamente. Basta, pues, conocer la intensidad, en unidades adoptadas, que corresponden a una desviación cualquiera. He aquí cómo se opera para obtener este resultado. Se pone en el circuito del galvanómetro una pila de la que se conoce la fuerza electromotriz, un Daniell, por ejemplo, que tiene 1,08 voltios. Se intercala también en el circuito una resistencia que será siempre muy grande, dada la gran sensibilidad del instrumento, 1.080,000 ohmios, por ejemplo, y se lee la desviación. Esta desviación corresponderá $\frac{1.08}{1\ 080{,}000}$ = una millonésima de amperio. Más adelante veremos cómo se procura la resistencia conveniente para esta operación. Es bien evidente que en presencia de una resistencia tan enorme no hay necesidad de tener en cuenta, cuando se calcula la intensidad, la resistencia del galvanómetro, y nunca la de la pila, que no pasa de algunas unidades.

Desde hace algunos años, se ha empleado para diversas experiencias de electrofisiología, y hasta ha pasado a la clínica,



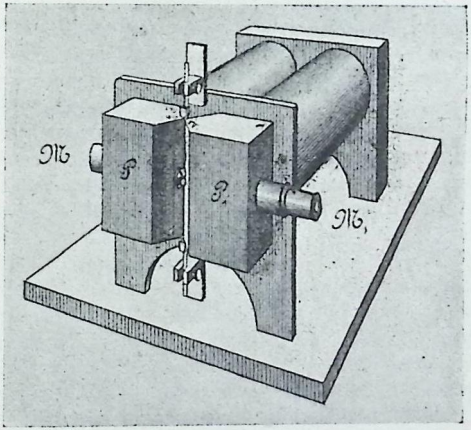


Fig. 478

un nuevo galvanómetro, llamado galvanómetro de cuerda, debido a Einthoven de Leiden.

Este instrumento se compone esencialmente de un hilo conductor muy ligero *AA* (fig. 478) tenso entre los dos polos *PP*, de un electroimán muy poderoso. Cuando este hilo es recorrido por una corriente es desviado de su posición de equilibrio, lo que se aprecia mediante un microscopio *M*. Este galvanómetro tiene una sensibilidad extrema que sobrepasa a la de los mejores Thomson. Además, es muy aperiódico, es decir, que no tiene ningún retardo en sus indicaciones. Proyectando por medio de *M*, la imagen del hilo sobre un papel fotográfico sensible que se desarrolla detrás de una hendidura, se pueden obtener trazados que representen las fluctuaciones más variadas de una corriente que pase por el hilo. En este caso, es preciso un alumbrado muy potente, obtenido por el arco eléctrico y un condensador apropiado, *M*.

Más adelante veremos cómo se ha utilizado este aparato para el estudio de las alteraciones que ocurren en el funcionamiento del corazón.

Diferencias de potencial. — Con frecuencia se tiene que medir la fuerza electromotriz de una pila o de una batería de acumuladores, se utiliza entonces un voltímetro. Supongamos que hacemos pasar la corriente de una pila por un galvanómetro, leeremos cierta desviación, que únicamente dependerá de la intensidad de la corriente. Ahora bien; esta corriente varía con la fuerza electromotriz y la resistencia del circuito según la fórmula $I = \frac{E}{R}$. Basta mirar esta fórmula para comprender que si la resistencia del circuito fuera siempre la misma, la intensidad de la corriente no dependería más que de la fuerza electromotriz. Para una misma fuerza electromotriz, el galvanómetro daría siempre la misma indicación, y se podría graduar en voltios el limbo sobre que se desplaza la aguja. Se obtiene este resultado dando al galvanómetro una resistencia muy grande; en estas condiciones, la resistencia de las diversas pilas que se quieran estudiar no tienen más que un efecto despreciable. Así, demos al galvanómetro una resistencia de 10,000 ohmios, cuando unamos a sus bornes pilas

cuya resistencia sea inferior a 10 ohmios, lo que ocurre ordinariamente en la práctica, la resistencia total del circuito variará entre los límites de 10,000 ohmios, por lo menos, y 10,010 ohmios a lo más; no se tendrán, pues, jamás, errores superiores a 1/1000, es decir, errores insignificantes para esta clase de medidas. El voltímetro es, pues, sencillamente, un galvanómetro muy resistente graduado en voltios; todo galvanómetro muy resistente puede graduarse en voltios y convertirse en un voltímetro.

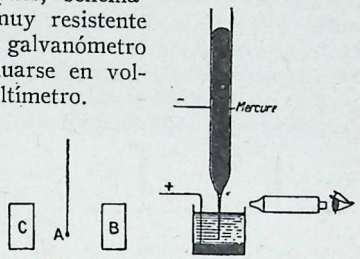


Fig. 480

Algunas veces se desea medir una diferencia de potencial sin consumir corriente a través del aparato de medida, por razones muy variadas, por ejemplo, para no desarreglar las condiciones de un circuito, o porque el manantial que hay que estudiar no puede suministrar corriente sin descargarse; se utiliza entonces un electrómetro. He aquí el principio en que están basados los electrómetros. Tomemos dos cuerpos: uno móvil, *A*, el otro fijo, *B* (fig. 479). Unamos el cuerpo *B* a un manantial eléctrico conocido, tomará cierta carga *M*. Unamos en seguida el cuerpo *A* al manantial que queremos estudiar, tomará también cierta carga *m* y sufrirá por parte de *B*, una repulsión o una atracción que podemos leer en un cuadrante o por medio de un espejo fijo en *A*. Ahora bien; sabemos que la carga que toma *A* es proporcional a un aumento de potencial; esta es una de las leyes fundamentales de la electricidad. Por consiguiente, las atracciones que experimentará *A* por parte de *B*, serán en realidad proporcionales al potencial del cuerpo puesto en relación con *A*. Este es el principio de los electrómetros. En lugar de cargar *B* de una manera constante, se puede cargar *A* con un manantial siempre el mismo y poner *B* en relación con el cuerpo que se desea estudiar; entonces es *B* quien toma una carga proporcional al potencial del cuerpo; el resultado es el mismo. Si ahora tomamos dos cuerpos fijos, *B* y *C* de una parte y de otra *A*, *A* sufrirá la re-

Fig. 479

sultante de las atracciones o repulsiones de C y de B sobre A y la desviación de A dependerá de la diferencia de estas acciones; es decir, de la diferencia del potencial entre C y B, si C y B tienen la misma capacidad eléctrica.

Si se quiere, pues, conocer la diferencia de potencial entre dos cuerpos o dos puntos de un cuerpo, se unen estos dos puntos a B y C, se carga A siempre de la misma manera, y se lee la desviación de A; esta desviación de A será proporcional a la diferencia de potencial entre C y B.

Este es el dispositivo fundamental del que derivan los electrómetros, no difiriendo unos de otros más que por detalles de construcción sobre los que no insistimos, siendo estos aparatos de un uso muy especial en los laboratorios médicos.

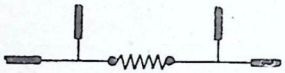


Fig. 481

Existe, no obstante, un instrumento basado en un principio completamente diferente, y cuyo empleo es mucho más general en los laboratorios de fisiología desde hace algunos años, es el electrómetro de Lippmann.

Cuando en un tubo estirado en su parte inferior, se vierte primero agua acidulada, después mercurio, si el estiramiento es bastante capilar, el mercurio no se derrama, ni aun bajo una presión bastante considerable. Se forma un menisco en la punta que se hace sumergir, como indica la figura 480, en un vaso que contiene agua acidulada sobre un fondo de mercurio. Un microscopio permite observar el menisco en la parte capilar. Coloquemos el mercurio del tubo en relación con el polo negativo de una pila y el mercurio del vaso en relación con el polo positivo, inmediatamente apreciamos que el mercurio se eleva en el tubo a una altura variable según la diferencia de potencial entre las dos masas de mercurio. Se puede hacer volver el mercurio al punto primitivo ejerciendo una presión sobre el mercurio del tubo, y la presión necesaria para este efecto es proporcional a la diferencia de potencial estudiado; o bien se puede leer el desplazamiento del menisco.

Este dispositivo es de una grandísima sensibilidad, permite, entre otros, estudiar las diferencias de potencial que se producen entre diversos puntos de los tejidos vivos y ha recibido, desde hace algunos años, numerosas aplicaciones con este fin. Por otra parte, se pueden registrar por la fotografía los movimientos de la columna de mercurio. Una de las grandes ventajas de este instrumento consiste en la rapidez con que se pone en equilibrio, lo que le hace particularmente propio, gracias al registro fotográfico, para el estudio de las variaciones de potencial muy rápidos, que acompañan a ciertos fenómenos fisiológicos, que más adelante expondremos.

Con frecuencia, en los laboratorios, se necesita un patrón de fuerza electromotriz para graduar un aparato de medida. Lo mejor es montar con cuidado un elemento Daniell y atribuirle una fuerza electromotriz de 1,08 voltios. El error que se puede cometer así es muy ligero para que tenga importancia en las investigaciones fisiológicas.

Cuando se tienen que medir potenciales extremadamente elevados, como los producidos por las máquinas estáticas, el problema se hace bastante delicado. En la práctica de electroterapia hay que contentarse en tal caso, la mayor parte de las veces, con una evaluación aproximada. Se hacen saltar chispas entre las bolas del excitador unido a la máquina, y se separan poco a poco estas bolas hasta el límite en que las chispas dejan de producirse. Cuanto mayor es esta distancia, mayor es la diferencia de potencial entre las dos bolas. Una tabla da los valores de los potenciales correspondientes a las diferentes longitudes de chispa. Esta tabla no sirve para todas las máquinas, porque los resultados dependen, entre otras causas, del diámetro de las bolas del excitador.

Resistencias. — Cuando se tiene necesidad de conocer aproximadamente una resistencia, se la puede deducir de la fórmula $I = \frac{V}{R}$ que se escribe $R = \frac{V}{I}$. Se hace entonces pasar una corriente por la resistencia a medir, y se evalúa la intensidad de la corriente por medio de una amperímetro. Por otra parte, se mide por medio de un voltímetro, la fuerza electromotriz empleada. Dividiendo esta fuerza electromotriz por la intensidad, se tiene la resistencia. Así, supongamos que con un voltímetro hayamos medido la fuerza electromotriz

de una pila y encontrado 15 voltios, uniendo esta pila a un circuito en el que se encuentra un miliamperímetro, se encuentran 3 miliamperios; se escriben 0,003. La resistencia del circuito será $\frac{15}{0{,}003} = 5{,}000$ ohmios. Este método es empleado con frecuencia, durante una aplicación de corriente al cuerpo humano, para medir la resistencia de los tejidos atravesados por la corriente.

Es mucho más exacto comparar directamente las resistencias que se han de estudiar con resistencias de valor conocido, como en las pesadas se compara el peso de los cuerpos con los pesos de otros cuerpos determinados. Con este fin, se utilizan cajas de resistencias como para las pesadas, se tienen cajas de pesas. En estas cajas se encuentran dispuestas una serie de resistencias que, convenientemente asociadas, pueden dar todos los intermediarios, entre un mínimum de 1 ohmio, por ejemplo, y un máximum variable según las cajas; basta, para comprender esto, considerar la composición de las cajas de pesas. He aquí cómo están dispuestas las diversas resistencias para poder combinar unas con otras. Sobre una plancha de ebonita (fig. 482) se encuentran una serie de botones metálicos aislados unos de otros. Debajo de la plancha, en la caja, están las bobinas *A, B, C, D,* etc., unidas unas a otras en serie. El punto de unión de dos bobinas está también en comunicación con un botón. En el caso de la figura 482, si se ponen los botones extremos en relación con una pila, la corriente está obligada a atravesar todas las bobinas; pasa, pues, por todas las resistencias. Si se intercala ahora una clavija metálica entre dos botones, la corriente pasa por la clavija, la bobina unida a estos dos botones queda fuera de servicio, su resistencia queda descontada. Se puede, pues, retirando un número apropiado de clavijas, poner en el circuito las bobinas que se desee. Colocando todas las clavijas entre los botones, no se tiene más que la resistencia de estos botones y de las clavijas, es decir, una resistencia despreciable.

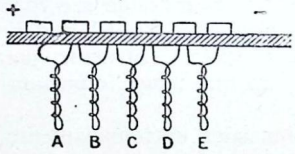


Fig. 482

He aquí ahora cómo se puede emplear semejante caja para medir una resistencia. Se coloca en un mismo circuito una pila, un galvanómetro y la resistencia que se desea medir. Se lee la desviación del galvanómetro, que no tiene necesidad de ser contrastado. Se retira del circuito la resistencia que se ha de estudiar y se la reemplaza por una caja de la que se irán quitando las clavijas hasta conseguir la misma desviación del galvanómetro. En este momento, como la corriente es llevada a su intensidad primitiva, es evidente que la resistencia

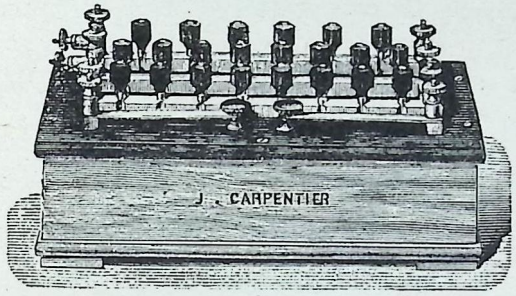


Fig. 483

del circuito no ha cambiado. El valor de la caja en este momento representa la resistencia estudiada, no hay, pues, más que leer la resistencia de la caja, es decir, hacer la suma de las resistencias correspondientes a las clavijas retiradas.

Este método tiene un inconveniente: si durante la substitución de la caja a la resistencia en estudio, la fuerza electromotriz de la pila ha cambiado, los resultados son erróneos. Por esto se emplea en general, de preferencia, el método llamado puente Wheatstone. He aquí en qué consiste. Coloquemos en las cuatro ramas de un cuadrilátero la resistencia x que se quiere determinar, y tres resistencias que se pueden conocer, por ejemplo, cajas contrastadas R, R_1, R_2. Unamos los extremos de una de las dos diagonales a una pila P, y las extremidades de la otra diagonal a un galvanómetro G.

Retiremos ahora las clavijas de las cajas hasta que el

galvanómetro G marque cero. Está demostrado que en este momento las cuatro resistencias x, R, R_1, R_2 están la relación $\frac{x}{R_2}=\frac{R_1}{R}$. Como se conocen R, R_1, R_2, se puede calcular x.

Cuando se quieren aplicar los procedimientos habituales de medida a la determinación de la resistencia del cuerpo humano o de los tejidos vivos, se tropieza con grandes dificultades que resultan de una serie de modificaciones que se producen en estos tejidos bajo la influencia de la corriente. Una de las principales de estas dificultades reside en la existencia

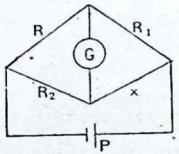


Fig. 484

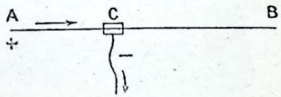


Fig. 485

de la polarización, de que más adelante nos ocuparemos, que introduce resistencias ficticias.

Para descartar esta polarización, se han querido hacer mediciones, utilizando, en lugar de corrientes continuas, corrientes alternativas que no dan lugar a la polarización. En el método del puente de Wheatstone, empleando la corriente alternativa, es decir, reemplazando la pila por una bobina de inducción, no se puede emplear el galvanómetro para ver si la diagonal G es asiento de alguna corriente. Se reemplaza entonces el galvanómetro por un aparato sensible a las corrientes alternativas: el teléfono. Cuando este teléfono está en silencio, está establecido el equilibrio del puente, como precedentemente, y la relación $\frac{x}{R_2}=\frac{R}{R_1}$ está cumplida. Este método es muy precioso para hacer mediciones de resistencia en todos los casos en que se desea descartar la polarización.

En las aplicaciones de la electroterapia, se ha de hacer uso con frecuencia de resistencias variables a voluntad, ya para practicar mediciones, ya para graduar la intensidad de las corrientes.

Siendo un poco complicado el manejo de las cajas, se prefiere renunciar a su gran exactitud para ganar en comodidad; se hace entonces uso de reostatos.

El tipo del reostato es un hilo conductor AB (fig. 485), del que un extremo A está en relación con un lado del circuito por el que debe pasar la corriente, la que vuelve a este mismo circuito por un cursor C, en el sentido indicado por las flechas. Es evidente que desplazando el cursor se hará variar la resistencia, aumentando cuando vaya de A hacia B, disminuyendo en los desplazamientos hechos en sentido contrario.

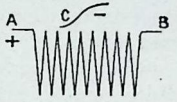


Fig. 486

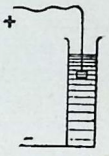


Fig. 487

Cuando se quiere constituir semejante reostato por un hilo metálico rectilíneo, se comprueba pronto que se está muy limitado en las variaciones de resistencia que se pueden obtener, so pena de tener hilos de longitud desmesurada. Se sortea la dificultad por diversos procedimientos puestos en práctica en los diferentes modelos de reostatos. Se puede, como indica la figura 486, disponer el hilo en espiral o en línea quebrada para tener una gran longitud, el cursor C frotará entonces sobre una parte puesta al descubierto. En este caso no se tiene una variación de resistencia completamente continua, porque de pronto se introduce en el circuito una espira entera de hilo, pero en muchos casos esto no tiene importancia.

Puédese disponer el reostato en conductor rectilíneo eligiendo una materia relativamente poco conductora, como el grafito; estos aparatos son de calidad mediocre y sujetos a variación.

Por último, podemos utilizar líquidos. Por ejemplo, en un tubo vertical se pone una solución de sulfato de cobre, la parte inferior del tubo contiene una placa de cobre que conduce al circuito. En la parte superior se encuentra una pieza también de cobre, sumergida en el líquido, que viene de la otra extremidad del circuito (fig. 487). Hundiendo más o menos esta pieza, se hace variar la longitud de la columna líquida interpuesta y, por consiguiente, la resistencia del circuito. Gracias a la gran resistencia de los líquidos, esta variación puede ser muy considerable.

Sabido es que, para un conductor metálico o líquido, la resistencia eléctrica es una magnitud bien determinada, como el peso o el volumen. No obstante, esta resistencia varía con la temperatura, se hace mayor para los conductores metálicos cuando la temperatura se eleva, y se hace, por el contrario, más débil para los líquidos.

Cuando se practican mediciones de resistencia de los tejidos organizados, y en particular del cuerpo humano, no es lo mismo; se aprecian variaciones, en ocasiones considerables, sin causas aparentes. Así, midiendo la resistencia que experimenta una corriente pasando de una mano a otra, se encuentran en una misma persona, en las mismas condiciones experimentales, cifras que varían de un día a otro. Como ejemplo, y para poder apreciar la amplitud de estas variaciones, he aquí un pequeño cuadro referente a cuatro personas con las resistencias mayores y menores encontradas en ellas en diversos días, estando practicadas las mediciones de una a otra mano en las mismas condiciones:

S	1080 a 1460	ohms.
M	1050 a 1580	—
H	1060 a 1580	—
L	1100 a 1760	—

La resistencia eléctrica es generalmente un poco más elevada en las mujeres que en los hombres; la media en las primeras es, en efecto, aproximadamente, de 1,400 a 1,500 ohmios de una mano a otra, mientras que desciende a 1,200-1,300 ohmios en los segundos. Esto parece bastante paradójico, porque numerosas experiencias han demostrado que la resistencia del cuerpo humano reside en gran parte en la piel, y no pasa por más fina la del hombre que la de la mujer. Sea de ello lo que fuere, el hecho no es dudoso.

La temperatura desempeña un papel muy claro: cuanto más se eleva, más baja la resistencia. En todas estas medidas hay que tener cuidado de establecer contacto con el cuerpo por intermedio de un líquido; es decir, que se hace sumergir las manos en cristalizadores que contengan agua a una temperatura próxima a la del cuerpo humano. Además, las manos deben haber sido previamente lavadas con jabón y acepilladas. Por no tomar estas precauciones, se obtienen cifras de lo más disparatadas. Así, estableciendo el contacto por medio de trozos de metal, de latón, por ejemplo, cogidos con toda la mano, se puede ver subir la resistencia a 100,000 ohmios y más, a consecuencia de la sequedad mayor o menor de la piel o de las materias grasas de que siempre está un poco impregnada.

Esta resistencia varía, por lo demás, a voluntad, apretando más o menos los electrodos.

Cuando la corriente atraviesa los tejidos durante cierto tiempo, la resistencia baja poco a poco, sin duda a consecuencia de acciones electrolíticas que tienen lugar en los tejidos y en particular en la piel, que está en contacto con los electrodos.

Por último, hay un hecho especial de los tejidos organizados, y es que la resistencia varía en grandes proporciones con la intensidad de la corriente. El pequeño cuadro siguiente podrá dar una idea de estas variaciones con la intensidad.

Intensidad	Resistencia	
5	1570	ohmios
10	1350	—
23	1160	—
10	1260	—
6	1340	—

En este ejemplo se ve el efecto de la duración del paso de la corriente, superponer su acción a la de la intensidad, porque, volviendo a las mismas intensidades al final de la experiencia, se encuentran resistencias más pequeñas que al principio.

Cantidades. — Pueden presentarse dos casos completamente distintos cuando se quieren evaluar cantidades de electricidad: o bien se trata de determinar la cantidad de electricidad que pasa a través de un circuito durante un tiempo dado, o bien es necesario determinar la cantidad de electricidad estática que se encuentra en un cuerpo conductor aislado.

En el primer caso, se intercala un galvanómetro en el circuito, se ve la intensidad y se multiplica por el número de se-

gundos durante los que ha pasado la corriente; esto resulta de la fórmula general dada precedentemente $Q = It$.

Así, si una corriente de 0,5 amperios ha pasado durante 30 segundos, ha pasado en el circuito 15 culombios. Puede ocurrir que la corriente no permanezca constante durante toda la duración del paso, es preciso entonces dividir esta duración en períodos más pequeños, durante los que la corriente puede ser considerada como constante, y calcular la cantidad de electricidad que pasa durante cada uno de estos períodos.

El procedimiento que precede es uno de los más cómodos para la práctica médica, tanto más cuanto que en este caso basta, en general, con una aproximación bastante pequeña. Se puede, no obstante, por una sola lectura, ser informado sobre la cantidad de electricidad que ha pasado por un circuito, para ello se intercala en este circuito un voltímetro, es decir, un aparato de descomposición del agua que permita recoger los gases procedentes de esta descomposición. Sabiendo que 1 culombio desprende 12 cm.^{3} de hidrógeno, basta medir en un tubo graduado el número de centímetros cúbicos de hidrógeno desprendidos por una corriente para tener el número de culombios que han pasado. Se puede hasta graduar en culombios el tubo en el que se desprende el hidrógeno.

En el segundo caso, cuando se quiere evaluar la cantidad de electricidad que se encuentra en un conductor aislado cargado, se descarga a través del hilo de un galvanómetro balístico. La desviación producida es proporcional a la cantidad de electricidad que ha pasado. Un galvanómetro balístico es cualquier galvanómetro con equipo móvil bastante pesado; la teoría y la experiencia demuestran que únicamente con esta condición las cantidades de electricidad son proporcionales a las elongaciones, es decir, a la amplitud de las oscilaciones que siguen inmediatamente a la descarga. Basta, de una vez para siempre, contrastar el aparato descargando en su circuito una cantidad conocida de electricidad y observando la elongación correspondiente, para poderlo utilizar en todas las determinaciones de cantidad de electricidad. A propósito de la capacidad de los cuerpos, veremos cómo se puede uno procurar una cantidad conocida de electricidad, necesaria para este contraste.

Capacidades. — Es raro que se tengan que hacer mediciones de capacidad eléctrica. Si el caso se presenta, he aquí cómo se debe operar. Se cargará el cuerpo por medio de un manantial eléctrico determinado y se le descargará a través de un galvanómetro balístico; y se leerá la desviación. Se repetirá la misma operación con un cuerpo de capacidad conocida, cargándolo con el mismo potencial, y de la comparación de las dos desviaciones se deducirá la capacidad del primer cuerpo. Por ejemplo, coloquemos el cuerpo que deseamos estudiar en relación con el polo positivo de una pila de Daniell, cuyo otro polo está en comunicación con la tierra; el cuerpo se cargará con un potencial de 1,08 por encima del de la tierra. Tomará por ello una cantidad de electricidad proporcional a su capacidad. Le descargamos en un galvanómetro balístico y da una desviación de 20 divisiones. Recomencemos con un cuerpo que tenga la unidad de capacidad, nos dará, por ejemplo, una desviación de 10 divisiones. Resultará que, en las mismas condiciones, tomando doble electricidad que el cuerpo de capacidad igual a la unidad, tiene, pues, dos unidades de capacidad.

Es preciso, pues, tener a mano unidades de capacidad; sirven para realizar mediciones como hemos dicho, pero son todavía mucho más empleadas para almacenar cantidades variables de electricidad de la que se hará uso en las experiencias. Así, si se quiere excitar un nervio o un músculo con cantidades de electricidad crecientes, de valor conocido, se tomarán capacidades conocidas, de valores crecientes, que se cargarán con un mismo potencial y que se descargarán después en el nervio. O bien; se tomará una misma capacidad, que se cargará con potenciales variables; en este caso, también crecerá la cantidad con el potencial, como hemos visto al establecer las fórmulas elementales de la electricidad.

Para tener cuerpos de diferentes capacidades se podrían tomar esferas u otros conductores aislados sobre un pie de cristal y de dimensiones crecientes. En un momento dado, se ha operado de esta manera; pero se llega así a un aparato embarazoso en extremo, tanto más cuanto que las esferas de diámetro aceptable tienen una capacidad demasiado débil para las necesidades habituales. Se ha recurrido por ello a los conden-

sadores. Los condensadores en uso en los laboratorios o en la práctica de la electroterapia están constituídos por dos hojas de estaño llamadas armaduras, separadas por un aislador, mica, papel parafinado u otra preparación. Una de las armaduras está puesta en comunicación con el suelo, la otra con el manantial de electricidad. Se descarga después esta segunda armadura poniéndola en comunicación con el cuerpo que hay que electrizar, unido a su vez con el suelo. En general, la experiencia se dispone como indica

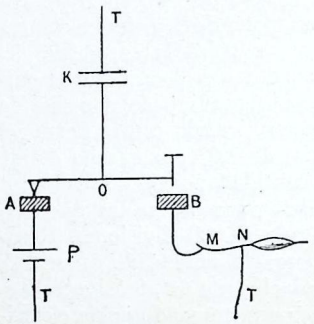


Fig. 488

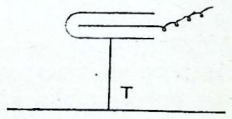


Fig. 489

la figura 488. El condensador K tiene una armadura unida a tierra T, la otra armadura está unida al eje O de una llave de Morse. En el reposo, la llave descansa sobre un botón A, en relación con el polo positivo de una pila P, cuyo otro polo está en comunicación con la tierra. El condensador se carga. Si se baja la llave, se rompe el contacto con la pila en A, pero se establece un contacto en B y el condensador se descarga en tierra a través de MN, que en el ejemplo figura el nervio ciático de una rana.

Es sabido, por lo que se enseña en los tratados de física generales, que el condensador tiene, bajo un pequeño volumen, una gran capacidad. Con frecuencia la armadura en relación con la tierra rodea completamente la que se pone en comunicación con el manantial de potencial (fig. 489), por esto se les designa con el nombre de armadura interna y externa. Este caso se presenta en la botella de Leiden; los condensadores de laboratorio de hoja de mica o de papel parafinado, están construídos de esta manera.

La unidad práctica que habitualmente se utiliza es el microfaradio, equivalente a $\frac{1}{1\,000\,000}$ de faradio. Esta es ya una capacidad muy considerable y los condensadores de los laboratorios son, de ordinario, divisiones decimales del microfaradio. Para excitar nervios o músculos, se emplea $\frac{1}{1000}$, $\frac{1}{100}$ lo más $\frac{1}{10}$ de microfaradio. Pero es bueno tener a mano una serie de condensadores como se tiene una serie de resistencias. Estas series son muy delicadas de establecer y no hay que recurrir más que a buenos fabricantes para su construcción; en los laboratorios hay muchas malas cajas de condensadores.

Como antes hemos dicho, cuando se hace uso de condensadores para acumular diferentes cantidades de electricidad, se puede operar de dos maneras: o bien se puede tomar una serie de condensadores que se carga al mismo potencial, o bien se puede tomar un mismo condensador que se carga con potenciales crecientes.

Así, tomemos condensadores de 1, 2, 3, etc. unidades y carguémosles con la unidad de potencial, tendremos cantidades de electricidad representadas por 1, 2, 3, etc. unidades, según la fórmula elemental $Q = CV$. Tomemos ahora el primer condensador de una unidad, y carguémosle sucesivamente con un potencial de 1, 2, 3, etc. unidades, tendremos también, según la misma fórmula, cantidades de electricidad representadas por 1, 2, 3, etc. unidades. Sin embargo, el resultado no es el mismo. En el primer caso obtendremos cantidades de electricidad al mismo potencial, en el segundo, al mismo tiempo que aumentará la cantidad de electricidad, aumentará también el potencial. Recordemos que hemos demostrado, a propósito del calor, que una misma cantidad de calor no goza de las mismas propiedades, según la temperatura a que se encuentra; una caloría a 100 grados no puede dar lo que da una caloría a 1,000 grados. De la misma manera, la cantidad de electricidad representada antes por 3 unidades, no está en la misma condición según que esté al potencial 1 o al potencial 3. Está demostrado que si se descargan los condensadores a través de un hilo, el calor desprendido y, por consiguiente, la energía equivalente, crece con el cuadrado del potencial al que es llevado el condensador.

En consecuencia, cuando se acumula electricidad en condensadores de capacidad creciente, pero de potencial constante, la energía disponible crece, en el caso antes estudiado, como 1, 2, 3, etc. Si, por el contrario, se tiene un condensador de capacidad constante cuando se hace variar el potencial para acumular sucesivamente cantidades de electricidad crecientes, como 1, 2, 3, etc., la energía almacenada, y que se libera a la descarga, crece como 1, 4, 9, etc.

No es, pues, indiferente emplear una u otra de estas soluciones; veremos, por lo demás, la importancia de este hecho a propósito de la excitación eléctrica de los nervios y de los músculos.

XII. — Electricidad producida por los animales

Si se aplica sobre un tejido dos electrodos unidos a un galvanómetro sensible, se tiene siempre la indicación de una corriente, a menos de colocarse en condiciones especiales indicadas más adelante.

Para tener certeza de que esta corriente procede realmente de los tejidos y no de los electrodos, es preciso, ante todo, comprobar que los electrodos aplicados directamente uno contra otro no dan lugar por sí solos a ninguna acción. Esta condición es más difícil de realizar de lo que parece a primera vista, cuando se hace entrar líquidos en la construcción de estos electrodos. No se puede, en la exploración de los tejidos, emplear pura y simplemente electrodos metálicos; si se tomasen dos hilos de platino unidos a un galvanómetro muy sensible, inmediatamente después del paso de la menor corriente por el circuito los hilos quedarían polarizados y todas las indicaciones estarían falseadas, se produciría, además, al contacto del platino y de los tejidos, alteraciones que, aunque algunas veces ligeras, darían lugar a errores importantes en investigaciones tan delicadas como las que conciernen a la producción de electricidad por los tejidos organizados.

Es preciso, pues, siempre, esto es absolutamente indispensable, en todas las investigaciones de electrofisiología, no utilizar más que electrodos construídos con arreglo a los tipos siguientes, llamados impolarizables.

No se puede poner en contacto de los tejidos ningún líquido sin riesgo de alterarlos, este contacto debe realizarse mediante una solución de cloruro de sodio del 7 al 10 por 1,000. Por otra parte, no se puede poner el hilo metálico unido al galvanómetro en contacto con esta solución, se producirían por este contacto fenómenos de polarización. Veremos, a propósito de la electrolisis que, para evitar estos fenómenos de polarización, se debe siempre sumergir un metal en una solución de una sal de este mismo metal; por ejemplo, se podrá unir el hilo del galvanómetro a un cilindro de zinc sumergido en una solución de sulfato de zinc, a su vez en contacto con

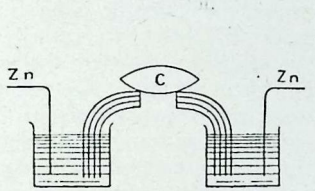


Fig. 490

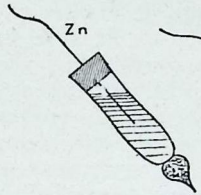


Fig. 491

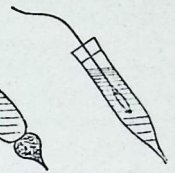


Fig. 492

la solución de cloruro de sodio, con la que se tocarán los tejidos organizados. La primera idea de estos electrodos es debida a J. Regnault, y Du Bois-Reymond es el que ha hecho de ellos un uso sistemático.

He aquí, en consecuencia, cómo se dispone la experiencia, en sus grandes líneas, por lo menos. Dos láminas de zinc puro están unidas a los bornes de un galvanómetro muy sensible. Cada una de ellas está sumergida en un vaso que contiene una solución concentrada de sulfato de zinc. Sobre el borde del vaso está apoyado un pequeño bloque de papel filtro, embebido de una solución de cloruro de sodio al 7 por 1,000, y sobre este bloque descansa el tejido *C*, que se ha de explorar. Si este tejido es asiento de una fuerza electromotriz, envía una corriente a través de un galvanómetro, sin que pueda producirse ninguna polarización en el circuito.

Esta forma de electrodos no puede servir cuando se quiere tocar un punto muy localizado de un órgano; se puede entonces, como indica la figura 491, sumergir un pequeño cilindro de zinc puro en un tubo que contenga la solución de

sulfato de zinc y tapado en la parte inferior por un tapón de arcilla amasada con la solución de cloruro de sodio al 7 por 1,000. Esta arcilla toma entre los dedos la forma que se le quiere dar; es, por lo tanto, muy fácil hacer una punta muy afilada, que permita un contacto en un punto muy limitado de los tejidos. El fundamento de los electrodos es el mismo que precedentemente; en cada caso particular, se puede, por lo demás, con un poco de imaginación, encontrar la forma más apropiada para las experiencias. D'Arsonval ha propuesto otro modelo que consiste sencillamente en un tubo estirado a la lámpara (fig. 492), que contiene una solución de cloruro de sodio en la que se sumerge un pequeño cilindro de plata recubierto de cloruro de plata fundido. En principio, como el metal está en contacto con una de sus sales, no debe haber polarización, pero prácticamente no ocurre así, estos electrodos no valen tanto como los precedentes; sin embargo, como son de una construcción fácil y de un empleo muy cómodo, pueden utilizarse en las experiencias en que no se pretende alcanzar el más alto grado de precisión posible. Tienen también el inconveniente de tener una gran resistencia eléctrica a consecuencia de la capa de cloruro de plata, poco conductora.

En lo que sigue, no nos ocuparemos más de esta cuestión de electrodos, que se supondrá siempre que son excelentes.

Cuando se explora cualquier tejido vivo, se aprecia siempre la existencia de corrientes que van de un sitio a otro de estos tejidos, pero hay casos en que estas corrientes se producen con una regularidad notable y responden a ciertas leyes que han sido formuladas por Du Bois-Reymond.

Músculos y nervios. — Consideremos un músculo de fibras paralelas entre sí, cortemos de él un prisma por dos secciones perpendiculares a las fibras; aplicando un electrodo sobre la cara lateral y otro sobre una de las bases, apreciaremos la existencia de una corriente que va en el galvanómetro de la superficie lateral a la base, como representa la figura 493. Resulta, pues, que en el interior del músculo la corriente debe ir de la superficie de sección a la superficie lateral. Este prisma muscular da, pues, una corriente como lo haría una pila, conduciéndose la sección transversal como el zinc y la superficie

lateral como el polo positivo, cobre, platino, carbón, etc. Si se colocan los electrodos sobre la base o sobre la superficie lateral, se aprecia que la intensidad de la corriente varía, el potencial no es el mismo en todos los puntos de la superficie lateral o en todos los puntos de la superficie de sección. El potencial máximo está en medio de la superficie lateral, a lo largo de una línea trazada sobre el contorno, pa-

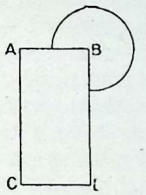


Fig. 493

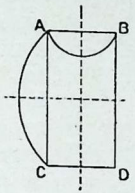


Fig. 494

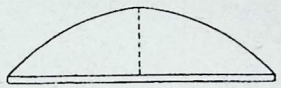


Fig. 495

ralelamente a las bases, el potencial mínimo está en medio de estas bases. Se puede representar esquemáticamente la distribución de potencial en la superficie del prisma muscular como se ha hecho en la figura 494.

Esta distribución simétrica varía cuando las dos bases no están cortadas perpendicularmente a las fibras, sino oblicuamente a ellas. No hay necesidad de insistir sobre este punto. La distribución de potenciales se hace todavía más complicada cuando se toma un músculo de fibras no paralelas entre sí, como el gastronemio de la rana, pero esto son cuestiones de detalle; lo necesario es recordar los hechos más salientes que acabamos de enunciar.

Si, en lugar de tomar un músculo, se toma un nervio y se le limita por dos secciones, se tiene un prisma nervioso análogo al prisma muscular precedentemente estudiado. Se observa que semejante prisma nervioso es asiento de manifestaciones eléctricas absolutamente comparables a las de los músculos. Es decir, que hay un máximo de potencial en medio del nervio. Es bastante difícil estudiar la distribución del potencial sobre las bases generalmente muy pequeñas. Resulta de esta distribución de los potenciales que, como para el músculo, aplicando un electrodo sobre la superficie lateral

del nervio y otro sobre la base, se tiene una corriente que va en el galvanómetro de la superficie lateral a la base.

Notemos, además, que si, sea sobre un músculo, sea sobre un nervio, se colocan dos electrodos de modo que no estén a la misma distancia del medio de la superficie lateral o del medio de la base, se tendrá una corriente para la que es fácil de prever, en cada caso, la dirección y hasta de formarse una idea de su intensidad relativa. La corriente más fuerte se producirá cuando los electrodos estén en *A* y en *B* (fig. 496), irá en el galvanómetro de *B* a *A*. Si los dos electrodos están sobre la base en *C* y *D*, la corriente irá del punto *C*, el más alejado del medio *A*, al punto *D*, el más próximo. Si los dos electrodos están sobre la superficie lateral en *E* y *F*, la corriente irá del punto *E*, el más próximo del medio *B*, al punto *F*, el más alejado de este punto. Esto resulta de la misma distribución de potenciales.

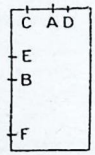


Fig. 496

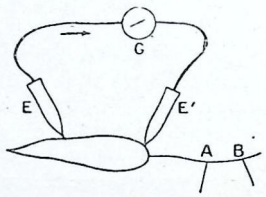


Fig. 497

Según Du Bois-Reymond, habría que considerar también como secciones transversales de los músculos las superficies de inserción sobre los tendones en sus extremidades, y colocando un electrodo sobre la superficie lateral de este músculo, el otro sobre el tendón, se tiene una corriente que va de la primera a la segunda en el circuito exterior. Sobre todo músculo se apreciará una corriente, a menos que los dos electrodos estén precisamente colocados en dos puntos del mismo potencial.

Los fenómenos que acabamos de estudiar son conocidos con el nombre de corrientes de reposo, es decir, que se manifiestan fuera de toda excitación llevada sobre el nervio y de toda contracción del músculo. Pero las cosas van a cambiar en cuanto los órganos entren en actividad.

Apliquemos sobre cualquier músculo, el gastronemio de la rana; conviene mucho para esta experiencia, dos electrodos impolarizables *E*, *E'*, unidos a los bornes de un galvanómetro

G, muy sensible (fig. 497). Observaremos una desviación. Llevemos ahora sobre el nervio que inerva este músculo, por medio de los electrodos cualesquiera *A* y *B*, la excitación producida por la corriente alternativa de una bobina de inducción. El músculo entrará en tétanos, se acortará y al mismo tiempo se verá disminuir la desviación del galvanómetro, lo que indica una disminución de la corriente primitiva. Esta corriente ha sufrido, según frase de Du Bois-Reymond, la oscilación negativa.

La misma oscilación negativa se pone en evidencia sobre el nervio (fig. 498). Si sobre un nervio escindido se aplican dos electrodos, uno en las inmediaciones de la sección terminal, el otro en un punto de su trayecto, se tiene, como es sabido, una corriente de reposo. Si ahora, con ayuda de dos electrodos *A* y *B* unidos a una bobina de inducción se tetaniza el nervio, se observa una oscilación negativa análoga a la que hemos señalado antes para el músculo.

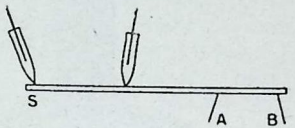


Fig. 498

Du Bois-Reymond ha intentado demostrar, por una experiencia célebre y ya muy antigua, la oscilación negativa en el hombre: he aquí cómo operaba para ello. Dos cristalizadores que contienen agua salada están en comunicación con un galvanómetro mediante electrodos impolarizables (fig. 499). El sujeto sumerge los dedos de la mano derecha en un cristalizador y los dedos de la mano izquierda en el otro; se tiene así generalmente una pequeñísima desviación, a consecuencia de ligeras desigualdades de los dos lados, dependientes de causas que es difícil precisar. Hecho esto, se contrae lo más fuertemente posible uno de los brazos, inmediatamente se ve al galvanómetro acusar una desviación que corresponde a una corriente que va de la mano al hombro en el brazo contraído.

Desgraciadamente, esta experiencia está muy lejos de ser probatoria. Se le pueden hacer diversas objeciones, de las que una de las más graves es que, a consecuencia de la contracción, la circulación, las secreciones de la piel, etc., están modificadas y que a estas modificaciones hay que atribuir la corriente. La demostración rigurosa de la oscilación nega-

tiva en el hombre no se ha hecho sino posteriormente por L. Hermann.

Du Bois-Reymond ha querido explicar los diversos fenómenos de la electricidad animal por una teoría, en la que suponía los tejidos compuestos de partículas cargadas en sus

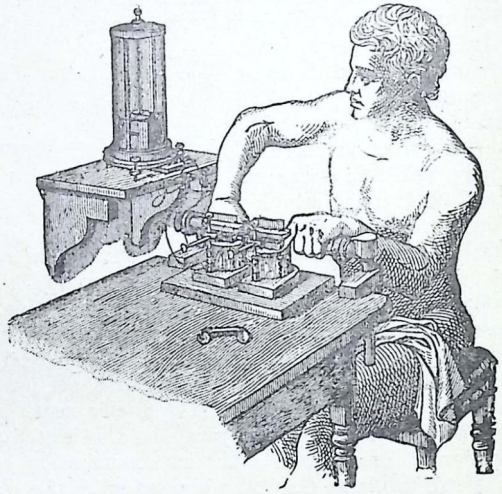


Fig. 499

diversas partes, ya negativa, ya positivamente; las partículas estarían normalmente orientadas, de manera que sus capas negativas estarían dirigidas hacia las extremidades del músculo o del nervio y sus capas positivas hacia las partes laterales. En el momento de la excitación, la entrada en actividad del nervio o del músculo se acompañaría de una rotación de estas partículas que ocasionarían otra distribución de las superficies cargadas positiva y negativamente y, por consiguiente, un cambio en las corrientes obtenidas, uniendo a través del galvanómetro dos puntos de la superficie del músculo.

Tal es, resumida rápidamente, la llamada teoría molecular de Du Bois-Reymond; actualmente, puede decirse que no es

aceptada por nadie, y está reemplazada por la teoría de la alteración de L. Hermann.

Según este sabio, y la mayor parte de los trabajos ejecutados posteriormente confirman esta manera de ver, un músculo o un nervio completamente intacto no presentaría ninguna diferencia de potencial en sus diversos puntos y, por lo tanto, no daría ninguna corriente cuando se le aplicaran dos electrodos unidos a los bornes de un galvanómetro sensible. La dificultad está en hacer las preparaciones sin alterar en nada los tejidos, sin herirlos, sin tocarlos con ningún líquido nocivo. Desde este punto de vista, el jugo muscular acidificado en contacto del aire, las secreciones de la piel, etc., son particularmente de temer.

En cuanto en un punto se produce la menor lesión, este punto se convierte en negativo con relación a las otras regiones del tejido sometido a la experiencia. Esto es lo que explica porqué la sección de un nervio o de un músculo es negativa; inmediatamente después de realizada esta operación, el nervio o el músculo comienzan a alterarse en los puntos seccionados. Pero no es necesario un traumatismo tan brutal, la menor acción nociva basta para dar lugar a una corriente, por lo que la experiencia es difícil que resulte bien. Se ha intentado vanamente, para resolver la cuestión mediante una experiencia definitiva y estar cierto de no perjudicar a los músculos, explorarlos a través de la piel, pero en la rana, animal de elección para estas investigaciones, y también en los otros animales, la piel es el asiento de fuerzas electromotrices especiales, que vienen a obscurecer los resultados, debidas a las diferentes glándulas que se encuentran en el espesor de esta piel. Sea de ello lo que fuere, el hecho se considera generalmente como establecido; un músculo o un nervio intacto no da corriente; si está lesionado en un punto, este punto se hace negativo con relación al resto del órgano, es decir, que en un circuito que pase por un galvanómetro, la corriente va de las regiones intactas al punto alterado.

Cuando el órgano, nervio o músculo, entra en actividad, los puntos excitados se conducen como puntos alterados, es decir, que se hacen negativos. Esto permite explicar las diversas experiencias precedentes. Tomemos dos electrodos

impolarizables aplicados sobre un nervio escindido, estando uno próximo a la sección S, el otro en la superficie lateral L (fig. 500). Esta superficie lateral está intacta, la sección es asiento de una lesión, por lo que el electrodo colocado en S es negativo con relación al colocado en L, la corriente va en el galvanómetro de L a S. Practiquemos ahora en AB una excitación tetánica. Esta excitación se transmite por todo el nervio y produce por todo él el mismo efecto que una lesión. De ello resulta que L va a convertirse en más negativo que era, aproximándose al estado eléctrico de S y, por consiguiente, la corriente que va de L a S va a disminuir de intensidad.

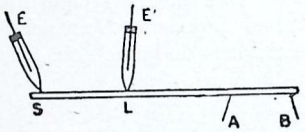


Fig. 500

La misma explicación es directamente aplicable al músculo.

La oscilación negativa, tal como acaba de ser descrita, es fácil de observar actualmente, gracias a la calidad de los instrumentos que poseemos: la experiencia resulta mucho más delicada cuando, en lugar de practicar en AB una excitación tetánica prolongada cuya duración permite al galvanómetro tomar su equilibrio correspondiente a la debilitación de la corriente de reposo, no se hace más que una excitación breve.

Supongamos que, estando las cosas dispuestas como representa la figura 500, los electrodos EE', unidos al galvanómetro, cuya desviación indica una corriente de reposo, se lanza por AB una pequeña descarga eléctrica muy breve. El nervio será excitado en AB durante un tiempo muy corto, no se verá ningún cambio en el galvanómetro; ¿es debido esto a que no se ha producido ningún cambio en el nervio, o a que el galvanómetro da indicaciones muy lentas para seguir una variación negativa fugaz de la corriente de reposo?

Experiencias muy delicadas han demostrado que hay que atenerse a esta última hipótesis y se ha podido, por métodos convenientes, poner en evidencia la oscilación negativa muy corta, consecutiva a una excitación muy breve. Se ha podido apreciar de este modo que esta oscilación negativa se produce

cierto tiempo después de la excitación, con un retardo tanto más grande cuanto más alejada del electrodo L está AB.

He aquí cómo se explican estos hechos: la excitación llevada a AB se propaga a lo largo del nervio como una onda en la superficie del agua; cuando pasa sobre L, L se hace negativo, como antes hemos visto. En este momento, la excitación negativa de la corriente de reposo se produce; después, habiendo pasado la onda, la corriente de reposo toma de nuevo su valor primitivo.

Realizando una serie de experiencias con valores diferentes de la distancia de AB a L, se puede medir la velocidad de propagación de la excitación a lo largo del nervio. Los autores que han hecho estas experiencias han encontrado la velocidad de propagación del influjo nervioso medido por los métodos que serán indicados más adelante.

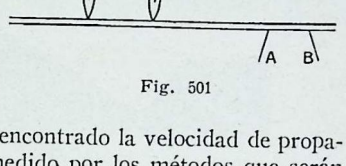


Fig. 501

Repitamos la misma operación con un nervio intacto. Sabemos que aplicando los electrodos EE' sobre el nervio intacto no apreciamos ninguna corriente. Produzcamos en AB (fig. 501) una excitación muy breve, observaremos dos oscilaciones eléctricas sucesivamente muy cortas, una que va, en el aparato indicador, del electrodo E a E' y la segunda que marcha en sentido inverso. Esto es también muy fácil de explicar y viene en apoyo de la teoría de Hermann. La excitación practicada en AB se ha propagado a lo largo del nervio; en el momento en que ha pasado bajo E', el electrodo E' se ha hecho negativo con relación a E, y hemos visto la primera onda eléctrica que marcha por el circuito exterior de E a E'. Inmediatamente después, E' ha vuelto a su estado primitivo, y pasando la onda por debajo de E es E la que se hace negativa con relación a E'; la segunda onda se ha producido inversa a la primera. Es lo que se denomina el fenómeno de la oscilación difásica.

Estas oscilaciones eléctricas, demasiado rápidas para poder ser observadas en el galvanómetro, se ponen en evidencia con el electrómetro capilar de Lippmann, que es muy sensible y

cuyo menisco se desplaza con gran rapidez. Como el ojo no podría seguir estos movimientos, se fotografía la columna capilar sobre una placa móvil y se obtienen trazados análogos a los de la figura 502. Esta figura representa las variaciones eléctricas de un corazón de rana que late espontáneamente. Los latidos han sido registrados con un cardiógrafo, y están representados por la línea negra. Simultáneamente se ha foto-

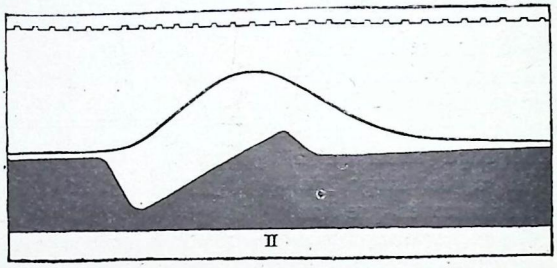


Fig. 502

grafiado la columna de mercurio del electrómetro y los desplazamientos del menisco están representados por la línea de separación de la zona blanca y de la zona negra. Estas variaciones eléctricas del corazón que laten espontáneamente pueden registrarse en el animal absolutamente normal o en el hombre, basta colocar uno de los electrodos del lado de la base del corazón, la otra del lado de la punta y unirlos a un electrómetro registrador.

Desde la invención del galvanómetro de cuerda por Einthoven, este fisiólogo ha empleado su aparato en lugar del electrómetro capilar, para registrar diversos fenómenos eléctricos. En particular se ha servido de él para tomar los trazados de las variaciones eléctricas del corazón. Basta para ello unir los bornes del galvanómetro a dos vasos que contienen agua salada en la que el sujeto sumerge las manos. Las oscilaciones eléctricas del corazón se transmiten por los brazos hasta el galvanómetro. Los trazados arriba indicados muestran las diferencias que se observan entre el estado normal y diversos estados patológicos (figs. 503, 504, 505, 506).

Debemos también indicar algunos puntos a propósito de la oscilación negativa del nervio.

En primer lugar, si en la experiencia de la figura 500, se repite la excitación del nervio periódicamente, con intervalos de un minuto, por ejemplo, y se registran las oscilaciones negativas, se aprecia que la magnitud de estas oscilaciones

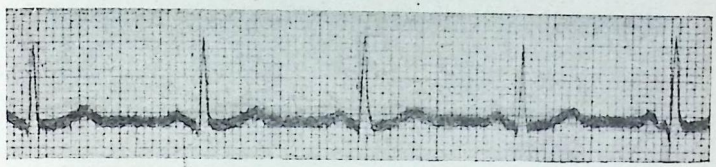


Fig. 503. - Normal

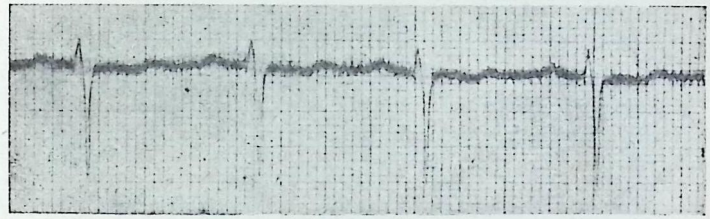


Fig. 504. — Insuficiencia aórtica.

permanece constante durante un tiempo muy largo (fig. 507, bajo); si se admite que esta oscilación negativa está ligada al estado de actividad del nervio, resulta que es preciso considerar el nervio como muy resistente a la fatiga. Cuando en las mismas condiciones se inscribe con el miógrafo la sacudida provocada en un músculo por la excitación de su nervio motor, se puede apreciar que esta sacudida disminuye rápidamente de altura (fig. 507, arriba), es el músculo que se ha fatigado, pero no el nervio.

Si, mientras se toma el trazado de las oscilaciones negativas sucesivas del nervio, se hace actuar sobre este nervio vapores de éter o de cloroformo, se aprecia que estas oscila-

ciones negativas desaparecen, para aparecer después de la substracción de los vapores, cuando, no obstante, su acción no ha sido demasiado enérgica ni excesivamente prolongada.

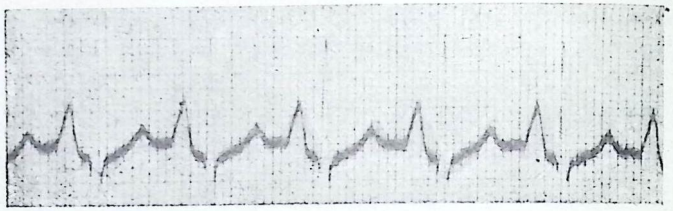


Fig. 505. — Estrechez mitral

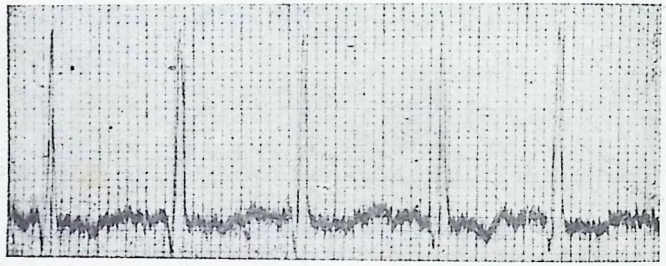


Fig. 506. — Insuficiencia mitral

El anhídrido carbónico en muy pequeña cantidad produce un aumento de la oscilación negativa; a dosis elevada, obra como el éter o el cloroformo.

Glándulas. Ojo. Centros nerviosos. — Entre los demás órganos que dan lugar a manifestaciones eléctricas regulares, hay que citar desde luego las glándulas. Particularmente si se explora la piel, se la encuentra siempre atravesada por una corriente que va del exterior al interior, debido a la presencia de las glándulas cutáneas. Esta corriente es modificada cuando se practica una excitación.

De la misma manera, la retina es asiento de oscilaciones eléctricas cuando se la ilumina (fig. 508).

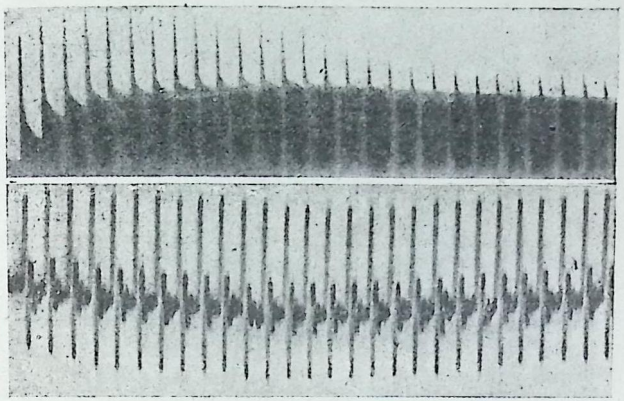


Fig. 507

Los centros nerviosos manifiestan también su estado de actividad por variaciones eléctricas en cuyo detalle no hay porqué entrar en este sitio.

Peces eléctricos. — Sabido es de antiguo que ciertos peces, en particular los gimnotos, torpedos, etc., dan, cuando se les toca, sacudidas eléctricas sumamente enérgicas. Estos fenómenos han sido estudiados por muchos fisiólogos, desde que estas manifestaciones han parecido tener una gran analogía con los fenómenos eléctricos del músculo, aunque con intensidad distinta.

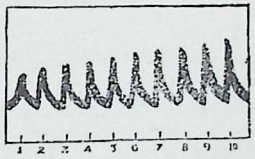


Fig. 508

Cuando se toma un torpedo, cuya sección transversal está representada en la figura 509, se aprecia que la sacudida que da procede de una descarga que va, en el circuito exterior, del dorso al vientre. En el gimnoto la descarga va de la cabeza a la cola (fig. 510).

Estas descargas se producen con cierto período latente evaluado en 0",005 aproximadamente, por consiguiente del

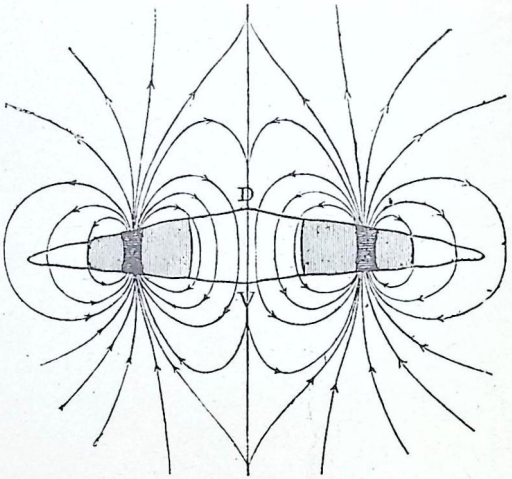


Fig. 509

mismo orden que la del músculo en el tiempo de su contracción.

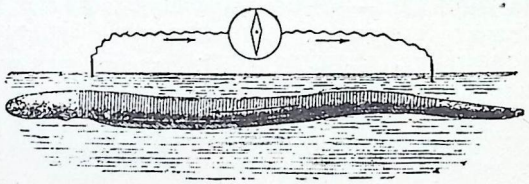


Fig. 510

Son debidas a un órgano especial llamado órgano eléctrico, y pueden ser bastante intensas, como ha demostrado d'Arsonval, para encender pequeñas lámparas eléctricas.

Lo que hace interesante estos órganos eléctricos desde el punto de vista de la fisiología general, es su analogía con el músculo desde el punto de vista embriológico. Durante el desarrollo, el músculo se ha convertido en un órgano que suministra trabajo mecánico con pequeñas manifestaciones eléctricas, mientras que los términos están invertidos para el órgano eléctrico. Quizá el estudio paralelo de estas dos clases de órganos consiga un día dar nueva luz acerca de su funcionamiento.

Plantas eléctricas. — Digamos, únicamente de paso, que las plantas dan también lugar a manifestaciones eléctricas, como todos los seres vivos.

XIII. — **Acciones químicas de la corriente**

Sabido es que si se hace pasar una corriente eléctrica por agua acidulada, sumergiendo en ella dos hilos de platino unidos a la pila, hay descomposición del líquido con desprendimiento de hidrógeno en el polo negativo y de oxígeno en el polo positivo. Este fenómeno, denominado electrolisis, desempeña un importante papel en un gran número de aplicaciones de la electricidad. Los hilos que sirven para conducir la corriente al cuerpo que está sometido a la acción de esta corriente, se denominan electrodos; se les distingue en electrodo positivo o Anodo y electrodo negativo o Cátodo.

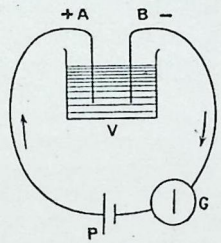


Fig. 511

La electrolisis va acompañada de lo que se denomina polarización de los electrodos; he aquí en qué consiste este fenómeno. Si se hace pasar una corriente continua por agua acidulada con ácido sulfúrico, mediante una pila unida a dos electrodos de platino *A* y *B*, colocando en el circuito un galvanómetro *G* (fig. 511), se aprecia cierta desviación de este galvanómetro que corresponde a una corriente que circula en el sentido de las flechas indicadas en la figura. Al mismo tiempo el hidrógeno se desprende en *B* y el oxígeno en *A*. Si se conociese la resistencia del circuito y la fuerza electromotriz de la pila, se podría calcular la intensidad de la corriente, y se

apreciaría que esta intensidad calculada es superior a la indicada por el galvanómetro. Esto depende de que el voltímetro *V* es asiento de una fuerza electromotriz que obra en sentido inverso de la pila, lo que es fácil de comprobar. Basta para ello suprimir la pila, dejando todas las demás conexiones tal como estaban, y de cerrar la corriente en el punto en donde se encontraba esta pila, para apreciar una desviación del galvanómetro que indica una corriente de sentido contrario a la precedente, es decir, que circula en sentido contrario de las flechas. Esta es la corriente de polarización. Este mismo fenómeno de polarización se produce en las pilas cuando se desprenden gases en ella. También en esto están fundados los acumuladores, que no difieren, en principio, del voltímetro simple que acabamos de considerar, más que por la substitución del plomo al platino, habiendo demostrado la experiencia que el plomo tiene mayor capacidad de polarización que el platino.

Si en lugar de hacer pasar la corriente por el agua acidulada, se la hace pasar por una solución salina, por ejemplo, por sulfato de cobre, se aprecia, en el polo negativo de la pila, un depósito de cobre, y en el positivo un acúmulo de ácido sulfúrico con desprendimiento de oxígeno. Tendremos también polarización; para que esta polarización no tenga lugar, es preciso que la corriente no modifique la naturaleza de los electrodos; esto ocurrirá cuando tomemos una solución de sulfato de cobre y electrodos de cobre, por ejemplo. Entonces habrá en la parte negativa depósito de cobre y en la parte positiva ataque del cobre por el oxígeno y el ácido sulfúrico, con formación de sulfato de cobre; nada habrá cambiado, ni en la solución, ni en los electrodos, sino que cierta cantidad del metal habrá sido transportado del electrodo positivo al negativo. Se obtendrá el mismo resultado siempre que se empleen electrodos de cierto metal sumergidos en una solución salina del mismo metal; electrodos de zinc en una solución de sulfato de zinc, electrodos de plata en una solución de nitrato de plata, etc.

Leyes de Faraday. — Faraday ha demostrado que hay relaciones muy íntimas entre la intensidad de la corriente y las descomposiciones que se producen en los líquidos atravesados

por ella. He aquí el hecho más importante, *que hay que recordar ante todo.*

La cantidad de cuerpo descompuesto y, por consiguiente, de cuerpo depositado en cada electrodo, es proporcional al tiempo de paso de la corriente y a la intensidad de la misma. Depende, además, de la naturaleza del cuerpo descompuesto.

Tomemos, por ejemplo, un voltímetro con agua acidulada y hagamos pasar por él una corriente: apreciaremos, poniendo en el circuito un galvanómetro que, al mismo tiempo, las cantidades de gases desprendidos son proporcionales a las intensidades de la corriente. Claro es que para hacer esta operación hay que disponer el voltímetro de modo que se puedan recoger los gases, es decir, hacer llegar los electrodos por el fondo del vaso y cubrirlos con probetas, en donde los gases serán mantenidos encima del líquido (fig. 512).

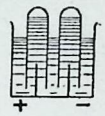


Fig. 512

Cuando se cambian las dimensiones del vaso, las superficies de los electrodos, la posición del voltímetro en el circuito, colocándole más o menos cerca del polo negativo de la pila o del polo positivo, se aprecia que todas estas modificaciones no tienen ninguna influencia sobre la cantidad de gases desprendidos: *para una misma intensidad de corriente y una misma duración de paso, la magnitud de la electrolisis es la misma.*

Cuando la intensidad de la corriente es reducida a la mitad y la duración del paso doble, se tendrá la misma electrólisis: *en general, esta electrolisis permanecerá constante cuando el producto de la intensidad por la duración será la misma, lo que equivale a decir que habrá pasado por el circuito la misma cantidad de electricidad.*

Si se quiere descomponer, pues, por electrolisis cierta cantidad de cuerpo, o, lo que es lo mismo, desprender en uno de los electrodos cierto volumen de gas, o bien depositar un peso determinado de metal, no hay que tener en cuenta más que la cantidad de electricidad rendida por la corriente; *este es el hecho importante.*

Cuando se examina el peso de cuerpo depositado en un electrodo, haciendo variar la naturaleza de la solución manteniendo constante la cantidad de electricidad que pasa por el

circuito, se encuentra que este peso varía según lo que se llama equivalente electroquímico del cuerpo. Estos equivalentes electroquímicos se encuentran en tablas especiales; por lo demás, es raro que su conocimiento sea útil en la práctica de electroterapia o de electrofisiología.

Ocurre algunas veces que los cuerpos puestos en libertad en los electrodos dan lugar a lo que se denominan acciones secundarias. Si descomponemos una solución de sulfato de cobre, la sal se separa en cobre, que se deposita sobre el electrodo negativo, y en radical ácido, que va al electrodo positivo. Este radical ácido da lugar a un desprendimiento de oxígeno para volver a formar con el agua ácido sulfúrico. Repitiendo la misma operación con sulfato sódico, se aprecian los mismos fenómenos por parte del ánodo, pero en el cátodo, el sodio puesto en libertad reacciona sobre el agua para dar sosa con desprendimiento de hidrógeno. Parece, pues, finalmente, que hay separación de la sal en ácido, de un lado, y en base, del otro. Acciones secundarias análogas se producen siempre que los cuerpos puestos en libertad en los electrodos puedan reaccionar, ya sobre el agua, ya sobre el metal de estos electrodos, y no se observarán más que los resultados de estas acciones secundarias.

Electrolisis interpolar. — En general, cuando se hace pasar una corriente eléctrica por un líquido mediante electrodos que se sumergen en él, los productos de descomposición no aparecen, como se sabe, sino sobre los electrodos: en el intervalo que los separa, el líquido no sufre ninguna modificación aparente. No sucede lo mismo cuando el trayecto del ánodo al cátodo no es homogéneo. Supongamos que superponemos, gracias a la diferencia de densidad, dos líquidos conductores sin acción uno sobre otro en tiempo ordinario. Tenemos entre los dos líquidos una superficie de separación horizontal *AB* (fig. 513). Hagamos ahora pasar una corriente por dos electrodos situados uno en la parte inferior, el otro en la superior, del vaso que contiene los líquidos; podrán producirse cambios notables en la superficie de separación de los dos líquidos. En la parte inferior tenemos, por ejemplo, una solución saturada de sal marina; por encima, agua de fuente, y todo coloreado por tornasol. Cuando pase la corriente de arriba abajo, como en el caso de la figura 513, el tornasol virará en rojo en *AB*, indicando que se ha puesto en libertad un ácido. Cuando la corriente pase en sentido contrario, virará en azul, indicando la puesta en libertad de una base. Acciones análogas se producirán siempre que la corriente atraviese la superficie de separación de dos líquidos que contengan en solución sales diferentes. Estas descomposiciones dan lugar a fenómenos de polarización análogos a los que hemos observado en la electrolisis de un solo líquido, como es fácil demostrar. Si después de haber electrolisado un líquido único, homogéneo, se cambia de electrodos, se aprecia que no hay ninguna polarización, un galvanómetro puesto en el circuito de estos últimos electrodos no sufre ninguna desviación. Pero cuando se repite la misma experiencia con un líquido heterogéneo, cuando, después de haber hecho pasar la corriente, se retiran los electrodos para reemplazarlos por los electrodos nuevos, se produce todavía una corriente de polarización, cuyo origen no puede residir más que en las acciones electrolíticas que tienen lugar en la superficie de separación *AB*.

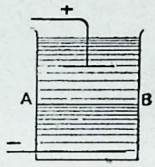


Fig. 513

XIV. — Papel de los iones en la electrólisis y en la conductibilidad de las soluciones

La hipótesis de los Iones permite explicar de una manera muy sencilla y satisfactoria todos los fenómenos relativos a la conductibilidad de las soluciones y a la electrólisis.

Disolvamos en el agua cierta cantidad de ácido clorhídrico, por ejemplo, y sometamos este líquido a la electrolisis; veremos aparecer *H* en el electrodo negativo y *Cl* en el electrodo positivo.

Se explica esto diciendo que el *HCl* se ha ionizado dando Iones de *H* electrizados positivamente o electropositivos e Iones de *Cl* electrizados negativamente, o electronegativos. Los Iones de *H* son atraídos por el electrodo negativo como una bola de saúco cargada positivamente lo es por un

cuerpo cargado negativamente. En el momento en que los Iones de *H* se ponen en contacto con el cátodo pierden su carga y se desprenden al estado de hidrógeno. Lo mismo sucede con los Iones de *Cl* en el ánodo. A medida que los iones se separen así, se ioniza una nueva cantidad de cuerpo en solución. Gracias a esta circulación de los Iones se hace el transporte de electricidad a través de la solución, por ello, los cuerpos que no se ionizan, como el azúcar de caña o la glicerina, no dan soluciones conductrices.

XV. — Fenómenos de acarreo

La corriente eléctrica que atraviesa un líquido acarrea este líquido. He aquí cómo puede hacerse la experiencia. En un vaso que puede dividirse en dos por un tabique poroso *P* (fig. 514), se coloca una solución de sulfato de cobre, que tiende a ponerse al mismo nivel en ambos lados de la pared. Si ahora, mediante electrodos en cobre, colocados según indica la mencionada figura, se hace pasar por el líquido una corriente, se observa que el nivel se eleva del lado del electrodo negativo; el líquido es, pues, transportado por la corriente a través de la pared porosa. Este fenómeno es tanto más acentuado cuanto mayor es la intensidad de la corriente.

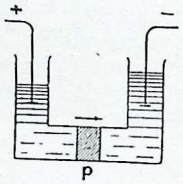


Fig 514

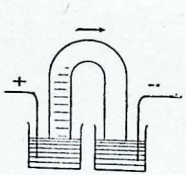


Fig. 515

He aquí otra forma bajo la que se hace patente el acarreo de los cuerpos por la corriente. Cuando una corriente atraviesa una solución salina, las sales son transportadas por la corriente en el líquido; así, una sal que se encuentre en la solución en pequeña cantidad, no tomará parte en la electrólisis, no será descompuesta, sino sencillamente arrastrada de un electrodo a otro. Los fenómenos de acarreo bajo la influencia de la corriente no se manifiestan solamente en los líquidos, se les puede poner en evidencia en la gelatina o en otras substancias análogas, y la experiencia resulta muy manifiesta

si se emplean cuerpos coloreados como los colores de anilina, cuya marcha se puede seguir. Se vierte gelatina fundida en un tubo en *U*, y una vez coagulada por enfriamiento, se invierte el tubo sobre dos pocillos que contengan un color de anilina en solución y en los que se sumergen los electrodos destinados a conducir la corriente, se aprecia entonces que la materia colorante es acarreada; hasta para una corriente de muy débil intensidad sube muy rápidamente en una de las ramas del tubo. Según la naturaleza de esta materia colorante, se la ve marchar en el sentido de la corriente o en sentido inverso.

Este fenómeno ha sido ya indicado a propósito del estado coloidal.

XVI. — Acción de la corriente continua sobre los tejidos organizados

Cuando se aplica la corriente continua al cuerpo humano o si, en general, se le hace obrar sobre tejidos organizados, no se deben jamás perder de vista los fenómenos de electrolisis y de acarreo que se pueden producir.

En primer lugar, debemos estudiar las acciones que se producen al contacto de los electrodos, acciones que, según las circunstancias, habrá necesidad de evitar o de favorecer, utilizándolas. Se procurará evitarlas siempre que se quiera que sean atravesados los tejidos por una corriente con el mínimum de alteraciones; por el contrario, se los favorecerá cuando se quieran practicar cauterizaciones locales por medio de productos ácidos o básicos puestos en libertad al contacto de los electrodos y de los líquidos que impregnan los tejidos del organismo. En este último caso se colocarán electrodos metálicos en contacto directo con los tejidos, dándoles la forma más conveniente para el fin que se desea alcanzar. Será bueno que citemos algunos ejemplos. Se encuentran con frecuencia pequeños tumores vasculares que es muy fácil hacer desaparecer sin que queden cicatrices apreciables por medio de un tratamiento electrolítico; para esto, se procura desprender en el interior de estos tumores un ácido que dé lugar a la coagu-

lación de la sangre y a la obliteración de los vasos. Operando debidamente, se acaba por suprimir toda la circulación en estos tumores, que se reducen y se atrofian poco a poco; con un poco de habilidad y de paciencia se consiguen excelentes resultados. Para obtener el desprendimiento ácido se hunde en el tumor una o muchas agujas de oro, aisladas en la mayor parte de su longitud, excepto una pequeña porción de la punta, que queda al descubierto. Hecho esto, se hace pasar la corriente utilizando estas agujas como electrodos positivos por los que la corriente penetra en el cuerpo, mientras que sale por un amplio electrodo, llamado electrodo indiferente, del que más adelante hablaremos. Si se coloca un galvanómetro en el circuito, lo que no hay que dejar de hacer, se puede dosificar exactamente el efecto químico producido. Con un poco de hábito, esta clase de operaciones se ejecutan con la mayor precisión. Es preciso cuidar de que las agujas estén bien barnizadas, como hemos dicho, con el fin de evitar el contacto del metal con la piel. Tomando una aguja desnuda, la electrolisis tiene lugar sobre toda la longitud de esta aguja en contacto con los tejidos, y de ello resulta una escara de la piel. Cuando, por el contrario, no es más que la punta, profundamente hundida debajo de la piel, la que es asiento de la electrolisis, la piel permanece sana, y después de haber retirado la aguja no persiste más que un pequeño orificio sin importancia, que se oblitera rápidamente.

He aquí otro caso. Se introduce en la cavidad uterina, no ya una pequeña aguja, sino un tallo de platino de 4 a 5 mm. de diámetro, o también un electrodo alargado de carbón de retorta, de diámetro más o menos grande, según el estado de dilatación del cuello, y se emplea como ánodo; el cátodo será siempre un electrodo indiferente. Se produce de esta manera en el interior de la cavidad uterina una electrolisis con desprendimiento de ácidos y de ozono; esto da lugar a una cauterización de la mucosa y a una desinfección de esta cavidad uterina por los antisépticos enérgicos procedentes de la electrolisis.

De ordinario, cuando se quieren utilizar las acciones químicas en los electrodos, es el ánodo el que se emplea, como en los casos que acabamos de mencionar; algunas veces,

sin embargo, se hace uso del cátodo, obteniéndose entonces una cauterización por las bases que en él son puestas en libertad.

Cuando no se quiere obtener acción local con los electrodos, hay que guardarse de tocar la piel con un conductor metálico, claro está, cuando se opera con la corriente continua. El contacto ideal se realiza con el agua salada, o hasta con el agua de fuente, que no altera los objetos que se ponen en contacto con ella. El mejor dispositivo se realiza fácilmente cuando se trata de hacer entrar la corriente por una mano o por un pie; se sumerge esta mano o este pie en una cubeta con agua a la que va a parar el electrodo (fig. 516). En

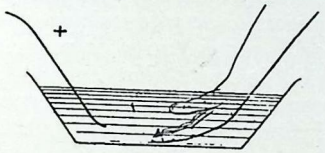


Fig. 516

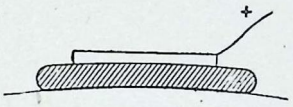


Fig. 517

estas condiciones, no puede haber electrolisis en la superficie de la piel, no es de temer ninguna cauterización ni quemadura. Cuando no se puede emplear este procedimiento, cuando hay que hacer penetrar o salir la corriente por una región de la espalda o del abdomen, se extienden sobre esta región lienzos, yesca, fieltro, u otras substancias capaces de absorber el agua; se les impregna cuidadosamente del líquido, y por encima se coloca una placa de metal unida al polo de una pila. Estas tomas de contacto se denominan *electrodos indiferentes*. Cuanto mayor es su superficie, menor es el riesgo de cauterización de la piel, pues la débil acción química que todavía puede producirse, por difusión de los cuerpos puestos en libertad, se distribuye por una superficie muy considerable y su efecto resulta nulo.

La cuestión es más delicada cuando se quiere electrizar un punto localizado debajo de la piel sin alterar ésta en lo más mínimo. El electrodo más en uso en este caso se compone de un bloque de carbón de retorta recubierto de piel de gamuza. Se impregna esta piel con agua de fuente y como el carbón no está en contacto inmediato con la piel, no se

produce electrolisis en la superficie de esta piel, pero si el paso de la corriente se prolonga mucho tiempo, es necesario, para evacuar los productos de electrolisis, pasar con frecuencia el electrodo por agua fresca; únicamente con esta condición no se tiene ningún accidente sobre la piel de los niños, por ejemplo, que es muy sensible.

Se puede demostrar que, aparte de los fenómenos de electrolisis que tienen lugar al contacto de los electrodos, se producen descomposiciones en la intimidad misma de los tejidos. Esto no debe sorprender, puesto que se ha visto que semejantes descomposiciones se producen en todas las superficies de separación, cuando la corriente atraviesa cuerpos heterogéneos. Particularmente en los músculos, en donde el microscopio nos muestra la estructura compleja, no es sorprendente que a cualquier paso de un elemento de una fibra a otra haya electrolisis. Se pone en evidencia esta electrolisis, demostrando que después del paso de la corriente, el músculo es asiento de una polarización. Si la duración del paso de la corriente ha sido bastante larga y la corriente bastante intensa, puede resultar una alteración de los tejidos sobre todo el trayecto de la corriente, esta alteración se traduce por lesiones visibles al microscopio. En un gran número de casos, esta electrolisis intersticial desempeña un papel considerable, cuando se utiliza la corriente continua con un fin terapéutico.

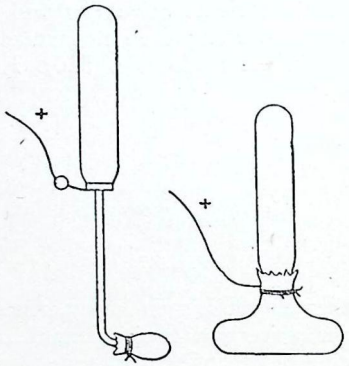


Fig. 518

Hemos visto que, además de los fenómenos de electrolisis, hay también acarreo de los líquidos atravesados por la corriente, y de las substancias que están disueltas en estos líquidos. De ello resulta que es posible que se produzcan cambios en los puntos de aplicación de los electrodos sobre la piel, entre los líquidos de que estos electrodos están impregnados y los líquidos del organismo. Se ha procurado extraer de

este modo del cuerpo humano ciertos principios tóxicos en los casos de envenenamiento; no parece que estas tentativas hayan sido muy satisfactorias. Los resultados han sido más felices y más patentes en el caso contrario, es decir, cuando se ha tratado de introducir una substancia en el organismo. Así, si se sumergen los brazos en una solución de sal de litio y se hace pasar la corriente de la solución hacia el cuerpo, se aprecia la aparición del litio en la orina. Es preciso, además, orientar convenientemente el sentido de la corriente según el cuerpo que se desea introducir; cuando desempeña el papel de metal o de base, hay que dirigir la corriente desde la solución hacia el interior de los tejidos, y en sentido contrario cuando el cuerpo desempeña el papel de ácido. Esto ha sido puesto en evidencia por Leduc del modo siguiente. Se toman dos conejos *L, L'* (fig. 519), cuyos flancos se afeitan, se les pone uno junto a otro, pero separándolos por medio de una masa de algodón impregnada en la solución del cuerpo sobre el que se experimenta. La corriente es conducida por dos electrodos *E, E'*. Cuando se impregna el algodón de una solución de cianuro de potasio, es sólo el conejo del lado positivo el que se envenena; si se emplea un algodón mojado con solución de clorhidrato de estricnina, es el del lado negativo el que sufre la intoxicación. Esto depende de que, en el primer caso, es el ácido el que es tóxico; en el segundo, es la base.

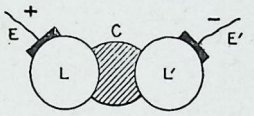


Fig. 519

XVII. — **Termoelectricidad**

Cuando se forma un circuito compuesto de dos hilos metálicos, de naturaleza diferente, por ejemplo, un hilo de cobre y un hilo de hierro, soldados por los extremos, semejante circuito no es asiento de ninguna corriente mientras ambas soldaduras *A* y *B* (fig. 520) están a la misma temperatura. Pero si se calienta una de ellas, *A*, inmediatamente se produce una corriente, llamada termoeléctrica, que va en uno de los

metales de la soldadura caliente a la soldadura fría y en el otro en sentido inverso.

En lugar de poner los dos metales en contacto directo en la soldadura *B*, por ejemplo, se pueden intercalar en este punto uno o muchos más metales; no se cambia nada en el resultado final, con la condición de que el conjunto de las soldaduras así obtenidas, 1, 2, 3, estén a la misma temperatura a que se encontraba antes *B* (fig. 521).

De la misma manera, se puede, sin que nada cambie, hacer una sección de uno de los hilos, *Cu*, por ejemplo, e intercalar

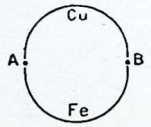


Fig. 520

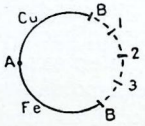


Fig. 521

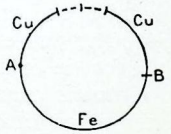


Fig. 522

en este punto uno o muchos metales, supuesto que estos metales tengan la misma temperatura que aquella a que se encontraba el punto de sección (fig. 522).

Si, por el contrario, se tiene una cadena formada por metales diferentes en cualquier número, con temperaturas diferentes a lo largo del circuito, se tiene una serie de pares termoeléctricos cuyos efectos pueden sumarse o restarse.

Dentro de ciertos límites, la intensidad de esta corriente es proporcional a la diferencia de temperatura entre las dos soldaduras; se posee, pues, un medio precioso, en ciertos casos, para medir las diferencias de temperatura. Para esto se intercala en el circuito un galvanómetro, estando las dos soldaduras en *A* y en *B* (fig. 523). Para una misma diferencia de temperatura, la corriente será más o menos intensa, según la naturaleza de los metales empleados; esto se expresa diciendo que el conjunto de los dos metales tiene un poder termoeléctrico más o menos elevado. De una vez para siempre, se gradúa el aparato llevando las dos soldaduras a una diferencia de temperatura conocida, 1 grado, por ejemplo. Si, en estas condiciones, se aprecia una indicación del galvanómetro de 100 divisiones de la escala, cada división corresponderá a una

centésima de grado. Este método puede llegar a ser sensible en extremo, gracias a la perfección de los galvanómetros que actualmente se poseen. Además, se pueden poner muchas de estas pilas termoeléctricas unas a continuación de otras en el mismo circuito, alternando los dos metales, hierro y cobre, de la misma manera que se asocian en serie los elementos de pila ordinarios. Sabido es que en este caso, las fuerzas electromotrices de los diversos elementos se suman. La resistencia

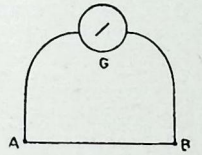


Fig. 523

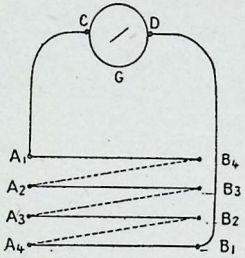


Fig. 524

interior de semejante pila es, por lo demás, muy débil y generalmente despreciable con relación al resto del circuito.

La figura 524 representa un esquema de esta disposición para cuatro elementos. Si se calientan las cuatro soldaduras impares A_1, A_2, A_3, A_4, dejando B_1, B_2, B_3, B_4 a la temperatura más baja, se medirá la diferencia de temperatura entre el lado *A* y el lado *B*, pero claro es que se tendrá más sensibilidad que con un solo par de soldaduras. No hay otro límite a la sensibilidad que se pueda alcanzar que la determinada por el espacio, en el que es preciso alojar las soldaduras. Según lo que antes hemos dicho, importa que los puntos *C* y *D*, en que la pila está unida al galvanómetro estén a la misma temperatura; sin esto, el hilo del galvanómetro formaría con los conductores que llegan a los bornes un par termoeléctrico que falsearía los resultados.

Se utilizan particularmente los pares termoeléctricos en los casos en que un termómetro resultaría muy voluminoso para ser alojado en el sitio en que se desea explorar. Este es el caso que se presenta con frecuencia en diversas partes del cuer-

po del hombre y de los animales; he aquí los dispositivos más convenientes. Se sueldan por sus extremos un hilo de hierro y otro de níquel (fig. 525), estos son los metales que dan mejores resultados, su poder termoeléctrico es bastante elevado y son fáciles de trabajar. Estos hilos serán muy finos, tendrán una décima de milímetro de diámetro, por ejemplo. Uno de los hilos estará enhebrado en una aguja con la que se atraviesa el órgano que se ha de explorar, para llevar la soldadura al interior de este órgano. Una vez la soldadura en su sitio, se quita la aguja y se unen las extremidades libres del hierro y del níquel a los bornes del galvanómetro, ya directamente, ya por intermedio de hilos de cobre que se unen a los extremos del hierro y del níquel.

Fig. 525

Otro dispositivo muy empleado consiste en formar con los dos hilos una aguja que se clava en los tejidos (fig. 526). Hay que hacer notar que operando como acabamos de indicar, se mide la diferencia de temperatura entre la soldadura hierro-níquel hundida en los tejidos y la soldadura exterior, en la que está intercalado el galvanómetro. No se conoce generalmente bien la temperatura de esta soldadura exterior, y es preferible asociar dos agujas, como indica la figura 527. Una de ellas, *A*, está hundida en los tejidos que hay que estudiar; la otra, *B*, en un recinto de temperatura conocida, del hielo en fusión, por ejemplo. Los dos lados hierro están unidos al galvanómetro, y si todo el circuito está a una misma temperatura, salvo *A* y *B*, se mide la diferencia de temperatura entre *A* y *B*. Este dispositivo corresponde al esquema de la figura 527, mientras que el precedente correspondía al esquema de la figura 526.

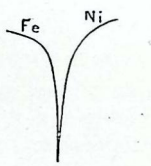


Fig. 526

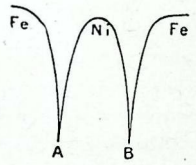


Fig. 527

En el procedimiento de la figura 526 se mide la diferencia de temperatura entre la aguja y el medio ambiente, en donde se encuentra el galvanómetro; si hay cambios en este medio, resultan errores. En el procedimiento de la figura 527, se mide la diferencia de temperatura entre los tejidos que hay que explorar y el hielo en fusión; basta que no haya diferencia de temperatura entre los diversos puntos del resto del circuito en donde se encuentan contactos de metales diferentes, lo que es fácil de obtener.

XVIII. — **Electrotono**

El paso de la corriente eléctrica por el nervio va acompañado de fenómenos muy importantes, que consisten en modificaciones de la excitabilidad y producción de corrientes.

He aquí la experiencia fundamental. Aislemos un nervio *MN* en cierta longitud y apliquemos sobre él dos electrodos *AB* que sirven para hacer pasar por este nervio una corriente continua (fig. 528). Bajo la influencia de esta corriente continua, llamada corriente polarizante, el nervio no es excitado, como más adelante veremos; si, pues, se explora la región del nervio situada fuera de los electrodos, se debería encontrar la corriente de reposo sin modificación después como antes del paso de la corriente continua por *AB*. Ahora bien; se aprecia, aplicando electrodos impolarizables ya en *ab*, ya en *a'b'*, la existencia de una corriente dirigida en el circuito galvanométrico, como indican las flechas de la figura. En la porción del nervio situado ya entre *ab*, ya entre *a'b'*, la corriente es del mismo sentido que la corriente que pasa por *AB*. Esto bastaría para distinguirla de la corriente de reposo suministrada por el nervio que no puede estar dirigida en el mismo sentido del lado *M* que del lado *N*. Además, esta corriente de electrotono crece con la intensidad de la corriente conducida por *AB*; puede ser muy superior a la corriente de reposo, y cambia de sentido con la corriente polarizante.

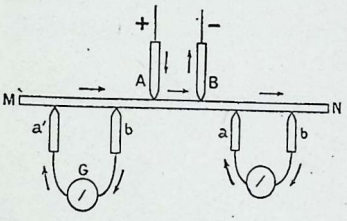


Fig. 528

El fenómeno tiene su máximum de intensidad en las inme-

diaciones de los electrodos *A* y *B;* a medida que nos alejamos desciende y a cierta distancia no se deja ya sentir. Es decir, que si se conserva una distancia constante entre los electrodos *ab,* colocándose en las inmediaciones de *B,* se tiene un máximum de corriente electrotónica, y a medida que nos alejamos hacia *N* esta corriente disminuye de intensidad. A 1 cm. aproximadamente de *B,* no se observa nada.

Aparte de estas manifestaciones eléctricas, existe otro

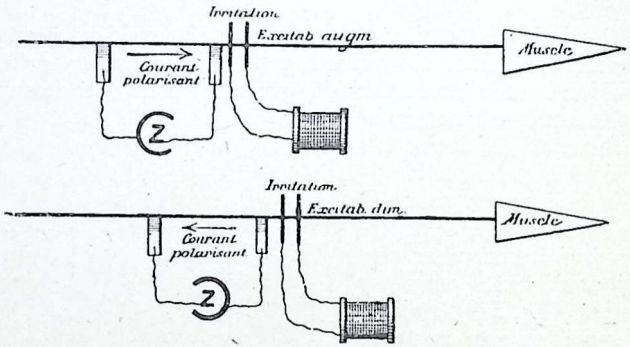


Fig. 529

fenómeno muy importante: la excitabilidad del nervio está modificada en las regiones en que se manifiesta el electrotono. Está aumentada en la región del catelectrotono, es decir, en las inmediaciones del electrodo negativo, y disminuye en la región de anelectrotono, es decir, en las inmediaciones del electrodo positivo, tanto fuera de los electrodos como entre los electrodos.

Así, si haciendo pasar la corriente continua por *AB,* se explora la excitabilidad del nervio, se aprecia que en las inmediaciones del punto de aplicación del electrodo *B,* tanto fuera como dentro de *AB,* el nervio es más excitable que antes del paso de la corriente. En las inmediaciones de *A,* se observa todo lo contrario. Claro está que el fenómeno es más marcado en el punto de aplicación mismo de los electrodos y disminuye a medida que nos alejamos de ellos. La figura 529 muestra cómo hay que disponer la experiencia para hacer esta demostración. La figura 530 muestra esquemáticamente cuáles son los cambios de excitabilidad producidos a consecuencia del paso de la corriente por los nervios, correspondiendo las ordenadas trazadas por encima de la línea a un aumento, las que hay debajo de la línea a una disminución.

Los anestésicos disminuyen mucho los fenómenos electrotónicos, son también detenidos por una ligadura, es decir, que si se practica una ligadura en las inmediaciones del electrodo que lleva la corriente, los fenómenos electrotónicos no dejan sentir su efecto más allá de esta ligadura.

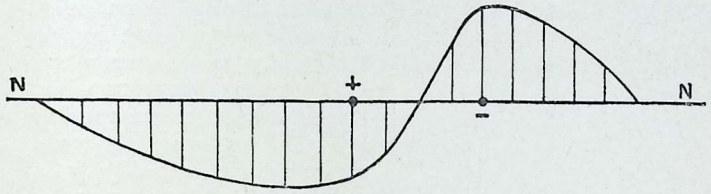


Fig. 530

Cuando se suspende la experiencia, los fenómenos no desaparecen instantáneamente, persisten algún tiempo, disminuyendo de intensidad; al mismo tiempo, se producen algunas oscilaciones en el sentido de las corrientes electrotónicas y en la excitabilidad.

El paso de la corriente continua por el nervio modifica también la conductibilidad de este nervio. Si, por ejemplo, se colocan dos electrodos en la parte superior de un nervio de rana y se utilizan para provocar una serie de sacudidas con una bobina de inducción, basta hacer pasar por el nervio una corriente continua mediante electrodos colocados en *ab* (fig. 531) para ver el músculo permanecer en reposo; la excitación partida de *AB* no puede franquear *ab.* Si se detiene la corriente que pasa por *ab,* se restablece la conductibilidad del nervio y el músculo comienza de nuevo a contraerse a consecuencia de cada excitación llevada a *Ab.*

Esto permite practicar una de las experiencias más interesantes de la fisiología del nervio. Tiene por fin demostrar que cuando se practican una serie de excitaciones sobre un nervio y se ve que la altura de la sacudida muscular va dismi-

nuyendo poco a poco, no es a consecuencia de la fatiga del nervio por lo que esta disminución se produce. El nervio es muy resistente a la fatiga, lo hemos visto ya a propósito de la oscilación negativa. He aquí cómo se demuestra. Se preparan dos músculos de rana con sus nervios (figura 532). En la parte superior de los dos nervios N_1 y N_2, se colocan dos electrodos unidos a una bobina de inducción; se ve que los dos músculos se contraen a cada excitación. Hagamos ahora pasar una corriente continua por B; cortaremos la comunicación entre N_2 y el músculo, que permanecerá en reposo. Se continúan las excitaciones y cuando se observa que el músculo M_1 no responde a estas excitaciones, se rompe el circuito de la pila; inmediatamente, el músculo M_2 comienza de nuevo a contraerse; no es, pues, el nervio el que está fatigado, pues, N_1 y N_2 han estado sometidos a las mismas excitaciones.

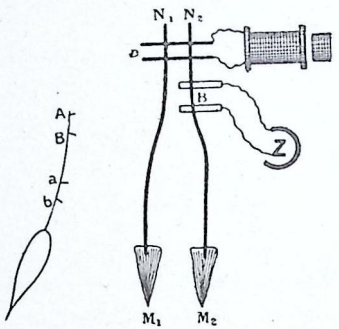


Fig. 531

Fig. 532

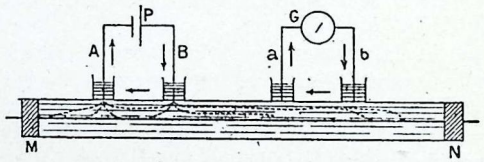


Fig. 533

La explicación más racional de las corrientes electrotónicas ha sido dada por L. Hermann; las atribuye a fenómenos de polarización que se producen entre el cilindro eje y la cubierta de mielina. Ha demostrado, además, que se podían reproducir los fenómenos en un esquema. Se toma un tubo de cristal MN que lleva cuatro tubuladuras laterales A, B, a, b (fig. 533). El tubo contiene un hilo de platino tenso en su eje entre dos tapones, se le llena de una solución de sulfato de zinc y se sumergen en las tubuladuras pequeños cilindros de zinc formando electrodo impolarizable con el líquido. Por AB se hace pasar una corriente, ab está unido a un galvanómetro que se desvía en cuanto la corriente pasa por AB. Se comprueba que las dos corrientes AB y ab son del mismo sentido. La desviación de G depende de que la corriente no va directamente de A y B al hilo de platino; se produce en el momento del paso de la corriente de la solución hasta el platino, una polarización de este platino, la corriente no pasa más que con dificultad, y difunde hacia las partes más lejanas del hilo de platino, como indica la figura.

Tan cierto es que es ésta la explicación, que si se reemplaza el hilo de platino por un hilo de zinc, el galvanómetro no denuncia ninguna corriente; sabido es que el zinc en una solución de su sal, no se polariza.

XIX. — **Excitación eléctrica de los nervios y de los músculos**

Se puede provocar la contracción muscular, ya obrando directamente sobre los músculos, ya operando por intermedio del nervio.

En el primer caso se colocan los electrodos directamente sobre el músculo. Se puede, hasta si se quiere estar seguro de no obrar más que sobre el músculo mismo, envenenar previamente, por medio de curare, el animal sobre que se opera.

Los tubos nerviosos que forman un nervio motor que va a un músculo se terminan por placas motoras aplicadas sobre las diversas fibras musculares. El curare tiene por efecto paralizar estas placas terminales motoras. En un animal que ha recibido este veneno, todo ocurre como si el músculo estuviese completamente aislado del sistema nervioso. Si, sobre este animal, que supondremos ser una rana, se destaca un músculo y se le ata a un miógrafo, bastará hacer que le atraviese una descarga eléctrica por medio de electrodos colocados en sus dos extremidades (fig. 534) para ver inmediatamente que el músculo se contrae e inscribe una sacudida sobre un

papel ahumado. En realidad, la sacudida muscular no comienza en el momento en que la excitación eléctrica ha atravesado este músculo, siempre hay cierto intervalo de tiempo entre el momento de la excitación y el comienzo de la respuesta. Este intervalo se denomina período latente o tiempo perdido; fué puesto en evidencia por primera vez por Helmholtz.

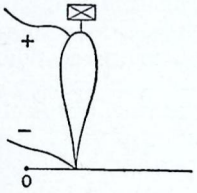


Fig. 534

He aquí cómo se practica la medición del período latente en el caso de la excitación del músculo. Se sujeta el músculo *M* al miógrafo cuya punta *A* inscribirá sobre el cilindro registrador todas las contracciones del músculo (fig. 535). Las extremidades de este músculo están unidas al circuito secundario de una bobina de inducción *D*, de modo que la descarga de esta bobina, en el momento de su producción, atraviesa este músculo. En el circuito primario de la bobina se encuentra una pila *P* y una señal de Marcelo Deprez *B*, que indicará todas las veces que se cierre o se rompa la corriente primaria. En *C* se encuentra un interruptor. La punta *B* de la señal de Deprez inscribe sus desplazamientos sobre el mismo cilindro registrador que *A*, encontrándose las dos puntas sobre la misma generatriz.

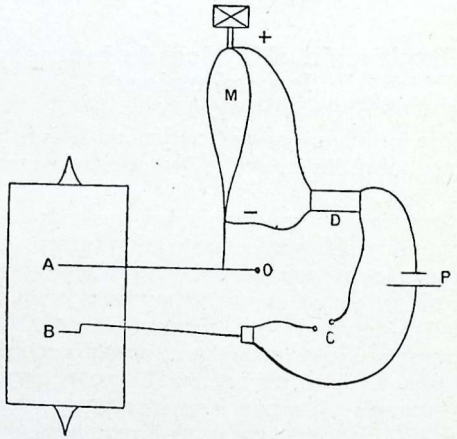


Fig. 535

Si se cierra el circuito en *C*, la señal *B* funciona e indica este cierre sobre el trazado. Al mismo tiempo se produce una onda inducida en la bobina de *D* y es excitado el músculo *M*. Va a contraerse: se tiene entonces un trazado análogo al de la figura 536. Sobre la línea *B* se encuentra una muesca *b* que indica el funcionamiento de la señal. Sobre *A* se ve en *a* el principio de la sacudida. Si este comienzo de la sacudida coincidiese con el momento de la excitación, *a* y *b* deben encontrarse sobre la misma generatriz del cilindro. Pero, en realidad, el músculo no ha comenzado a contraerse sino cierto tiempo después de la excitación; el cilindro ha girado algo en este intervalo; *b* y *a* se encuentran sobre generatrices diferentes β y α, cuya separación representa precisamente la cantidad que ha girado el cilindro durante el período latente.

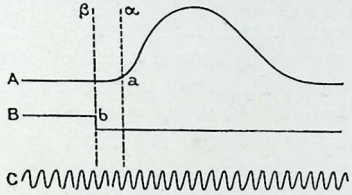


Fig. 536

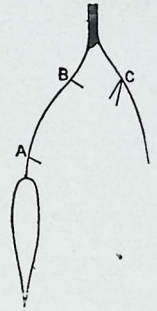


Fig 537

Al mismo tiempo que se ha hecho esta operación, se traza sobre el cilindro, con ayuda de un diapasón, por ejemplo, una curva sinuosa C, cuyas ondulaciones representan fracciones de segundo; basta contar las ondulaciones que hay entre las dos generatrices α y β para tener, en fracciones de segundo, la duración del período latente.

Se aprecia de este modo que la duración del período la-

tente en la rana es de 0",005 a la temperatura ordinaria. Disminuye cuando la temperatura se eleva y aumenta cuando desciende.

Supongamos que en lugar de excitar directamente el músculo se apliquen los dos electrodos en una región *A* del nervio (fig. 537), encontraremos un período de latencia más largo que en la excitación directa. Es necesario, en efecto, excitar el nervio; después, esta excitación debe recorrer cierta longitud del nervio para llegar hasta el músculo; hay que hacer entrar en juego las placas terminales y finalmente el músculo se contrae. Si se practica una nueva experiencia llevando la excitación a una región *B* más elevada, el período latente será todavía de mayor duración.

Es evidente que la diferencia de duración entre los períodos latentes *A* y *B* representará el tiempo que necesite la excitación para ir de *B* a *A*. Si se mide con un compás la longitud *AB*, se podrá deducir de estos datos la velocidad de propagación del influjo nervioso por segundo. Así, supongamos que *AB* tenga 2 cm. = 0,02 m. y que el período latente en *B* tiene 0,0007" más que en *A*, diremos: En 0,0007" el influjo nervioso ha recorrido 0,02 m.; en 1" habrá recorrido $\frac{0{,}02 \text{ m.}}{0{,}0007"} = 28$ m

Esta es la cifra que se considera como indicadora de la velocidad del influjo nervioso en la rana. En el hombre y los mamíferos es mayor, aproximadamente doble.

Se puede, por último, llevar la excitación a *C* antes de la médula y producir una sacudida refleja; tomando la diferencia entre este período latente y el que ha sido medido en *B*, se tiene el período latente de la médula. Es relativamente considerable. Se aprecia, en efecto, en *C* aproximadamente doble de lo que se había encontrado en *B*.

Volvamos a la excitación directa del músculo. Esta excitación se hace tan bien por las corrientes descendentes como por las ascendentes, es decir, que se obtiene sensiblemente el mismo resultado aplicando el electrodo + que el electrodo — en la parte superior del músculo.

Para la excitación del nervio, la dirección en que es recorrido por la onda excitadora es más importante que para el músculo; una excitación descendente es más activa que una excitación ascendente, es decir, que si se colocan dos electrodos sobre un nervio, haciendo crecer progresivamente la intensidad de las descargas y alternando su sentido, de modo que el electrodo superior tan pronto sea positivo como negativo, se aprecia que se produce una respuesta del músculo en el primer caso, mientras que en el segundo caso la excitación está también influenciada: hay que forzar la intensidad de la descarga para tener una respuesta con la onda ascendente.

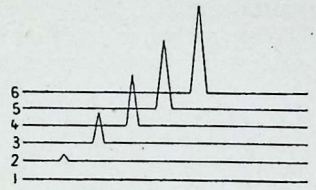


Fig. 538

Supongamos ahora que se actúe ya directamente sobre el músculo, ya sobre el nervio motor, mediante una onda descendente o ascendente, y que se emplean desde luego descargas extremadamente débiles. Al principio no se obtendrá ninguna respuesta, pero haciendo crecer poco a poco la intensidad de la descarga, llega un momento en que aparece el primer esbozo de sacudida. Si el músculo está unido a un miógrafo, en este momento, apenas si la palanca miográfica traza un gancho sobre el papel ahumado. Se dice entonces que se está en el *umbral de la excitación*. Si se aumenta con mucha suavidad la intensidad de las descargas, la altura de la sacudida crece, y alcanza muy rápidamente un límite del que no se puede pasar; se ha llegado a la *sacudida máxima*. Esto es lo que representa la figura 538; el trazado 1 corresponde a una excitación inferior al umbral, que se encuentra en 2. A partir de 5 se tiene la sacudida máxima. Aquí hemos de hacer una advertencia muy importante. Para ciertos músculos no se conoce más que la sacudida máxima, es decir, que una excitación, o es demasiado débil para provocar la menor respuesta, o bien, obteniéndose la respuesta, el músculo da la mencionada sacudida máxima. El corazón está en este caso. Si se separa en una rana la punta del corazón, es decir, el ventrículo aislado de la aurícula, cesa de latir espontáneamente. Entonces se pueden provocar sus sacudidas como se hace con cualquier músculo, el gastronemio, por ejemplo, y se apre-

cia que toda excitación eficaz da la sacudida máxima: o todo o nada.

En el gastronemio de la rana no ocurre lo mismo, se pueden obtener una serie de sacudidas intermediarias entre el umbral de la excitación y la sacudida máxima, como representa la figura 538, pero hay que hacer crecer la excitación muy lentamente; si se obra con mucha rapidez, se pasa del mínimo al máximo.

Hay que hacer notar que la sacudida máxima no corresponde al máximo de acortamiento que puede adquirir el músculo. En efecto, consideremos una sacudida máxima; con una velocidad de rotación del cilindro muy pequeña, estará representada por una simple ordenada fig. 539). Al cabo de dos o tres segundos repitamos la misma excitación, tendremos una segunda sacudida, será un poca más alta que la precedente; si seguimos de esta manera, tendremos una serie de sacudidas cada vez más altas, dando lugar a lo que se denomina el *fenómeno de la escalera*. Después de algún tiempo, la altura de la sacudida permanece constante y después va disminuyendo a consecuencia de la fatiga. La primera sacudida, aunque máxima, es decir, la más alta que ha sido posible obtener como primera sacudida, no correspondía, pues, al máximo de acortamiento de que es susceptible el músculo, puesto que las da más altas a continuación.

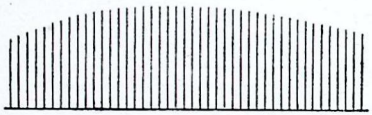


Fig. 539

He aquí, además, otro fenómeno que hace resaltar el mismo hecho. Tracemos también una sacudida muscular (fig. 540) con una velocidad de rotación del cilindro mayor que en los casos precedentes, tendremos el trazado αAa. Hagamos seguir esta primera sacudida de otra excitación idéntica a la primera. Si las dos excitaciones están separadas por un intervalo suficiente, las dos sacudidas serán distintas, pero si se aproxima poco a poco la segunda excitación a la primera, llegará un momento en que la segunda excitación comenzará cuando la primera no ha terminado todavía; su presencia se encontrará sobre la rama descendente de la anterior. Se observa

entonces que la palanca se eleva tanto más cuanto más alto esté el punto de partida de la segunda sacudida. El músculo podía, pues, encogerse más de lo que lo hizo en el primer caso.

Por último, si se hacen una serie de excitaciones periódicas aproximándolas cada vez más, se observa que las sacudidas

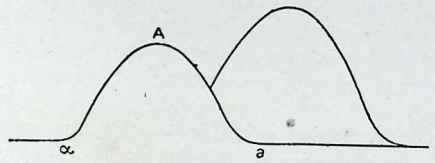


Fig. 540

se fusionan progresivamente unas con otras, se tiene un acortamiento permanente denominado *tétanos fisiológico*, en el que la altura a que se eleva la palanca miográfica es mucho mayor que para la sacudida máxima (fig. 541).

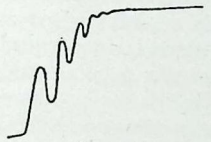


Fig. 541

Por lo tanto, la altura de la sacudida máxima que no se puede sobrepasar por una excitación única, por fuerte que sea, está limitada, no por las condiciones mecánicas del músculo, sino por la insuficiencia de la excitación. La *sacudida máxima* es la sacudida más alta que se puede obtener *con una excitación única*.

Existe una diferencia capital entre una excitación única y una excitación periódica; esta última no produce solamente la repetición de los efectos de la excitación única, hay resultados imposibles de obtener con la excitación aislada y que se obtienen con la mayor facilidad por la excitación periódica. He aquí un ejemplo importante. Cuando se quiere provocar una contracción refleja en la rana, se une al miógrafo el músculo gastronémico izquierdo, por ejemplo, a continuación se descubre el ciático derecho y se secciona en su parte periférica. Para tener un reflejo, se excitará el extremo central del ciático seccionado. Ahora bien; si se pretende practicar esta excitación con una descarga eléctrica única, onda inducida de bobina o descarga de condensador, no se tiene

ninguna respuesta, ni aún con la más fuerte descarga eléctrica. Por el contrario, basta emplear una excitación periódica, aún de intensidad mínima, para obtener inmediatamente una contracción enérgica del gastronemio izquierdo. La médula no entra en actividad bajo la influencia de una excitación única, pero lo hace con mucha facilidad por una excitación periódica. Vese, pues, el abismo que existe entre los resultados de esta acción periódica y lo que se podría imaginar como la repetición de los resultados de una excitación única.

Ley de la excitación eléctrica. — Existe una importante diferencia entre los efectos excitadores de la electricidad según que se trate de una corriente continua o de una descarga brusca.

Si, habiendo aplicado dos electrodos sobre un músculo, se hace pasar por ellos una corriente, primero muy débil, pero que va después aumentando lentamente, se aprecia que el músculo no se acorta más que para intensidades bastante fuertes y, además, este acortamiento no es nunca más que una fracción bastante reducida del que puede producirse en la sacudida. Por el contrario, si se hace variar de una manera brusca la intensidad de la corriente, si, por ejemplo, se lanza a través del músculo una descarga de condensador o una onda inducida, se produce una sacudida muy fuerte, aun para intensidades muy pequeñas. El período variable del principio del cierre o de la ruptura de una corriente continua obra de la misma manera, se obtienen sacudidas llamadas de cierre o de ruptura de corriente continua.

Estos fenómenos son todavía más patentes cuando la excitación se realiza por intermedio del nervio motor. En este caso no se obtiene ni el menor acortamiento del músculo inervado haciendo obrar la corriente continua. Basta, por el contrario, producir una variación brusca de esta corriente, haciéndola crecer o decrecer, o hasta simplemente emplear una onda de cierre, de ruptura, o una descarga inducida o de condensador, para tener una sacudida muy enérgica del músculo.

Ante estos hechos formuló Du Bois-Reymond la ley que lleva su nombre, y según la cual la excitación estaría ligada,

no a la intensidad de las corrientes, sino a las variaciones de esta intensidad.

Numerosos experimentadores han investigado cuáles podrían ser los factores que intervenían en la excitación eléctrica de los nervios y de los músculos. Como acabamos de decir, para Du Bois-Reymond la excitación estaba directamente ligada a la variación de intensidad de la corriente; era tanto más eficaz cuanto más rápida era esta variación. El tiempo durante el que pasa una corriente continua no intervendría desde el punto de vista de la excitación. Esta fué, durante mucho tiempo, la opinión clásica. Después se buscó, sin éxito, relacionar el valor de la excitación con la energía de la descarga. En realidad, investigaciones más recientes han demostrado que la duración de la descarga empleada en producir la excitación tenía una importancia capital. Así, la intensidad necesaria para llevar el músculo al umbral de la excitación con una corriente de corta duración, deberá ser tanto mayor cuanto más corta sea la duración de la acción de esta corriente. Si se considera ahora, no ya la intensidad, sino las cantidades de electricidad que atraviesan el órgano excitado, se aprecia que estas cantidades son, por el contrario, tanto más pequeñas cuanto más corta es la duración. Si se trazan en un gráfico (fig. 541 bis) una serie de puntos que representan, para diferentes duraciones t_1, t_2, etc., inferiores al período latente, las cantidades Q_1, Q_2, etc., que ha sido necesario poner en juego para obtener el umbral de excitación, se aprecia que estos puntos se colocan en una misma recta D. Este hecho se expresa diciendo que la cantidad de electricidad Q, necesaria para alcanzar el umbral con una duración de acción t, es dada por la fórmula $Q = a + bt$ en la que a y b son coeficientes que dependen de las condiciones de la experiencia, naturaleza del animal, emplazamiento de los electrodos, etc. Para condiciones experimentales idénticas y una misma duración de la descarga, se ha reconocido que esta cantidad de electricidad permanece la misma, cualquiera que sea la forma de la onda eléctrica utilizada. Es, pues, posible enunciar una ley general de excitación eléctrica bajo la forma siguiente:

Para conducir un nervio o un músculo al umbral de la excitación, es preciso que la descarga eléctrica ponga en juego

una cantidad de electricidad constante, más una cantidad suplementaria variable y proporcional a la duración del paso de la descarga.

Si se cambian las condiciones de la experiencia, tales como la distancia de los electrodos, o su superficie, y se llevan de nuevo sobre la misma gráfica los valores encontrados para las cantidades en función de duraciones de paso de la corriente,

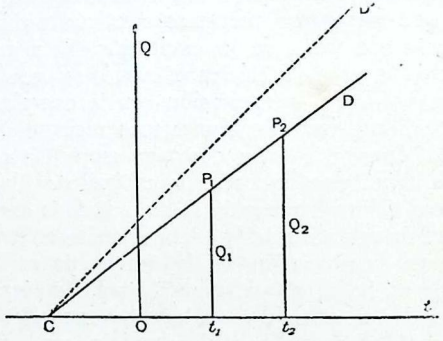


Fig. 541 bis

se obtiene también una recta *D'*, pero distinta de la primera. Ahora bien; la experiencia demuestra que todas las rectas que se pueden obtener para un mismo músculo, tienen la propiedad de cortar el eje de los tiempos en el mismo punto *c*. La distancia *oc*, que se expresa en unidad de tiempo es, pues, para este músculo, un dato independiente de las condiciones en que se ha realizado la excitación; caracteriza la excitabilidad eléctrica. Si se busca su expresión matemática, calculando para qué valor de *t* se hace nula la cantidad de electricidad de la fórmula, se encuentra que esta magnitud *oc*, es aproximadamente igual a la relación de los dos coeficientes *a* y *b*. Esta relación *ab* es constante para un músculo dado, en las condiciones normales; esto es lo que le da toda la importancia. Por el contrario, varía según las especies animales y hasta en cada especie, según el músculo considerado.

En el hombre sano, su valor oscila entre 1 y 7 diezmilésimas de segundo para los diversos músculos del esqueleto.

Examen de la excitabilidad eléctrica (1)

En lugar de aplicar sobre un nervio o sobre un músculo los dos electrodos, de modo que se haga pasar la descarga por una determinada extensión de la longitud de este órgano, se puede no colocar sobre él más que un solo electrodo, acabando de cerrar el circuito un gran electrodo indiferente. Por ejemplo, se colocará una rana sobre una gran superficie metálica recubierta de algodón mojado, éste será el electrodo indiferente; la corriente entrará por una gran superficie en el animal, no producirá ninguna excitación, por estar su acción muy diseminada, después se tocará el punto que se desea excitar con un electrodo muy fino; éste será el electrodo activo. Se practica así lo que Chauveau ha llamado *excitación unipolar*.

La descarga eléctrica pasa entonces por el punto que se quiere excitar, pero no se puede hablar de descarga ascendente o descendente, puesto que la electricidad se propaga en todos sentidos a partir del punto tocado. Se puntualizan entonces las condiciones dándole el nombre del electrodo activo, se excita con el ánodo o con el cátodo. Se puede obrar así sobre el nervio y el músculo puesto al descubierto, o sobre estos órganos recubiertos por la piel. De esta última manera es como se opera generalmente en el hombre, se exploran los nervios y los músculos a través de su piel, por medio de la excitación unipolar. Para simplificar los escritos se han imaginado signos convencionales, que indican la operación que se ejecuta.

La exploración eléctrica de los nervios y de los músculos en el hombre se hace con frecuencia por medio de la onda de cierre o de apertura de la corriente; es necesario entonces indicar el nombre del electrodo, la intensidad de la corriente empleada y el resultado obtenido. El nombre del electrodo se indicará por *A* (ánodo) o *C* (cátodo); el resultado por *S* (sacu-

(1) Para todo lo referente a electrodiagnóstico y electroterapéutica se puede consultar con fruto: *Electrología*, por *Delherm* y *Laquerrière*, del «Tratado de Patología Médica y Terapéutica Aplicada», de *Sergent*. Editorial Pubul, Barcelona, 1923.—(N. del T.)

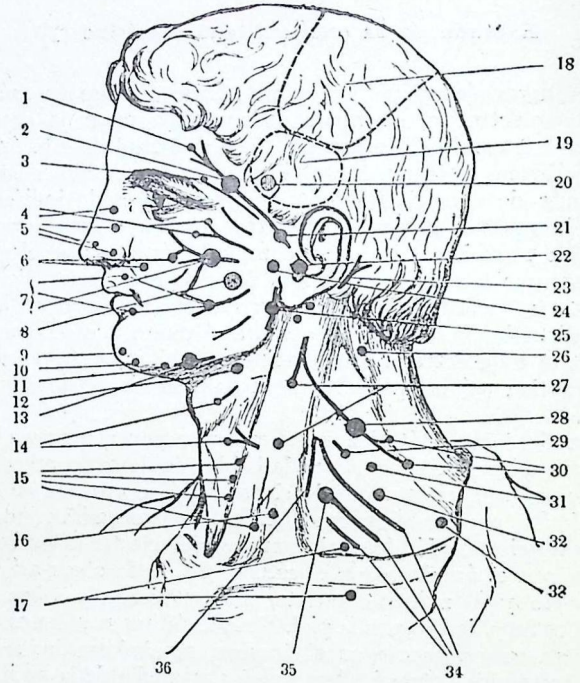


Fig. 542

1. Músculo frontal. — 2. N. facial (rama superior). — 3. M. superciliar. — 4. Orbicular de los párpados. — 5. M. de la nariz. — 6. Zigomático. — 7. Orbicular de los labios — 8. Masetero. 9. Borla de la barba. — 10. Cuadrado de la barba. — 11. Triangulor. — 12. N. hipogloso. — 13. Rama inferior del facial. 14. M. suprahioideos. — 15. M. infrahioideos. — 16. M. omohioideo. — 17. M. Pectoral. — 18. Circonv.—19. Insula.—20. M. temporal.—21. N. facial. — 22. Id. 23. Nervio auricular posterior. — 24. N. facial medio. — 25, N. facial inferior. 26. M. esplenio. — 27. Esternocleidomastoideo. — 28. N. accesorio. — 29. M. angular. — 30. M. trapecio. — 31. N. dorsal del hombro. — 32. N. axilar. — 33. N. torácico. — 34. Plexo braquial. — 35. M. deltoides, Bíceps supinador largo (Punto de Erb). — 36. N. frénico.

dida) o *Z* (Zuckung); el cierre o la apertura por *F* u *O*. Por último, la intensidad de la corriente se da en miliamperios.

Así, *CFS 7* miliamperios, significará que se ha obtenido

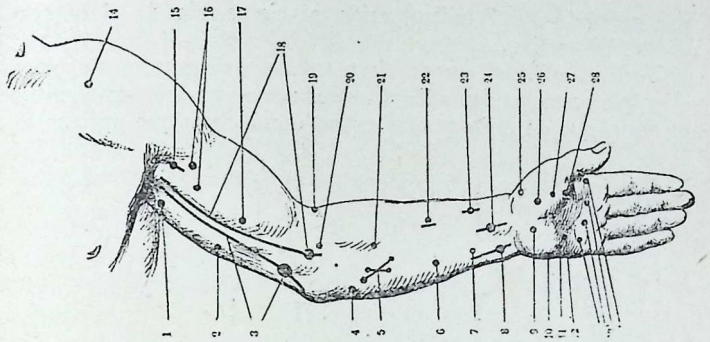


Fig. 543. — 1. M. triceps. — 2. M. biceps (porción interna). — 3. N. cubital. — 4. 5. Flexores. — 6 Flexores surerficiales (medio y anular). — 7. Flexores superficiales (índice y auricular). — 8. N. cubital. — 9. M. palmar interno. — 10. M. Abductor del dedo pequeño. — 11. Flexor corto. — 12. Oponente. — 13. Lumbricoides. — 14. Deltoides. — 15. Nervio músculocutáneo. — 16. Bíceps. — 17. Braquial interno. — 18. N. mediano. —19. Supinador largo. — 20. Pronador redondo. — 21. Flexores. — 22 Flexor superficial. — 23. Flexor largo del pulgar. — 24. N. mediano. —25. Abductor corto. — 26. Oponente. — 27. Flexor corto. — 28. Abductor.

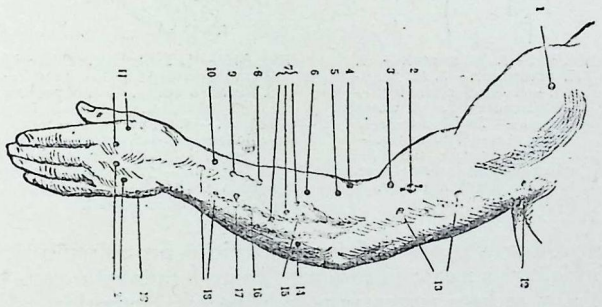


Fig. 544. — 1. Deltoides. — 2. N. radial. — 3. M. braquial. — 4. Supinador largo. — 5. N. radial. — 6. N. radial. — 7. Extensor común de los dedos. — 8. Extensor propio del índice. — 9. Abductor largo del pulgar. — 10. Extensor corto del pulgar. — 11. Interóseo. — 12. Tríceps. — 13. Tríceps (rama externa). — 14. M cubital. — 15. Supinador corto. — 16. Extensor del dedo pequeño. — 17. Extensor del índice. — 18. Extensor largo del pulgar. — 19. Abductor del dedo pequeño. — 20. Músculos interóseos dorsales.

una sacudida con 7 miliamperios, al cierre, siendo el cátodo el electrodo activo.

Existen sobre el cuerpo cierto número de puntos de elección, que corresponden a los diversos nervios y a los músculos, es decir, que en estos puntos es en donde hay que aplicar el

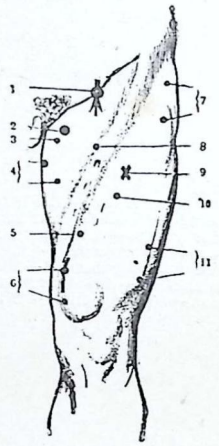


Fig. 545. — 1. N. crural. — 2. N. obturador. — 3. M. pectíneo. — 4. Gran abductor. — 5. Recto anterior. — 6. Vasto interno. — 7. Tensor de la farcia lata. — 8. Sartorio. — 9. Punto común para los músculos extensores del muslo. — 10. Recto anterior. — 11. Vasto interno.

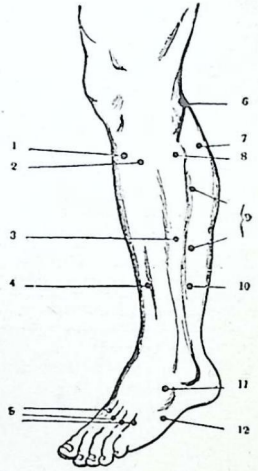


Fig. 546. — 1. Tibial anterior. — 2. Extensor común de los dedos. — 3. Peroneo corto. — 4. Extensor largo del dedo gordo. — 5. Interóseos. — 6. N. peroneo. — 7. Gemelo externo. — 8. Peroneo largo. 9. Sóleo. — 10. Flexor largo del dedo gordo. — 11. Extensor corto común de los dedos. — 12. Abductor del dedo pequeño.

electrodo activo para excitar un nervio o un músculo determinado con la menor intensidad. Si esta localización está bien hecha, y se hace aumentar poco a poco la intensidad de la corriente, la primera sacudida que aparece está limitada a un músculo, o a los músculos inervados por un nervio, según que el punto motor corresponda a un músculo o a un nervio. Las figuras 542, 543, 544, 545, 546 y 547, dan la localización de estos diversos puntos motores, según Erb.

Cuando se aplica el electrodo activo sobre uno de estos

puntos motores, se aprecia la aparición de la sacudida, primero para el cierre del cátodo, después para la del ánodo, después para la apertura del ánodo y por último para la del cátodo, lo que se designa como sigue:

$$CFS - AFS - AOS - COS$$

cuando la corriente aumenta poco a poco.

Estos resultados se obtienen únicamente en estado normal. En diversas afecciones se modifica el orden de las sacudidas y se tiene entonces lo que se llama *una inversión de la fórmula de las sacudidas.*

Esta notación claro es que no se aplica a las exploraciones practicadas con la corriente inducida; entonces se dan los resultados obtenidos en lenguaje ordinario.

En estado normal, cuando se aplica un electrodo activo sobre un punto motor, se tiene con la mayor facilidad una respuesta por las ondas inducidas únicas y un tétanos por una corriente periódica de bobina de inducción. Ocurre que en estado patológico no sucede así y que no se puede provocar la contracción muscular por medio de la bobina, cuando todavía se obtienen respuestas por el cierre de una corriente continua.

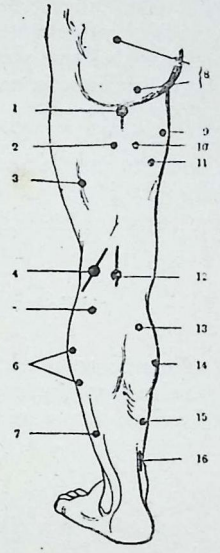


Fig. 547. — 1. N. isquiatico. — 2 Biceps (porción larga). — 3. Biceps (porción corta). — 4. N. peroneo. — 5. Gemelo externo. — 6. Sóleo. — 7. Flexor largo del dedo gordo. — 8. Femoral mayor. — 9. Abductor. — 10. Semitendinoso. — 11. Semimembranoso. — 12. N tibial. — 13. Sóleo (rama interna). — 14. Sóleo. — 15. Flexor común. — 16 N. tibial.

La exploración eléctrica consiste precisamente en investigar en que los nervios y los músculos no responden como en estado normal; en algunos casos, las modificaciones así obtenidas pueden servir para aclarar un diagnóstico.

En estos últimos años se han hecho esfuerzos para evaluar el grado de alteración del nervio o del músculo por la medida de la relación $\frac{a}{b}$ de los coeficientes de la ley de excita-

ción eléctrica. Se ha comprobado que esta relación aumenta considerablemente de valor cuando hay degeneración nerviosa, hasta el punto de hacerse cien veces mayor que en estado normal. Este nuevo método es, pues, susceptible de una gran precisión y permite descubrir débiles modificaciones de la excitabilidad que pasarían desapercibidas con los procedimientos ordinarios de examen eléctrico. Pero la determinación de esta relación $\frac{a}{b}$ en el hombre, presenta ciertas dificultades y necesita una técnica bastante complicada que ha restringido las aplicaciones hasta el día.

XX. — Corrientes de alta frecuencia

Cuando se producen corrientes alternativas, ya por medio de máquinas dinamoeléctricas, ya por medio de bobinas de inducción, nunca se obtienen más que un número muy limitado de alternancias por segundo; para llegar a la centena son necesarios ya interruptores especiales, y a medida que se quiere ir más lejos, las dificultades crecen rápidamente.

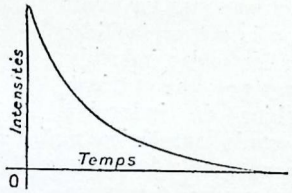


Fig. 548

Desde hace algunos años, gracias a los procedimientos completamente independientes de los interruptores mecánicos, se ha llegado a un número de alternancias más de cien o de mil veces mayor.

Cuando se toma un condensador cargado, una botellá de Leiden, por ejemplo, y se ponen las dos armaduras en comunicación, se produce una descarga, volviendo estas dos armaduras a un mismo potencial. Durante esta descarga, la intensidad de la corriente, muy grande al principio, desciende poco a poco a cero. Se puede representar esta variación de la corriente por una curva de la forma representada en la figura 548. En suma, la electricidad pasa por los conductores que unen

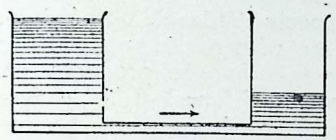


Fig. 549

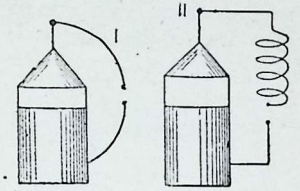


Fig. 550

las dos armaduras como pasaría el agua por un tubo colocado entre dos reservorios que contuviesen agua a diferentes alturas (fig. 549). Al principio, la corriente es muy rápida, después disminuye poco a poco de velocidad, a medida que se establece la igualdad de nivel.

La descarga eléctrica conserva la forma de la figura 548 mientras el conductor que reune las dos armaduras no lleva ninguna espiral en hélice, es decir, que va de una armadura a otra por un camino análogo al que está representado en la figura 550, I. No ocurre lo mismo si en el recorrido del circuito de descarga se encuentra un solenoide, como ocurre en el caso representado en la figura 550, II. Se dice entonces que el circuito posee una autoinducción. Es decir, que las diversas vueltas de espira obran por inducción sobre las vueltas vecinas, como en la bobina de Ruhmkorff el inductor obra sobre las espiras del inducido. Esta autoinducción modifica completamente la descarga, que se hace oscilatoria y puede ser representada por la curva de la

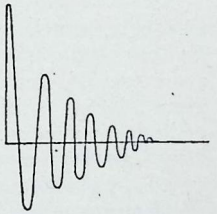


Fig. 551

figura 551, es decir, que la corriente, en lugar de descender desde un valor inicial bastante grande a cero por disminución gradual, sufre cierto número de alternancias. Esto es lo que podría también ocurrir para el agua en la comparación hidráulica que hemos hecho. Podría ocurrir, si la resistencia al paso por el tubo de comunicación no fuese muy grande, que los dos niveles no se pusiesen inmediatamente a la misma altura, sino que no alcanzasen este equilibrio más que después de una serie de oscilaciones que se pueden comparar con las de un péndulo.

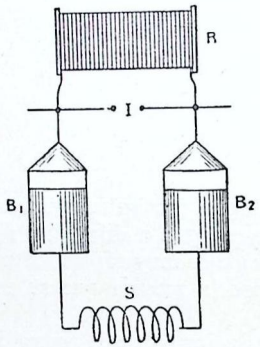


Fig. 552

El número de oscilaciones eléctricas que se producen en estas condiciones varía de frecuencia o, si se quiere, las oscilaciones son más o menos cortas, según la capacidad de la botella, la resistencia del circuito de descarga y su autoinducción. Es decir, según que se tome un condensador de mayor o menor capacidad, un hilo más o menos grueso y largo y un número mayor o menor de vueltas de espira, se tendrán oscilaciones más o menos rápidas. Estas oscilaciones, hemos dicho que pueden pasar de un millón por segundo; pero, cuando se produce una descarga de botella de Leiden, se llega rápidamente al fin de la descarga y las oscilaciones se detienen; es preciso, para que el fenómeno tenga cierta continuidad, recargar la botella cada vez que es descargada.

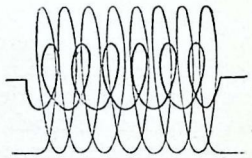


Fig. 553.

Tesla, que es el primero que ha estudiado bien estas corrientes oscilatorias de alta frecuencia, imaginó, para producirlas, un dispositivo menos práctico que el que generalmente se emplea ahora, y que es debido a d'Arsonval. Se unen los

dos polos de una bobina de Ruhmkorff a las armaduras internas de dos botellas de Leiden. Cuando la bobina funciona, las dos armaduras internas se cargan alternativamente, positiva y negativamente. En cuanto la carga pasa de cierto límite, la descarga se hace en *I* (fig. 552). Durante estas cargas y descargas, las armaduras exteriores se cargan y se descargan también en sentido contrario, por influencia a través del solenoide *S* y resulta en este solenoide una serie de oscilaciones eléctricas de alta frecuencia.

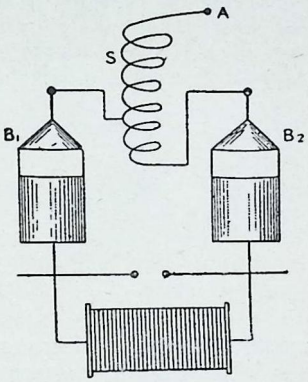


Fig. 554

Se puede, para utilizar estas oscilaciones, unir directamente dos conductores a dos espiras diferentes del solenoide que es de espiras poco numerosas, una veintena, y de hilo muy grueso. O bien (fig. 553) se puede rodear el solenoide de otro hilo mucho más fino, sobre el que el primero obrará por inducción, como ocurre entre los dos circuitos de la bobina de Ruhmkorff. Se recoge entonces la corriente de alta frecuencia de este segundo circuito. El conjunto de las dos bobinas está sumergido en petróleo para tener un buen aislamiento y evitar las chispas entre las diversas partes del aparato.

Con frecuencia se emplea otro dispositivo llamado resonador de Oudin, que se compone de un simple solenoide *S*, de hilo grueso, de vueltas bastante numerosas, pero aisladas unas de otras por el aire. La parte inferior del solenoide está unida a la armadura de una botella de Leiden B_2, cuya otra armadura va, como precedentemente, a la bobina de inducción. Algunas espiras más arriba, el solenoide está unido a la armadura de otra botella de Leiden B_1, como indica la figura 554.

Cuando la bobina de Ruhmkorff funciona, cargando y descargando las botellas de Leiden, se produce en el solenoide una serie de oscilaciones eléctricas, y basta unir el cuerpo que se

quiere electrizar al extremo superior del solenoide en A, para que este cuerpo esté recorrido por oscilaciones de alta frecuencia de que el solenoide es asiento.

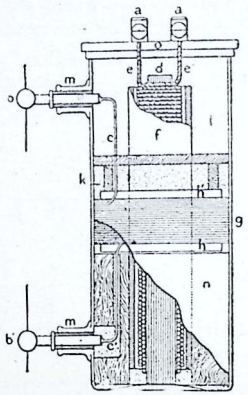


Fig. 555

Con el fin de que este instrumento funcione bien, es preciso elegir conveniente-

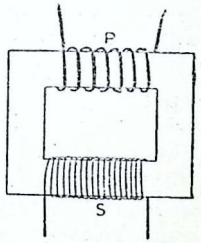


Fig. 556

mente la espira a la que está unida la botella B_1. Para conseguir una buena regularización, se pone en marcha la bobina de Ruhmkorff; después, mediante un mango aislador, se sostiene el hilo unido a B_1, y se busca por tanteo la espira más conveniente, tocándolas sucesivamente.

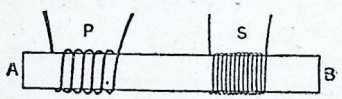


Fig. 557

Para realizar estas experiencias, se necesitan bobinas de Ruhmkorff muy potentes, dotadas de interruptores especiales. Deben poder dar chispas por lo menos de 25 centímetros de longitud.

Desde estos últimos años, el modelo en uso en los laboratorios, debido a Foucault y a Ruhmkorff, es reemplazado de preferencia por lo que se llaman transformadores, cuyo principio es absqlutamente el mismo que el de las bobinas de inducción, pero cuya forma y disposición de los hilos varían según los constructores.

Uno de los modelos generalizados conocido con el nombre de transformador Rochefort (fig. 555), se compone de una larga bobina primaria f de hilo grueso; por ella pasa la corriente inductiva en la que está intercalado el interruptor. La bobina inducida, de hilo más fino, g, es muy corta. Todo está sumergido en una substancia aisladora de consistencia pastosa. Este aparato da muy buenos resultados.

En el transformador Labour, el hilo primario P está arrollado como indica la figura 556, en uno de los lados de un rectángulo de hierro dulce; en el circuito de este hilo se encuentra el generador de la corriente y el interruptor. El hilo secundario S, más delgado, en el que se produce la corriente inducida, está arrollado en el lado opuesto del marco de hierro. A medida que la corriente primaria imanta el marco y le deja volver a su estado primitivo, se produce en el hilo secundario S una corriente inducida alternativa, como la que tiene lugar en la bobina de inducción habitual. A primera vista parece que existe una gran diferencia entre este aparato y la bobina de inducción, pero mirando las cosas de cerca no hay nada de esto. Consideremos primero la bobina de Ruhmkorff y hagamos una primera modificación: en lugar de colocar las bobinas una dentro de otra, pongámoslas una junto a otra sobre un hierro dulce, como indica la figura 557. La corriente primaria P hará variar el magnetismo del hierro dulce y se producirán corrientes inducidas en S. Doblemos ahora el hierro dulce de manera que llevemos la sección B junto a la sección A, y tendremos el transformador Labour.

No hay ningún interés en describir los numerosos interruptores en los que una punta se pone en contacto con mercurio o en los que el circuito se cierra y se abre periódicamente entre dos trozos de metal. Esto tiene una gran importancia práctica, pero lo mejor es examinar los aparatos de este género en el laboratorio, dependiendo de ordinario su calidad de su mejor o peor construcción y de su sostenimiento.

No obstante, hay que hacer una especial mención del interruptor Wehnelt. En una cuba que contiene agua acidulada están sumergidos una lámina de plomo de gran superficie P y un hilo de platino aislado en un tubo de cristal, de modo que únicamente su punta esté en contacto con el lí-

quido. Se intercala este sencillo aparato en un generador de corriente continua al mismo tiempo que el hilo primario de una bobina de inducción o de un transformador, estando el plomo en comunicación con el polo — y el platino con el polo +. Inmediatamente se desprende sobre el hilo de platino oxígeno que interrumpe el circuito. Si la corriente es

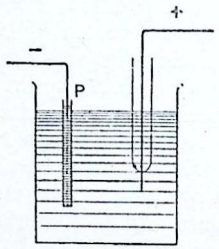


Fig. 558

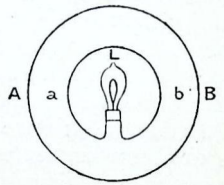


Fig. 559

bastante intensa, se producen en este punto una serie de rupturas de corriente que pueden llegar hasta 1,500 interrupciones por segundo.

Merced a este gran número de interrupciones y a su perfección, este instrumento da excelentes resultados.

Las oscilaciones eléctricas de alta frecuencia se distinguen de las otras corrientes por propiedades notables. En primer lugar, estas oscilaciones se transmiten con mayor facilidad a través de los cuerpos poco conductores, como la madera o un bramante. Generalmente, cuando se quiere encender una lámpara de incandescencia, hay que unirla con los dos polos de un generador de electricidad, es decir intercalarla en un circuito. Basta, por el contrario, unirla, mediante un solo hilo a un solenoide recorrido por corrientes de alta frecuencia, para que se encienda. Aún hay más: aproximando un tubo vacío de aire a este solenoide, sin establecer contacto, se ve que el tubo se enciende. Si se hace pasar la corriente de alta frecuencia por un solenoide, todo cuerpo colocado en el interior de este solenoide estará a su vez recorrido por corrientes de alta frecuencia. Así, representemos el corte de este solenoide por *AB* (fig. 559). Introduzcamos en su interior un círculo de cobre *ab*, que va a parar a los bornes de una lámpara

de incandescencia *L*, inmediatamente se observa que se enciende la lámpara.

La acción de las corrientes de alta frecuencia sobre el organismo es también muy curiosa, estas corrientes pueden atravesar el cuerpo humano sin producir ninguna sensación. Si se toma con la mano los dos hilos que proceden de un solenoide de alta frecuencia no se siente nada, con la condición de no hacer marchar el aparato sino después de haber establecido el contacto; sin esto, al principio, en el momento en que se va a coger el hilo, se produce una chispa que puede dar lugar a una pequeña quemadura. De la misma manera es necesario no tener directamente en la mano un hilo delgado, que se puede calentar o que localiza demasiado la acción sobre la piel; es bueno terminar este hilo por un tallo metálico, que se tomará con la mano. Con estas precauciones, pueden dos personas ponerse en contacto con los dos bornes del solenoide de alta frecuencia, y tomar con sus manos libres los hilos de una lámpara de incandescencia, que se encenderá, sin que la corriente suficiente para ello, que atraviesa a los dos experimentadores, les haga experimentar la menor sensación.

Según ciertos autores, el paso de las corrientes de alta frecuencia por el cuerpo del hombre y de los animales, aumentaría la intensidad de las combustiones que en ellos tienen lugar, lo que se traduciría por un acrecentamiento de los cambios gaseosos, oxígeno consumido y anhídrido carbónico eliminado, pero estos hechos han sido impugnados, y la discusión no está todavía terminada definitivamente.

También se ha dicho que estas corrientes retardarían ciertos cultivos microbianos y podrían atenuar diferentes virus; las mismas reservas deben hacerse sobre este asunto.

Por último, estas corrientes darían lugar a un descenso de la tensión arterial de los sujetos sometidos a su acción, particularmente en los arterioesclerosos, para los que constituiría un tratamiento de los más eficaces. Las esperanzas que el anuncio de resultados satisfactorios habían hecho nacer no han podido ser confirmadas por eminentes cardiólogos, que han observado sujetos hipertensos, antes y después del tratamiento y no han apreciado ninguna mejoría de su estado.

XXI. — Accidentes causados por la electricidad (1)

Los accidentes causados por la electricidad industrial se presentan generalmente en dos condiciones diferentes:

O la víctima ha tocado dos puntos de un circuito recorrido por una corriente, encontrándose estos dos puntos a diferentes potencias. Por ejemplo, la mano derecha, en comunicación con el polo de una máquina, la otra mano con el otro polo; la corriente pasará transversalmente por el tronco de una mano a otra. Este caso se presenta con suma frecuencia en condiciones muy variadas, entre otras, cuando se produce una ruptura en un circuito, y se la quiere reparar sin parar el generador, o si, estando parado el generador, se le pone en marcha durante la reparación. O bien, se toca un hilo en comunicación con un borne de la máquina y se marcha sobre un hilo de comunicación con el otro borne; aquí, la corriente recorre el cuerpo en su longitud. Se puede también imaginar toda suerte de variantes que desgraciadamente se producen con excesiva frecuencia en la industria. Estos accidentes ocurren, la mayor parte de las veces, no en las inmediaciones de la máquina generatriz, sino a distancia, en un cuadro de distribución o en la línea. Allí el peligro está efectivamente disimulado. Cerca de la máquina se le prevé; el generador está en marcha, se está prevenido y se desconfía. En un cuadro de distribución o en la línea, nada indica lo que va a pasar. Se olvida que una pieza de metal de apariencia tan inofensiva es de un contacto tan temible, no se está alerta y el accidente se produce a la menor distracción con tal rapidez, que no se le puede evitar cuando se presenta. Por esto hay que desconfiar principalmente de los puntos alejados de los generadores: allí está el peligro, allí se producen los accidentes.

(1) Véase: *Accidentes causados por la electricidad*, por *Ballhazard*, en *Intoxicaciones*, del «Tratado de Patología Médica y Terapéutica Aplicada», de *Sergent*.—Editorial Pubul, Barcelona, 1924.—(N. del T.)

SÉPTIMA PARTE

RAYOS X Y RADIO (1)

Si se toma un tubo o una ampolla de cristal, en la que se encuentran soldados dos electrodos de platino, y se hace en su interior un vacío suficiente, se ve que las paredes de esta ampolla o de este tubo toman un aspecto fluorescente verde cuando se unen sus electrodos a los polos de una gran bobina de inducción en actividad.

Estudiando de cerca las condiciones de producción de este fenómeno, he aquí lo que se observa.

Sabido es que cuando funciona una bobina de inducción, la corriente inducida de cierre y la corriente de apertura no tienen las mismas propiedades, sino que esta última es la más intensa, y por este motivo, aunque la bobina produce una corriente alternativa, puede ser considerada como teniendo dos polos, uno positivo y otro negativo. Esta clasificación está, pues, basada únicamente en la corriente inducida de apertura.

I. — Rayos catódicos

Si se unen los dos polos de la bobina a la ampolla antes descrita, se produce en el electrodo negativo, en el cátodo, lo que se llaman rayos catódicos.

Estos rayos catódicos son emitidos normalmente a la superficie de metal de donde parten, se propagan en línea recta y en la zona en que la pared de cristal es herida por ellos es en donde se hace fluorescente.

(1) Véase: *Radiología y Radiumterapia*, por *Béclère-Cottenot-Mme. Laborde*, en «Tratado de Patología Médica y Terapéutica Aplicada», de *Sergent*.—Editorial Pubul. Barcelona, 1922.—(N. del T.)

Esto queda puesto en evidencia por la experiencia siguiente. Se toma una ampolla cuya cátodo *K* tiene la forma plana representada en la figura 560, y cuyo ánodo *A* está en un lugar cualquiera del tubo. Una pequeña pantalla metálica recortada en estrella, por ejemplo, *mo*, es movible alrededor de una charnela *o*, de manera que, inclinando el tubo, se pueda enderezar en la posición *mo* y hacerle caer acostado según *no*. Se hace funcionar la ampolla y se aprecia, cuando la pantalla *mo* está vertical, que se produce sobre la cara luminosa *CB* del tubo una sombra que corresponde a esta pantalla, y a una emisión de los rayos catódicos normalmente a *K;* si se deja caer acostada, desaparece la sombra.

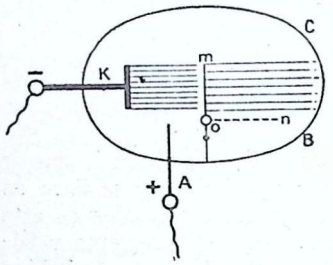


Fig. 560

Cuando en lugar de dar al cátodo una forma plana análoga a la de la figura precedente, se le hace cóncavo (fig. 561), los

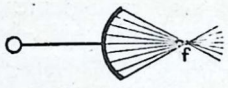


Fig. 561

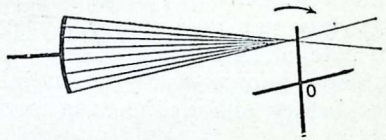


Fig. 562

rayos catódicos parten normalmente de la superficie metálica y forman un foco *f* en el centro de la esfera.

Notemos que la posición y la forma del ánodo no tiene ninguna influencia sobre el fenómeno.

Cuando el foco *f* se forma sobre la pared de cristal del tubo, esta zona se hace fluorescente, pero muy rápidamente se calienta en el punto de incidencia de los rayos catódicos, se hace rojo y el tubo se perfora.

Si en el interior de la ampolla se instala un pequeño molinete colocado de manera que los rayos catódicos hieran las aletas superiores, el molinete se pone a girar como si se soplara sobre él (fig. 562).

Por último, si mientras el tubo funciona se aproxima un imán, son desviados los rayos catódicos. En la experiencia precedente se puede, manejando convenientemente el imán, llevar el foco de los rayos catódicos, sea hacia las aletas superiores, sea sobre las inferiores del molinete, y hacer variar así a voluntad el sentido de la rotación. Es necesario para ello colocar el eje de rotación del molinete a la altura del medio del cátodo, como indica la figura 563, y entonces resulta la experiencia fácilmente.

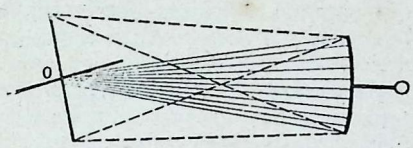


Fig. 563

II. — **Rayos X**

Los puntos de la pared de cristal del tubo heridos por los rayos catódicos son también asiento de otro fenómeno muy importante, aparte de la fluorescencia ya observada. En ellos son emitidos los rayos X, cuyas propiedades estudiaremos más adelante.

En resumen, se obtienen, pues, los rayos X tomando una ampolla o un tubo provisto de un ánodo cualquiera y de un cátodo dispuesto como los de la figura 560 ó 561; se hace el vacío en esta ampolla hasta un grado muy avanzado. Por el intermedio de los electrodos se le une a una bobina de inducción del modelo de las que sirven para las corrientes de alta frecuencia. Los rayos X son emitidos por toda la superficie de la ampolla herida por los rayos catódicos.

Producción y naturaleza de los rayos X. — Los rayos X se propagan en línea recta como los rayos luminosos, pero, a diferencia de éstos, no presentan, en las condiciones ordinarias, ningún fenómeno de reflexión, de refracción, de polarización ni de difracción. Esto se explica por la frecuencia extremadamente grande de las ondulaciones que constituyen estas radiaciones. Son, en suma, rayos de la misma naturaleza

de los rayos luminosos, pero que, en la escala del espectro, se clasifican mucho más allá del ultravioleta. Así, que lo mismo que para las radiaciones luminosos, hay rayos X de desiguales longitudes de onda y, como éstos, gozan de diferentes propiedades.

Estos rayos X atraviesan más o menos fácilmente los cuerpos opacos para la luz ordinaria, el papel negro, el cartón, la madera, los tejidos vivientes, etc. Son más absorbidos por los metales, sobre todo por los metales pesados, plomo, platino.

De una manera general, los cuerpos tienen para los rayos X una transparencia tanto menor cuanto más densos son.

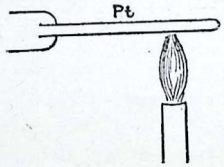


Fig. 564

Desde el punto de vista de la absorción de los rayos X de diferentes calidades, los cuerpos se dividen en dos grandes categorías. La mayor parte, como el aluminio, el agua, los tejidos animales, absorben más las radiaciones que tienen mayor longitud de onda, se denominan radiocroicos; no obstante, algunos, como la plata, absorben igualmente todos los rayos X, se denominan arradiocroicos.

La naturaleza de los rayos depende del grado de vacío de la ampolla en que se engendran. Para cierta presión del gas, ya muy débil e imposible de medir con el manómetro, se tiene una emisión de rayos X; a medida que el vacío aumenta cada vez más, la calidad de los rayos se modifica, se dice que el tubo se hace cada vez más duro: se necesita una tensión cada vez más elevada para que la corriente franquee el tubo; al mismo tiempo, los rayos emitidos tienen una longitud de onda cada vez más corta, y atraviesan más fácilmente los cuerpos opacos dotados de radiocroismo.

En cada caso particular, según lo que se desea hacer, hay que utilizar un tubo apropiado, más o menos duro; es, pues, sumamente interesante poder, a voluntad, variar la dureza de este tubo. Este resultado se obtiene mediante el osmorregulador de Villard. Es sabido que el platino al rojo se deja atravesar por los gases, en particular por el hidrógeno. Si en la pared de una ampolla se ha soldado un tubito de platino abierto hacia el interior del tubo y cerrado hacia el exterior, basta calentar el tubo de platino con un mechero de Bunsen para ponerlo al rojo y permitir al hidrógeno de la llama pasar al interior del tubo (fig. 564). Se puede así hacer entrar gas a voluntad en la ampolla cuando está demasiado dura. Para hacer salir el gas, se recubre previamente el tubo de platino con otro tubo de platino más grueso para protegerlo contra los gases de la llama y se calienta el conjunto. Si en el interior de la ampolla hay hidrógeno, como hay aire exteriormente, el hidrógeno saldrá a través del tubito de platino calentado y la presión bajará en la ampolla.

De esta manera se podrá regular la ampolla a la dureza deseada.

Medición de los rayos X. — Para evaluar la cantidad de rayos X que caen sobre una superficie dada, sirven de base las modificaciones físicas o químicas que hacen sufrir estas radiaciones a los cuerpos que atraviesan. Así, por ejemplo, se utiliza la propiedad de que gozan ciertas sales de colorearse o cambiar de color cuando están sometidas a la acción de los rayos X. Se han entregado al comercio pastillas de composición secreta debidas a Holtzknecht (1), que se colocan sobre la piel del sujeto sometido a la acción de los rayos X. A medida que la acción se prolonga, el color de estas pastillas cambia y, comparándolo con una escala establecida de una vez para siempre, se deduce que la piel vecina a la pastilla ha recibido más o menos rayos durante el tiempo de exposición. Esta cantidad de rayos se evalúa por medio de una unidad arbitraria designada por la letra H, unidad que ha servido para establecer la escala de comparación. Según la indicación de esta escala con la que se compara la pastilla de prueba, se dice que la piel ha recibido $1H$, $2H$, $3H$, etc. La experiencia prueba que a partir de $4H$ se corre el riesgo de ver aparecer trastornos a consecuencia de la aplicación; es preciso, pues, mantenerse por debajo de esta dosis, a menos de razones especiales que únicamente un radiólogo experimentado está en condiciones de apreciar.

(1) Probablemente compuestas de sulfato de potasio mezclado con pequeñas cantidades de sulfito y de hiposulfito del mismo metal, todo aglutinado mediante barniz copal (Sisley).—(N. del T.)

Las pastillas de Holtzknecht son muy caras, además, resulta muy difícil obtenerlas. Sabouraud y Noiré las han reemplazado por pequeños discos de papel embadurnados de platinocianuro de bario, que también cambia de color por la acción de los rayos X. Cuando la pastilla ha tomado un tinte determinado representado en un modelo, se está advertido de que se llega a la zona peligrosa y que es preciso detener la operación. Hay que saber que la pastilla de Sabouraud y Noiré debe estar colocada, durante la operación, no sobre la piel, sino a la mitad de la distancia de esta piel al anticátodo de la ampolla, so pena de que dé informaciones completamente falsas.

La medición de la intensidad de la fluorescencia que los rayos X producen sobre una pantalla de platinocianuro de bario sirve igualmente de procedimiento de dosificación. En este principio se basa el radiofluorómetro de Guilleminot.

Se puede también sacar partido de la propiedad que tienen los rayos X de descargar los cuerpos electrizados. Si se hace pasar un haz de rayos X entre dos placas metálicas que llevan cargas eléctricas contrarias, se establece entre estas placas una corriente que será tanto más fuerte cuanto más intensa sea la radiación, siendo las demás circunstancias iguales. La medida de esta corriente constituirá, pues, una evaluación de la cantidad de rayos X que ha atravesado, en la unidad de tiempo, el intervalo comprendido entre las dos armaduras.

Hemos visto que los rayos X no difieren solamente entre sí por su intensidad, sino que hay también una cuestión de calidad. Es de gran interés conocer la calidad de los rayos X emitidos por una ampolla; pero esta cuestión es muy delicada y no ha recibido todavía más que soluciones aproximadas. En efecto, como casi todas las luces, la radiación emitida por un tubo de Crookes es una mezcla de una infinidad de radiaciones elementales. No se puede, pues, desde luego, más que apreciar la calidad media. Dependiendo ésta del grado de vacío de la ampolla, se tendrá una primera indicación por el conocimiento de la resistencia que ofrece la ampolla al paso de la corriente.

Para darse cuenta del grado de dureza de la ampolla se utiliza el *espinterómetro* de Béclère, que consiste en esencia en un excitador de bolas que se une a los electrodos del tubo en función. Se separan más o menos entre sí las bolas de este excitador; si el tubo está muy blando, la descarga pasa por el tubo inmediatamente que se separan las bolas, aunque sea poco. Si, por el contrario, el tubo está muy duro, la descarga pasa de preferencia por el aire, y es preciso separar mucho las bolas para que el tubo funcione (fig. 565). A cada dureza de tubo corresponde una longitud de chispa equivalente, por debajo de la que el tubo no marcha; se puede, pues, por esta longitud de chispa, indicar la dureza del tubo, y con el osmorregulador volver siempre a una dureza determinada.

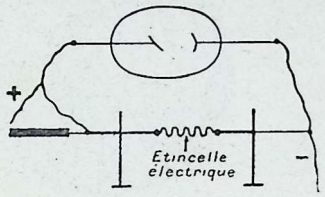


Fig. 565

Pero la calidad de la radiación correspondiente a una longitud de chispa equivalente varía según el modelo de tubo utilizado, por lo que es preferible medir directamente la dureza de la radiación emitida. Con este objeto se utiliza, generalmente con ventaja, el radiocromómetro de Benoist (fig. 566). Se compone este aparato de una lámina circular de plata alrededor de la que están dispuestas otras láminas de aluminio de espesor creciente. Se coloca este pequeño aparato sobre una pantalla al platinocianuro de bario y se hace caer sobre ella los rayos cuya calidad se quiere determinar. Se observa que para las láminas de aluminio gruesas, la sombra es más obscura que la de la lámina de plata; para las láminas de aluminio delgadas, ocurre lo contrario. Existe una cuya sombra es del mismo valor que la de la lámina de plata; el número de esta lámina representa una indicación de calidad de los rayos X. En efecto, el aluminio es un metal radiocroico; como tal, detiene tantos más rayos cuanto más blandos son éstos. La plata, por el contrario, retiene igualmente una misma fracción de radiación cualquiera que sea su calidad. Compréndese, pues, que si se trata de una radiación blanda, absorbiendo el aluminio proporcionalmente una gran cantidad de estos rayos, bastará un pequeño espesor de este metal para detener la

misma fracción de radiación total que la lámina de plata. Por el contrario, para una radiación dura, el aluminio será relativamente transparente, y no será necesario un gran espesor para producir la misma absorción que la lámina de plata.

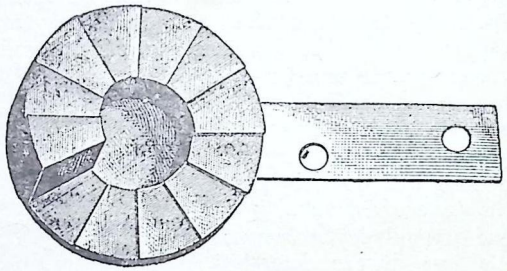


Fig. 566

Por ejemplo, se dirá: "Los rayos que se han utilizado, corresponden al núm. 4 del radiocromómetro de Benoist"; esto querrá decir que su calidad es tal que la sombra es igual para la lámina de plata y la cuarta lámina de aluminio. Los rayos que corresponden a un número pequeño del radiocromómetro de Benoist son poco penetrantes, se absorben fácilmente, aun por los cuerpos poco densos, los tejidos vivos, como los músculos, por ejemplo. A medida que el número crece, los rayos son cada vez más penetrantes, corresponden a ampollas cada vez más duras, y atraviesan más fácilmente los cuerpos relativamente densos, como los huesos.

Es evidente que esta indicación es absolutamente arbitraria, no tiene más que un mérito, que es que permite reconocer la calidad de los rayos que se han utilizado en una experiencia e indicarlo a otro observador, que podrá así colocarse en las mismas condiciones, lo que es ya una ventaja considerable.

Aplicaciones de los rayos X

Radiografía y Radioscopia. — Si se coloca en una caja de cartón un trozo de metal, los rayos X atravesarán fácilmente el cartón, pero serán detenidos por el metal. De la misma manera, si se interpone un miembro en el trayecto de los rayos X, atravesarán más fácilmente la carne que los huesos.

Ahora bien; estos rayos X impresionan las placas fotográficas; además, hacen luminosas, al tocarlas, las pantallas recubiertas de ciertas substancias, como el platinocianuro de bario.

Si se pone la caja que contiene un objeto de metal sobre una placa fotográfica y se hacen caer rayos X sobre el conjunto, la placa sensible recibirá los rayos por todas las

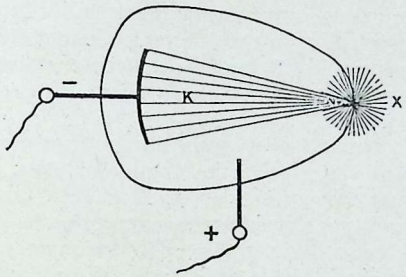


Fig. 567

partes en que no sean detenidos por el objeto metálico, y, al revelarla, aparecerá la sombra de este objeto. De la misma manera, repitiendo esta experiencia con un miembro humano, se tendrá la sombra de los huesos contenidos en este miembro. Este es el principio de la *radiografía*. Las sombras pueden también ser observadas sobre una pantalla recubierta de platinocianuro de bario, que se hará luminoso en la obscuridad en todas las partes alcanzadas por los rayos X. Este es el principio de la *radioscopia*.

¿Cuáles son los inconvenientes de los primitivos tubos de producción de rayos X? Hiriendo los rayos catódicos la pared de la ampolla en una gran extensión, como en el tubo de la figura 560, el manantial de rayos X es muy extenso; por consiguiente, las sombras producidas por los objetos son poco limpias. Hemos visto, en efecto, y la experiencia diaria así como el razonamiento lo hacen comprender fácilmente, que las sombras producidas por los cuerpos son tanto más precisas cuanto

más se aproximan a un punto los manantiales de luz. A medida que la fuente luminosa se hace más grande, los bordes de la sombra se esfuman. Para remediar este defecto de los tubos, se reemplazaron primero los cátodos planos por cátodos cóncavos (fig. 567). Si la curvatura de estos cátodos está convenientemente elegida, los rayos que de ellos emanan van a formar un foco sobre la pared del tubo en una región muy localizada que se convertirá en el manantial de los rayos X (fig. 567).

Ahora se presenta una nueva dificultad. El punto herido por los rayos catódicos se calienta rapidísimamente y en cuanto se fuerza un poco la intensidad de la corriente excitadora, o en cuanto se prolonga un poco la duración de la sesión, el tubo de cristal se perfora.

Pero el cristal no es el único cuerpo que, herido por los rayos catódicos, da origen a los rayos X; otros le son superiores, y el platino parece ocupar el primer lugar.

Se obtienen, por consiguiente, excelentes tubos productores de rayos X colocando en el foco de los rayos catódicos una laminita de platino llamada anticátodo; la fuente de los rayos X está en el punto en que este anticátodo es herido por los rayos catódicos. Semejante ampolla se denomina un tubo focus (fig. 568); aquí no hay riesgo de perforar la pared de cristal y se pueden utilizar corrientes muy enérgicas, resultando no solamente sombras más limpias, sino también mayor intensidad de los rayos emitidos.

Durante la marcha, el anticátodo se calienta poco a poco, acaba por ponerse al rojo y hasta por fundirse si se insiste; es conveniente, pues, darle cierto espesor.

En algunos tubos se puede hacer pasar agua por el anticátodo hueco para enfriarlo; el tubo puede, en tal caso, marchar durante más tiempo sin interrupción.

La desigual permeabilidad de los diferentes tejidos a los rayos X permite explorar el interior del organismo. Los huesos se reconocerán por su opacidad; los pulmones, por el contrario, por su gran transparencia... Algunas vísceras, como el tubo digestivo, que normalmente no se distinguen de los órganos vecinos, se harán aparentes si se les inyecta una substancia opaca a los rayos X, como una sal de bismuto. De esta manera se consigue descubrir en el estado patológico alteraciones de forma y de estructura de los órganos.

Localización de los cuerpos extraños. — Cuando estos cuerpos son metálicos, como los proyectiles, agujas, etc., sus sombras se distinguen claramente de las de los tejidos vecinos, y se puede así, no sólo reconocer su presencia, sino también determinar su posición exacta.

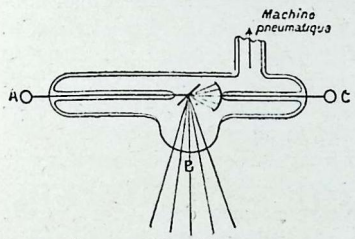


Fig. 568

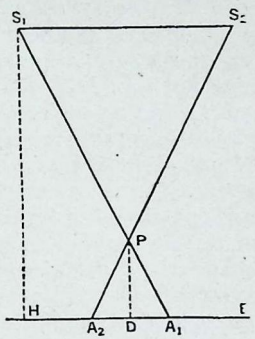


Fig. 569

Con frecuencia basta para esto hacer dos radiografías, o hasta dos radioscopias, practicadas de frente y de perfil, para tener una indicación suficiente acerca de la posición del cuerpo extraño. Un procedimiento más exacto consiste en desplazar el foco de emisión de los rayos, paralelamente a la placa o a la pantalla E, en cierta extensión S_1, S_2 (fig. 569). La sombra del proyectil sufre entonces un desplazamiento simultáneo y de sentido inverso A_1 A_2. Si se miden estos dos desplazamientos, así como la distancia S_1H del foco a la placa, se podrá calcular la distancia PD del proyectil a la placa mediante la fórmula

$$PD = SH \times \frac{A_1A_2}{A_1A_2 + S_1S_2}.$$

Basta entonces marcar sobre la piel el punto de emergencia del rayo que pasa por el cuerpo extraño y normal a la superficie cutánea, para que el cirujano esté en posesión de todos los elementos necesarios para la busca y extracción del cuerpo extraño.

Radioterapia. — Los rayos X ejercen una acción enérgica sobre la vitalidad de las células. A pequeñas dosis, parecen tener una acción más bien excitante, mientras que a dosis mayores producen fenómenos de destrucciones celulares.

Los tejidos son muy desigualmente sensibles frente a estas acciones de los rayos X. Al parecer, los que presentan una sensibilidad mayor son los elementos más jóvenes, aquellos cuya actividad reproductora es mayor, el porvenir carioquinético más largo, la morfología y las funciones menos definitivamente fijas. Las células de los tumores malignos entran en esta categoría; por ello, en estos últimos tiempos, se han aplicado con éxito los rayos X al tratamiento de ciertos cánceres. El fin que hay que alcanzar es hacer absorber por el tejido enfermo la mayor cantidad posible de radiaciones, porque esta cantidad absorbida es la única eficaz, no teniendo ninguna acción sobre los tejidos los que únicamente los atraviesan. El ideal sería poder alcanzar las partes que se desean destruir con rayos blandos, muy absorbibles por estos tejidos, pero se tropieza con una técnica operatoria muy delicada y con una grave dificultad, por el hecho de la heterogeneidad de radiaciones de las ampollas y del radiocroismo de los tejidos vivos. Estas son verdaderamente causas de que las partes superficiales de los tumores absorban mayor cantidad de rayos que las profundas. Además, si los tejidos que se quieren destruir están, como ocurre con frecuencia, situados más profundamente debajo de la piel, será esta piel la que absorberá una parte importante de los rayos, y podrán resultar de ello graves accidentes cutáneos. Se remedia esto, en la medida de lo posible, empleando una radiación dura. Así, actualmente todos se esfuerzan para las necesidades de la radioterapia profunda, en producir rayos de gran penetración. Otro procedimiento corrientemente utilizado consiste en hacer pasar el haz de rayos X a través de una lámina intensamente radiocroica, como el aluminio o el cobre, que sirve de filtro. Este filtro retiene entonces los rayos más blandos de la radiación emitida por la ampolla y nos encontramos en las mejores condiciones para obtener una radiación máxima de los tejidos profundos, sin que la piel absorba una dosis nociva. Desgraciadamente, esta radiación dura no es tan absorbida por el tumor como lo sería una radiación blanda; pero es un círculo vicioso del que es imposible salir.

Los rayos X que obran sobre los tumores no están exentos de peligros para los tejidos sanos, y pueden producir accidentes bastante graves si se les expone a ellos demasiado tiempo. Particularmente las personas que manipulan con frecuencia y durante mucho tiempo los objetos iluminados por los rayos X acaban por tener verdaderas quemaduras de la piel de las manos. Estas radiodermitis, como se las denomina, no se producen inmediatamente después de la exposición a los rayos X, tardan algún tiempo en aparecer y son extremadamente difíciles de curar. Las personas víctimas de un primer accidente se hacen cada vez más sensibles y, si persisten en no protegerse, acaban por presentar trastornos de la piel, en ocasiones espantosos. Al principio no hay más que una alteración muy superficial, con caída de los pelos, después la piel se recubre de costras, las uñas aumentan de espesor, se desprenden y acaban por caer. En este período es necesario que pasen años para ver llegar la curación y la menor imprudencia da lugar a un recrudecimiento del mal.

Vese, pues, que hay que manejar los rayos X con gran prudencia, tanto más cuanto que hay susceptibilidades individuales y que es imposible formular reglas que pongan al abrigo de cualquier accidente. Es preciso ser tanto más desconfiado cuanto que, como antes hemos dicho, las radiodermitis no se producen durante el curso de la aplicación misma de los rayos; no se puede seguir la marcha progresiva, se los ve aparecer muchos días después de la sesión (1).

III. — **Radio**

Cierto número de cuerpos, llamados radioactivos, cuyo tipo es el Radio, gozan de la propiedad de emitir espontáneamente, de una manera continua y en apariencia indefinida, radiaciones

(1) Respecto a los medios adecuados para proteger al enfermo y al médico radiólogo, de la acción nociva de los rayos X, consúltese la obra de Radiología y Radiumterapia antes citada. (N. del T.)

cuyas propiedades son análogas a las de los rayos X. En realidad, el radio emite tres especies de radiaciones, designadas con los nombres de rayos α, β y γ.

Los rayos γ son de la misma naturaleza que los rayos X; se distinguen, no obstante, por una penetrabilidad mucho mayor.

Los rayos β son de la misma naturaleza que los rayos catódicos. Están constituídos por corpúsculos portadores de una corriente eléctrica negativa y animados de una gran velocidad.

Por último, los rayos α se conducen de un modo inverso a los rayos β en el campo magnético. Están constituídos de corpúsculos cargados positivamente.

Es decir, que cuando se quieren desviar por medio de un imán los rayos que emanan del radio, se observa que la acción es nula con respecto a los rayos γ, como ocurre con los rayos X, mientras que α y β sufren desviaciones de sentido contrario, desviándose β como lo harían los rayos catódicos.

Los conceptos actuales acerca de la constitución de la máteria, hacen de estas partículas α y β los constituyentes de todo átomo.

Retenidos juntos por las fuerzas de atracción de sus cargas eléctricas, son en ciertos cuerpos y bajo influencias todavía desconocidas, separados y proyectados con una gran velocidad, dando lugar a la radiación radioactiva.

Cuando se quiere desviar con un imán el haz de rayos que emanan del radio, se observa que la acción es nula sobre los rayos γ como sobre los rayos X, mientras que α y β sufren desviaciones de sentido contrario, conduciéndose β como los rayos catódicos.

Los rayos del radio no contienen ninguna utilidad práctica desde el punto de vista del diagnóstico; en este sentido son preferibles los rayos X. Pero se les emplea con un fin terapéutico cuando se desea prolongar mucho tiempo una acción. Las sales de radio tienen, además, la ventaja de poder ser colocadas en el seno mismo de los tejidos patológicos, encerrándolos en pequeños tubos de forma y dimensiones apropiadas. Las radiaciones emitidas alcanzan así las

partes que hay que tratar sin pasar a través de la piel o de los tejidos sanos.

Por último, algunos autores creen que la composición particular de la radiación radioactiva y su acción ligera, pero prolongada, le confieren en ciertos casos superioridad sobre los rayos X. Junto a las sales de radio, se utiliza también en terapéutica un gas radioactivo: la emanación de radio. Este gas emite una radiación idéntica a la del radio, pero que disminuye rápidamente de valor, de suerte que al cabo de cuatro días, está reducida a la mitad de su valor inicial. Es preciso, naturalmente, tener en cuenta este decrecimiento de actividad en las aplicaciones terapéuticas de la emanación de radio.

OCTAVA PARTE

ACÚSTICA

I. — Generalidades

Para que un observador experimente una sensación sonora, es necesario que haya una región del espacio en que el aire sea puesto en vibración, y que las vibraciones así producidas puedan transmitirse hasta el oído del observador.

El sonido puede propagarse a través de los sólidos, de los líquidos o de los gases, pero no puede franquear el vacío, puesto que en él no se encuentra nada que pueda vibrar y transmitir así el sonido. Es muy fácil de demostrarlo experimentalmente. Tomemos un globo de cristal provisto de una guarnición de cobre y de una llave, en el que suspenderemos una campanilla; agitando el globo, la campanilla se pone en movimiento, y el sonido que emite se oye a través del aire y de las paredes del globo. Si ahora, poniendo el orificio *B* (fig. 570) en comunicación con una máquina neumática, disminuímos la presión del aire en el interior del globo, el sonido se debilita poco a poco y desaparece completamente cuando se llega al vacío.

De la misma manera, si se reemplaza el aire por un gas que tenga, en igualdad de presión, una masa menor, el hidrógeno, por ejemplo, el sonido es menos intenso.

El sonido se transmite fácilmente a través de los líquidos y sólidos. Así, cuando un barco de vapor va por el mar, basta para oir el ruido de la hélice a una distancia muy considerable, sumergir la cabeza debajo del agua. Por otra parte, si se aplica el oído en el extremo de un poste de madera o

de un tronco de árbol cortado, se percibe con una intensidad notable el menor choque o roce ejercido en otro extremo. Esta experiencia puede variarse de muchas maneras.

El sonido se propaga con una velocidad variable según la naturaleza de los medios, la temperatura, la presión, etc. En la práctica se puede considerar que esta velocidad en el aire es aproximadamente de 333 metros por segundo; en el agua, es mayor, 1,400 metros aproximadamente; en la fundición, mayor todavía, 3,500 metros poco más o menos.

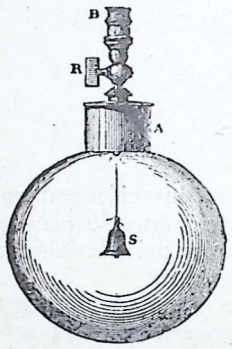


Fig. 570

Resulta, por lo tanto, que si se produce un sonido en una región de la atmósfera en la que nos encontramos, no percibimos este sonido sino cierto tiempo después de su producción. Este retardo es tanto mayor cuanto más alejado se está de su origen. Si estamos a 333 metros del punto en que se dispara un fusil, no percibimos el estampido más que un segundo después del disparo. Como, en la práctica, a consecuencia de la gran velocidad de la luz, se puede considerar que no hay retardo apreciable para la percepción visual de los fenómenos que se producen en nuestras inmediaciones, habrá transcurrido un segundo entre el momento en que vemos la luz o el humo del disparo, y el momento en que le oímos. Este procedimiento nos permite determinar la distancia a la que se encuentra el origen de un ruido que nos llega, si la causa de este ruido va acompañada de un fenómeno visible. Así, he aquí un relámpago, después, transcurridos cierto número de segundos, el estampido del trueno, nos basta multiplicar este número de segundos por 333 metros, para tener la distancia a la que se ha producido el rayo.

Cuando un sonido se propaga por el aire puede, encontrando un obstáculo, reflejarse como la luz, o hasta refractarse. Este último caso no tiene para nosotros gran importancia práctica. No sucede lo mismo con la reflexión que, unida a los hechos que acabamos de exponer sobre la velocidad de propagación del sonido, nos conducirá a las más importantes

consecuencias. Supongamos que se emite un sonido en un punto *A*, frente (fig. 571) a un obstáculo *BB'*, que reflejará este sonido; para volver al punto *A* el sonido deberá recorrer el camino *AC*, después el camino *CA*, es decir, una distancia igual al doble de *AC*. Para fijar las ideas admitamos que dos veces *AC* hacen 333 metros, es evidente que el observador, colocado en *A*, oirá, en primer lugar, el sonido que acaba de emitir, después, transcurrido un segundo, la repetición de este sonido. Se producirá lo que se denomina eco. El intervalo transcurrido entre el sonido emitido y el eco varía con la

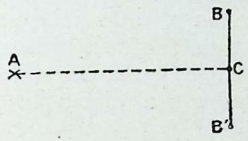


Fig. 571

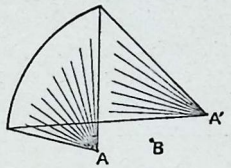


Fig. 572

distancia *AC*; para que el eco sea perceptible, es preciso que este intervalo sea suficiente para evitar la confusión entre los dos sonidos. Se admite generalmente que esta confusión no se produce cuando el segundo sonido nos llega un décimo de segundo después del primero; es, pues, necesario que el doble de *AC* sea, por lo menos, de 33,3 m. o que *AC* tenga aproximadamente 17 metros.

Por consiguiente, se percibe el eco cuando se está a menos de 17 metros del obstáculo que refleja el sonido.

Puede ocurrir que el eco sea múltiple, es decir, que después de haberse reflejado una primera vez sobre *BB'*, el sonido se refleje por segunda vez sobre otra superficie, después sobre otra tercera, etc. Este fenómeno se produce a menudo en la naturaleza, y se citan ejemplos maravillosos en ciertas montañas.

La reflexión del sonido puede ir acompañada de una concentración. Ocurre, en efecto, que una onda sonora salida de un punto *A* (fig. 572) va a herir una superficie curva, una bóveda, una pared de cerca, dando lugar a la formación de un verdadero foco en *A'*. Ciertas obras son notables en

este sentido; resulta que un observador puesto en *A'* puede conversar en voz baja con otro colocado en *A* sin que un sujeto intermedio situado en *B* sorprenda la conversación tenida.

Estos diversos principios tienen una importancia capital desde el punto de vista acústico de las salas de espectáculos y de los anfiteatros. No tener esto en cuenta puede conducir a los mayores contratiempos. Si se producen reflexiones y concentraciones en algunos puntos de la sala, resultan ecos y superposiciones de vibraciones sonoras que hacen imposible la percepción del sonido emitido directamente, o por lo menos le alteran gravemente y le hacen muy penoso. Sabida es la diferencia que existe desde este punto de vista entre las diversas construcciones. Algunas veces, en un recinto relativamente pequeño, es imposible seguir a un orador, mientras que en los inmensos teatros antiguos, se sorprenden las más delicadas modulaciones de la voz de los actores a distancias prodigiosas.

Cuando, a consecuencia de un error, la acústica de una sala es defectuosa, no hay más que un medio para remediarlo: es necesario suprimir las reflexiones. Se consigue este resultado por medio de colgaduras, cortinas, tapices y, en general, de substancias blandas de que se recubren todas las superficies rígidas. Se atenúan también estas reflexiones mediante redes de hilos tendidas delante de las superficies sospechosas; las ondulaciones sonoras atraviesan estas redes y se amortizan.

II. — Cualidades del sonido

Dos sonidos pueden diferir entre sí por su intensidad, por su tono, por su timbre.

Tomemos cualquier cuerpo sonoro, un diapasón, que haremos vibrar; podrá emitir sonidos más o menos intensos, según que sus vibraciones sean más o menos amplias. Este diapasón abandonado a sí mismo dará un sonido que irá disminuyendo de intensidad al mismo tiempo que el movimiento de sus ramas se extingue poco a poco. Lo mismo ocurre para cualquier otro instrumento sonoro, y se puede decir que la intensidad de un sonido está, en igualdad de las demás circunstancias, directamente unida a la amplitud del movimiento vibratorio del cuerpo que lo emite. A medida que nos alejamos del cuerpo, para un mismo movimiento vibratorio, la intensidad del sonido va disminuyendo. A pesar de todos los esfuerzos realizados, no se ha podido, hasta la fecha, hacer un buen aparato que permita medir la intensidad de los sonidos. Para la luz, tenemos fotómetros; no tenemos todavía un buen acúmetro. Este vacío es muy sensible para la práctica de la otología, porque el acúmetro sería indispensable para una justa apreciación de la agudeza auditiva.

La segunda cualidad del sonido es su tono; depende del número de vibraciones por segundo del aire en las inmediaciones del oído. Todo el mundo conoce la impresión producida por sonidos de tono diferente. Es una noción corriente, no hay ningún interés en describirlo, no se podría comprender qué impresión resulta en uno que no lo ha experimentado. Numerosos trabajos han establecido las relaciones que existen entre el tono de los sonidos y el número de vibraciones, y han demostrado que basta dar este número de vibraciones para fijar el tono, es decir, para asegurar a todos los sonidos una cualidad común, bien conocida de todas las personas que posean algunas nociones de música. Así, todos los sonidos que tienen 435 vibraciones por segundo son inmediatamente reconocidos por estar a la misma altura que el *la* del diapasón normal, cualquiera que sea el instrumento que lo emita, piano, clarinete o voz humana. Dos sonidos del mismo tono se dice que están al unísono.

El tono de un sonido es, sin discusión, su cualidad más importante; así, generalmente, el primer dato que se tiene de un sonido es el tono. Para dar este tono, el método más preciso es indicar el número de sus vibraciones. En la práctica de la música no se emplean sonidos de cualquier tono; la experiencia demuestra que no todos producen una impresión agradable, y se han clasificado los que son utilizables, según una nomenclatura especial conocida con el nombre de gama.

Se ha partido del principio de que en música la asociación de los sonidos debe hacerse teniendo en cuenta la relación de los números de vibraciones de este sonido. Así, si un so-

nido tiene doble número de vibraciones que otro, se dice que están a la octava, y su sucesión produce en un oído educado una impresión conocida, siempre la misma, sea cual fuere el primero de estos dos sonidos. Lo mismo ocurriría con cualquier otra relación, que produciría también una sensación especial. Partiendo de un primer sonido adoptado por convenio entre los músicos, los sonidos sucesivos que la experiencia ha demostrado ser necesarios están con el primero en las relaciones:

$$1 \quad \frac{9}{8} \quad \frac{5}{4} \quad \frac{4}{3} \quad \frac{3}{2} \quad \frac{5}{3} \quad \frac{15}{8} \quad 2$$

y llevan los nombres de:

do re mi fa sol la si do

Este conjunto constituye una octava de la gama; los sonidos son las notas de la gama. El *do* del final de la línea está a la octava del del principio, y a partir de él vuelve a comenzar una serie semejante, y así sucesivamente. Se designa cada serie por un índice colocado junto a las notas, así, una nota escrita fa_2 o sol_4, darán a conocer en seguida cuál es su sitio. Por debajo de la primera octava hay que recurrir a índices negativos; así, se tendrá el sol_{-2} o el la_{-1}.

Para que todas estas notas estén completamente definidas, basta conocer el número de vibraciones de una de ellas. Por razones sobre las que es inútil insistir ahora, se han atribuído 435 vibraciones a la nota escrita la_3.

La relación que existe entre el número de vibraciones de dos notas se denomina intervalo. Con frecuencia se define la gama por los intervalos sucesivos de las notas que se siguen en lugar de tomar sus relaciones con el *do*; se tiene entonces la serie siguiente:

$$\frac{9}{8} \quad \frac{10}{9} \quad \frac{16}{15} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{10}{9} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{16}{15}$$

Como se ve, no se encuentran en esta serie más que tres intervalos que se vuelven a encontrar indefinidamente. $\frac{9}{8}$ se denomina tono mayor; $\frac{10}{9}$ tono menor, y $\frac{16}{15}$ semitono.

Algunas veces, los músicos no encuentran en la serie que acabamos de definir todas las notas que les son necesarias, y modifican entonces estas notas *sosteniéndolas* o *bemolizándolas*. Sostener una nota es aumentar el número de sus vibraciones en la relación $\frac{25}{24}$. Bemolizar una nota es disminuirla en esta misma relación. Así, el *do* sostenido, que se escribe *do* ♯, está, con el *do* de la misma octava, en la relación $\frac{25}{24}$, mientras que el *si* bemol, que se escribe *si* ♭, está, con el *si* de la misma octava, en la relación $\frac{24}{25}$.

Además de la gama, hay otra serie de sonidos que desempeñan, tanto en música como en la fisiología de la palabra, un gran papel: es la serie de los armónicos de un sonido fundamental. Consideremos un sonido cualquiera, que forma o no parte de la gama de los músicos, le llamaremos sonido fundamental. Otro sonido que tenga doble número de vibraciones será el primer armónico; el sonido que tenga tres veces más vibraciones será el segundo armónico, y así sucesivamente; los armónicos del sonido fundamental tienen sucesivamente 2, 3, 4, 5, etc., veces más vibraciones que este sonido fundamental.

Si se parte de una nota de la gama, ciertos armónicos podrán ser también notas de la misma, pero los hay que caen entre dos notas y son lo que se denominan sonidos falsos, es decir, inutilizables en música. Así, hablando de do_1, los armónicos son sucesivamente:

do_2 sol_2 do_3 mi_3 sol_3 A do_4 etc.

El sexto armónico *A*, no está en la gama; lo mismo ocurriría con el 10.º, 12.º, 13.º, 16.º, etc.

Vamos a ver la importancia de los armónicos.

Dos sonidos de la misma intensidad y del mismo tono pueden diferir por su timbre. Una arpa, un clarinete, un oboe, una voz humana, etc., que dan sucesivamente, con una intensidad análoga, la misma nota la_3, por ejemplo, no se confunden unas con otras. Esto depende de que este la_3 no es jamás una nota pura, un sonido fundamental único. Por lo menos,

esto es muy raro. Un diapasón puesto en vibración con cuidado puede dar una nota única fundamental; para los demás instrumentos, esta nota está siempre acompañada de algunos de sus armónicos. No solamente no se procura evitar estos armónicos, sino que gracias a ellos se obtienen la diversibilidad de timbres y la riqueza excepcional de ciertos sonidos, tales como los que son emitidos por los órganos.

Esto es fácil de demostrar. Tomemos una serie de diapasones de los que el primero es do_1, por ejemplo, y los otros dan los armónicos sucesivos. Pongamos el do_1 en vibración, oiremos un sonido fundamental puro, pero sordo, sin belleza. Añadámosle sucesivamente los sonidos de algunos armónicos, poco a poco oímos que el sonido se llena y toma un carácter de riqueza que no pertenece a ninguno de los diapasones tomados aisladamente.

Según los armónicos que superpongamos al sonido fundamental, tendremos un timbre diferente.

Por numerosas experiencias se ha procurado demostrar que el carácter del timbre es debido a esta superposición de armónicos al sonido fundamental.

Estas experiencias han sido orientadas por dos vías diferentes: se ha operado por análisis o por síntesis.

Por análisis, se ha procurado ver si se podían descomponer los sonidos de los diversos instrumentos, y un gran número de observadores han creído reconocer que en todos los casos estaban formados por un sonido fundamental al que se superponen armónicos. Daremos una idea de estos métodos a propósito de la descripción de los resonadores.

Para proceder por síntesis se ha procurado reproducir un sonido de timbre determinado, haciendo funcionar simultáneamente diversos instrumentos que emitan uno un sonido fundamental, los demás diversos armónicos del sonido fundamental.

Por ejemplo, se toma una serie de diapasones de los que el más grave da el do_1, los otros los armónicos sucesivos. Se pone el do_1 en vibración, después se añaden los sonidos de uno o muchos armónicos convenientemente elegidos y se aprecia que el conjunto toma un timbre diferente, según los armónicos superpuestos, quedando siempre el conjunto del sonido al tono del do_1. Se puede llegar así a determinar cuáles son los armónicos que hay que superponer al sonido fundamental para darle el timbre buscado.

III. — Producción de los sonidos

Salvo algunas excepciones, casi todos los instrumentos de música están basados en dos dispositivos diferentes: existen instrumentos de cuerda e instrumentos de viento.

Cuando una cuerda está tensa por sus dos extremidades, si se la separa de su posición de equilibrio y se la abandona en seguida a sí misma, se pone a vibrar y se oye un sonido cuyas cualidades dependen de las condiciones de la experiencia.

El sonido será más o menos intenso según que la cuerda oscile más o menos a una y otra parte de su posición de equilibrio, es decir, que las oscilaciones sean más o menos amplias. El sonido tendrá uno u otro tono según el número de oscilaciones de la cuerda por segundo. Este número de oscilaciones dependerá de diversas condiciones. Para una misma cuerda está en razón inversa de la longitud de la cuerda y es proporcional a la raíz cuadrada del peso tensor. Es decir que, en igualdad de las demás circunstancias, doblando la longitud de la cuerda, el número de vibraciones queda reducido a la mitad, el sonido desciende una octava. Para hacer subir el sonido una octava, hay que cuadruplicar la tensión ejercida sobre la cuerda. Estas dos reglas bastan para explicar cómo los violinistas reglan la nota dada por una de las cuerdas de su instrumento, primero tendiéndola gradualmente por medio de clavijas, después haciéndola variar acortando más o menos la cuerda por la posición dada al dedo apoyado sobre ella.

Si se ataca una cuerda tensa entre A y A' (fig. 573), por su mitad, vibra tomando posiciones intermedias entre dos formas extremas, ABA', $AB'A'$. Da entonces un sonido llamado simple fundamental. Pero se concibe que esta misma cuerda puede, en lugar de dar una nota fundamental, dar su primer armónico. Basta para ello atacar la cuerda en la cuarta parte de su longitud en C, tocando ligeramente con el dedo el medio B

(fig. 574). Este medio queda entonces inmóvil, formando lo que se denomina un nodo de vibración. La cuerda toma alternativamente formas *ACBDA'*, *AC'BD'A'*, con formas intermedias, dando lugar a vientres en *C* y *D*. En estas condiciones, el sonido emitido está en la octava aguda del sonido dado por la cuerda que vibra en las condiciones del caso que pre-

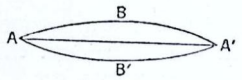


Fig. 573

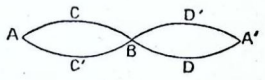


Fig. 574

cede, como tendrá lugar para una cuerda de una longitud la mitad que *AA'*. De la misma manera, se puede obtener una división en tres con nodos en *B, C,* y vientres en *D, E, F* (fig. 575).

Por lo tanto, ocurre que, según la manera como una cuerda es herida por el arco, o por un pellizco de los dedos, se superpone a la vibración de la forma fundamental una o muchas

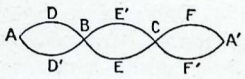


Fig. 575

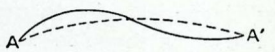


Fig. 576

vibraciones armónicas. Ateniéndonos al primero de estos armónicos, la cuerda toma entonces en sus movimientos formas disimétricas, como las representadas en la figura 576. Así da el sonido fundamental al mismo tiempo que su primer armónico. Una de las habilidades de la persona que hace vibrar la cuerda, es precisamente la de hacerle dar un número mayor o menor de armónicos; esto es lo que hace que una misma nota, dada por una misma cuerda, es más o menos bella o, como se dice, cálida, según la persona que maneja el arco.

En lugar de hacer vibrar transversalmente una cuerda, separándola de la posición de equilibrio y abandonándola después a ella misma, se la puede hacer vibrar longitudinalmente frotándola con un lienzo espolvoreado con resina. Entonces se oye un sonido muy agudo con relación a los que acabamos de estudiar.

Si una cuerda metálica adquiere, con relación a la longitud, una dimensión transversal bastante importante para estar rígida, no es necesario mantenerla por sus dos extremidades. Se le sujeta entonces solamente por un extremo o por su parte media. Se tiene entonces lo que se denomina una vara vibrante, que puede vibrar transversal o longitudinalmente, según la manera como es atacada. En el segundo caso da un sonido mucho más agudo que en el primero. No hay porqué insistir sobre las leyes que relacionan el número de vibraciones con las dimensiones de las varas vibrantes, porque no tienen ninguna aplicación biológica.

La base de los instrumentos de viento es el tubo sonoro, es decir, un tubo hueco que contiene aire que se hace entrar en vibración según procedimientos diferentes sobre los que más adelante insistiremos.

El aparato destinado a poner en vibración el aire del tubo está colocado en una de sus extremidades; esta extremidad está abierta, como hemos dicho, es decir, en comunicación con la atmósfera. El otro extremo está, según los casos, abierto o cerrado.

Un tubo cerrado da la misma nota que un tubo abierto de doble longitud. Así, un tubo cerrado de un metro de longitud y un tubo abierto de dos metros están al unísono.

El sonido más grave que puede dar un tubo tiene, como para las cuerdas, un número de vibraciones en razón inversa de su longitud. Para hacer subir una octava el sonido emitido por un tubo, hay que acortarlo la mitad.

Además del sonido más grave que da un tubo, puede también dar algunos armónicos. Los tubos abiertos pueden emitir todos los armónicos del sonido fundamental, los tubos cerrados no pueden dar más que armónicos de rango par.

Un tubo abierto podrá, pues, emitir los sonidos cuyo número de vibraciones varía en la proporción siguiente: 1, 2, 3, 4, etc., mientras que un tubo cerrado no puede dar más que los que varían, como: 1, 3, 5, 7, etc. Como en un tubo puesto convenientemente en vibración los armónicos pueden superponerse al sonido fundamental, siendo los tubos abiertos más ricos en armónicos que los tubos cerrados, los sonidos de los primeros son más cálidos que los de los segundos.

Con frecuencia, en lugar de hacer sonar un solo tubo, se le asocia una serie de tubos que dan, como sonido fundamental, los armónicos del primero. Se consigue entonces producir un efecto considerable. Es el artificio a que se recurre en los órganos.

Hay que hacer notar que en los tubos sonoros es el aire el que vibra, y que la pared por sí misma no tiene influencia. Para una misma forma se podrá hacer esta pared de cualquier materia; se obtendrán siempre los mismos resultados, ya sea de metal, madera o cualquier otro cuerpo, supuesto que sea bastante resistente para no deformarse bajo la influencia de las variaciones de presión que se produzcan en el tubo. No obstante, no ocurre lo mismo cuando la pared es blanda, entonces las cosas cambian con el estado de esta pared. Se ha reconocido por diversos artificios que, en algunos puntos de la masa de aire en vibración en el tubo, se producían sencillamente movimientos, sin variación de presión apreciable; en otros puntos, por el contrario, no hay desplazamientos, sino compresiones y descompresiones. Las primeras regiones corresponden a lo que se llaman vientres, las segundas a los nodos.

Se reconocerá que en una región está el aire en movimiento colocando en él un platillo ligero suspendido por tres hilos y sobre el cual se habrá depositado un poco de arena (fig. 577). En los nodos no habrá ningún desplazamiento de arena, puesto que no se produce en ellos ningún movimiento del aire; en los vientres se la verá saltar sobre el platillo, acompañando las vibraciones del aire.

Para reconocer que en los nodos se producen variaciones de presión, y que no las hay en los vientres, se recurre a un artificio ingenioso, debido a König. Una cajita está dividida en dos mediante un tabique muy fino de tripa, *mn* (fig. 578). Por un lado se hace llegar gas del alumbrado, que sale por un pequeño mechero *b*, que se enciende. El otro departamento de la caja está puesto en comunicación, mediante un tubo *a*, con el aire que se desea explorar. Si en *a* no se produce variación de presión, la pequeña llama *b* queda de altura constante, pero aumenta y disminuye, vibrando sincrónicamente con las variaciones de presión que se producen en *a*. En efecto,

cuando la presión aumenta, la membrana *mn* es rechazada y empuja un exceso de gas por *b*; cuando disminuye la presión se produce, por el contrario, una aspiración del gas hacia *mn* y pasa menos por *b*. Como los movimientos de la pequeña llama son muy rápidos y no se les puede seguir con la vista, se observa la imagen de la llama en un espejo giratorio alrededor de un eje vertical. Si la llama permanece a una altura

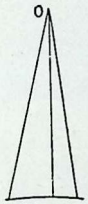


Fig. 577

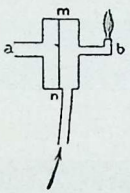


Fig. 578

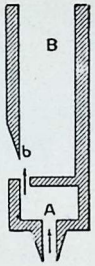


Fig. 579

constante, por efecto de la persistencia de las impresiones luminosas sobre la retina, se ve una banda iluminada de altura uniforme correspondiente a las diversas posiciones de la llama. Pero si la llama vibra, aumentando y disminuyendo de altura, la banda es ondulada. Estas ondulaciones son tanto más frecuentes cuanto más elevado es el sonido; colocando muchas llamitas, unas encima de otras, se pueden comparar fácilmente diversos sonidos producidos en los orificios *a* de las cajitas. Este aparato, muy precioso para diversos estudios, es conocido generalmente con el nombre de cápsula manométrica o llama manométrica de König.

Fáltanos ver cómo se pone en vibración la masa de aire contenida en los tubos; se recurre ya al pico de flauta, ya a la lengüeta.

En el pico de flauta, el aire llega por un orificio *a* a una caja *A* colocada en un extremo del tubo (fig. 579). Se escapa de esta cámara por una hendidura situada frente a un bisel contra el que se rompe el chorro de aire, lo que basta para hacerle entrar en vibración, siendo el mecanismo del fenómeno mal co-

nocido. La longitud del tubo *B*, que puede estar abierto o cerrado, regulará la posición de los vientres y de los nodos y el tono del sonido que se producirá. No obstante, no deja de tener influencia la fuerza del chorro de aire. Con un soplo suave que venga por *a*, el tubo otorga generalmente su sonido fundamental, el más bajo que puede dar; si se fuerza el viento, de pronto se oye subir el sonido, se produce un armónico de rango tanto más elevado cuanto más fuerte se sopla. Esto es algunas veces hasta una dificultad; cuando se quiere dar un sonido grave, pero muy amplio, con un tubo abierto, siempre se corre el

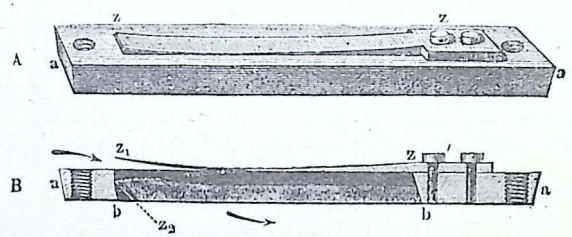


Fig. 580

riesgo, aumentado el aflujo de aire, de hacer pasar el sonido a la octava; este accidente se produce con mucha facilidad. Es menos frecuente hacer pasar un tubo cerrado a un armónico, pues ya hemos visto que el primero de estos armónicos, no puede ser dado por semejante tubo.

Las lengüetas son de diferentes modelos; su fundamento consiste en abrir y cerrar alternativamente un orificio de llegada de aire. Son de un manejo más delicado que el pico de flauta, que no tiene necesidad de ser regulado, mientras que la lengüeta tiene que abrirse y cerrarse periódicamente, según una ley sincrónica con las oscilaciones del aire en el tubo; deben, por lo tanto, estar acordadas.

He aquí, por ejemplo, un modelo de lengüeta. El aire llega a una cámara separada del tubo propiamente dicho como para el pico de flauta. En la pared de separación se encuentra una ventanilla rectangular alargada en donde puede moverse una lámina de resorte *zz* (fig. 580). Cuando la presión aumenta en la cámara, el resorte se deprime y deja pasar el

aire, después reacciona y cierra el paso, y así sucesivamente. Si el resorte tiene un número de vibraciones conveniente, abre y obtura el orificio de modo que las pulsaciones del aire sean sincrónicas con el sonido que debe dar el tubo, dicho de otro modo: el tubo y la lengüeta deben estar al unísono.

La forma de las lengüetas varía según los instrumentos; en cierto número de ellas son los labios los que desempeñan este papel: así ocurre en la trompa y en la trompeta, etc.

Los labios forman entonces lo que se denomina una lengüeta membranosa. Se obtiene una lengüeta membranosa artificial poniendo tensas en un orificio dos láminas elásticas que dejen entre sí una hendidura que está cerrada cuando las láminas están en reposo y se abre periódicamente cuando vibran.

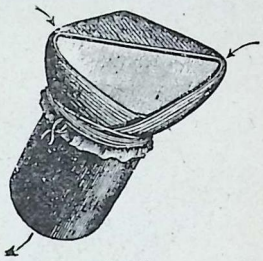


Fig. 581

Cuando las dos láminas elásticas no están en un mismo plano, forman lo que se denomina una lengüeta hacia dentro o hacia fuera según el sentido de la corriente del aire. Tomemos un tubo en cuya extremidad se practican secciones inclinadas al eje. Apliquemos sobre cada una de estas secciones una lámina de caucho, como indica la figura 581, de modo que entre ellas limiten una hendidura. Cuando la corriente de aire vaya a través de la hendidura del interior al exterior del tubo, la lengüeta se abrirá en el sentido de la corriente; se dice entonces que se tiene una lengüeta hacia fuera. Puede, por el contrario ocurrir, como en el caso de las flechas de la figura, que durante la vibración de la lengüeta, tiende a cerrarse bajo la influencia de la corriente del aire; se tiene una lengüeta hacia dentro. Cuando las láminas están en el mismo plano, las lengüetas se llaman libres.

En igualdad de circunstancias, las lengüetas hacia dentro dan un sonido más grave que las lengüetas libres y las lengüetas hacia fuera un sonido más agudo.

IV. — Resonadores

El resonador es un aparato de análisis de los sonidos sumamente precioso; ha sido introducido en la ciencia por Helmholtz.

De ordinario, tiene la forma de una esfera hueca con dos aberturas, una un poco mayor que otra; ambas a dos están dotadas de una pequeña prolongación tubular, como indica la figura 582. La propiedad esencial del resonador es que la masa de aire en él contenida da, vibrando, un sonido fundamental que se nota que se produce con fuerza siempre que se aproxima al orificio *a* un instrumento que dé a su vez este sonido fundamental. Este es particularmente claro si se introduce el extremo *b* en el oído. Así, si se produce delante del orificio *a* una serie de sonidos, aparecerán más apagados por la vecindad del resonador, mientras no estén al unísono con el sonido fundamental de este resonador, pero en cuanto este sonido es emitido, se le oye considerablemente reforzado por el resonador. Cuando se quiere, pues, buscar si un sonido complejo contiene el do_4, por ejemplo, se producirá este sonido en el orificio del resonador que tenga por sonido fundamental el do_4. Si no está el do_4 en el sonido estudiado, el resonador quedará silencioso, de lo contrario, entrará en vibración.

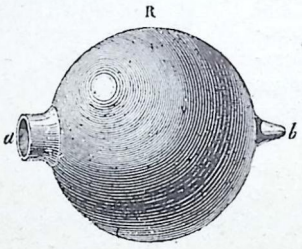


Fig. 582

En lugar de introducir el extremo *b* en el oído y referirse así a una impresión para sorprender si el resonador funciona o no, lo que puede ser delicado en los sonidos débiles, se puede poner *b* en comunicación con una cápsula manométrica y ver si la llama vibra o no, observándola en un espejo giratorio.

La figura 583 representa una serie de resonadores de las que el primero da el do_2 y los siguientes sus primeros armónicos. Cuando se quiere investigar si un sonido contiene una de estas notas, se pone el espejo en rotación, se produce el sonido delante del instrumento y se mira qué llamas son las que vibran. Se deducirá inmediatamente que las notas correspondientes entran en la constitución del sonido complejo estudiado.

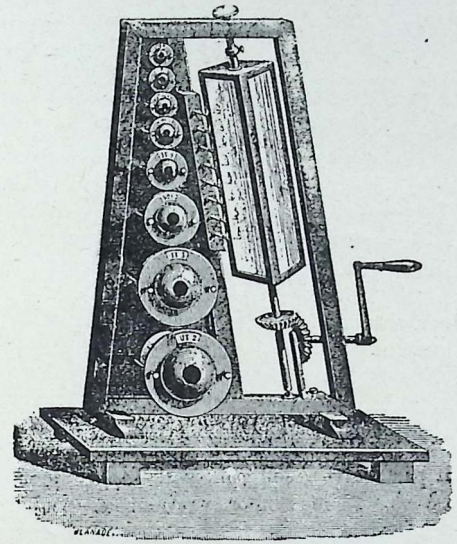


Fig. 583

Concíbese fácilmente que el empleo de los resonadores proporcione uno de los más preciosos procedimientos de análisis.

V. — Fonación y audición

No existe actualmente, en toda la Física biológica, cuestión peor conocida que la de la producción de la voz y la de la audición.

Tomemos el punto que parece más sencillo, el más accesible a la experiecnia, el que numerosos y de los mejores obser-

vadores han tomado como sujeto de estudio, y que podemos formular de la siguiente manera:

¿Por qué las diversas vocales se distinguen unas de otras? Una persona canta sucesivamente, a la misma nota, para simplificar las cuestiones, una A, una O y una I, ¿en qué se diferencian unos de otros los sonidos característicos de estas tres vocales?

Este problema ha sido abordado por los métodos más variados, ya por el análisis, ya por la síntesis, y actualmente nos encontramos ante dos teorías principales, quizá las dos falsas.

Algunos autores creen que las diversas vocales se caracterizan por la superposición al sonido fundamental de uno o de muchos armónicos determinados; las vocales serían, pues, sonidos de timbre diferente. Así, la A, la O, la I, etc., cantadas sucesivamente en el la_3, se compondría de la nota la_3, más ciertos armónicos del la_3, determinados para cada una de las vocales.. Por ejemplo, para la A, sería siempre el n^0 armónico, para la O, el p^0 armónico, el que superpondría al sonido fundamental.

Para otros autores, la cosa sería completamente diferente, cada vocal tendría un *vocablo,* es decir, una nota fija que la caracterizaría. Así, cualquiera que sea la nota a que se cante la A, el sonido se compondría de esta nota, a la que se superpondría la nota $si_4{}^b$; para la O ésta sería el $si_3{}^b$ para la I el $si_6{}^b$. Los vocablos varían según los experimentadores; se concibe, por otra parte, que deben cambiar según el sujeto que habla. Todos los cantores hombres pueden dar fácilmente el sol_2; ahora bien; un bajo, cantando diversas vocales al sol_2, no produce la misma impresión que un tenor que repitiera este ejercicio; no se puede, pues, decir que en los dos casos el sonido se componía, para A, de la superposición sol_2 — $si_4{}^b$, para O del sol_2 — si^b, etc. Existe evidentemente un elemento que no se tiene en cuenta.

Algunos experimentadores hacen una concesión, y creen que el vocablo es ligeramente variable, y que si un mismo cantor da la vocal A en la extensión de su registro, el vocablo cambiará poco. Para la A en cuestión, según L. Hermann, la vocal está comprendida entre mi_4 y $sol_4{}^{\#}$ no estamos en el $si_4{}^b$ fijo, que se encuentra hasta fuera de estos límites.

Actualmente, pues, y esta es la parte más clara de la cuestión, no sabemos cuál es la constitución de los sonidos emitidos con la palabra, aún en los casos más elementales.

Pero la cuestión de la palabra se plantea también de otra manera. ¿En dónde y cómo se produce el sonido? ¿Cómo se modifica el sonido?

Durante mucho tiempo, se ha admitido como casi evidente que el sonido era producido por las cuerdas vocales inferiores, vibrando casi como láminas de caucho y transmitiendo su movimiento vibratorio al aire como lo hace una cuerda sonora. El sonido así emitido se transformaría, por refuerzo o apagamiento, de diversos armónicos, según la forma dada a la boca, la que funcionaría simplemente como un resonador.

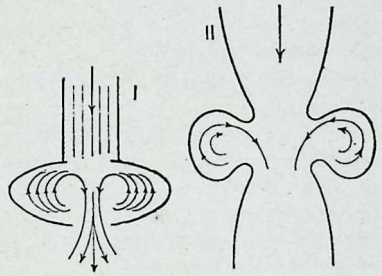


Fig. 584

Ahora bien; actualmente, esta idea es considerada como completamente falsa por un gran número de sabios.

Parecería más probable creer que la producción de los sonidos está ligada directamente a la existencia de remolinos y torbellinos de aire, descritos con el nombre de ciclones de Lootens.

Lootens ha demostrado la existencia de estos ciclones en los diversos tubos sonoros, y entre los diversos hechos citados por él, hay uno sobre todo que debe llamarnos la atención; es la facilidad con que se producen los sonidos con acompañamiento de ciclones en el reclamo de los cazadores.

La figura 584, I representa uno de estos reclamos en el que se ha representado la dirección de la corriente de aire que lo atraviesa con formación de ciclones. Este efecto se produce por presiones de aire extremadamente débiles. Si se mira ahora un corte de los ventrículos de Morgagni (figura 584, II), resulta evidente que todos están dispuestos para producir, bajo la influencia de una corriente de aire lanzada

por la tráquea, ciclones análogos a los del reclamo y, por consiguiente, para emitir un sonido.

Esta manera de comprender la producción de los sonidos en la voz hablada o cantada no está más que en el estado de esbozo, parece, no obstante, que esta nueva orientación debe ser más fecunda en resultados que la seguida hasta la fecha, que no ha conducido a ningún resultado satisfactorio.

Por lo que a la audición se refiere, el estado de nuestros conocimientos es todavía peor que para la fonación. Tomemos el sonido más sencillo, el que emite un diapasón, en cuanto llega a nuestro oído dejamos de saber lo que ha sido de él. Sin duda se transmite al oído interno por intermedio del tímpano y de la cadena de huesecillos, pero cuál es exactamente el papel de cada uno de estos órganos, he aquí lo que no podemos precisar. Estamos en la ignorancia más completa, en cuanto a las causas que nos permiten apreciar la diferencia de tono de dos notas. ¿Existen órganos diferentes para la percepción de sonidos más o menos elevados, o los mismos órganos son impresionados de diferente manera? ¡Cuántas preguntas sin respuesta!

La acústica es, pues, la que actualmente nos ofrece todavía el campo de investigaciones peor explorado de la fisiología de los órganos de los sentidos, porque se puede decir que el estudio de la fonación y de la audición debe comenzarse otra vez, partiendo de los elementos de la cuestión.

ÍNDICE DE MATERIAS

Págs.

GENERALIDADES

I. — **Medidas** 1
Importancia de las medidas 1
Elección de unidades y su empleo 3
II. — **Errores** 7
Errores absolutos y errores relativos 7
Método de los medios. — Errores accidentales y errores sistemáticos 12
El error sistemático es el más grave que se puede cometer en las experiencias. 13
III. — **Representación de los resultados** 15
Los cuadros numéricos y las curvas 15

PRIMERA PARTE

MECÁNICA

I. — **Principios generales de mecánica** 19
El reposo y el movimiento 19
Cinemática 20
Movimiento uniforme 20
— variado 20
— uniformemente variado. 22
Composición de los movimientos 23
Aceleración 24
Composición de las aceleraciones. 25
La fuerza 25

Págs.

Principio de la inercia 25
Unidades de fuerza y de masa 27
Principios de la acción y de la reacción . . . 29
Acción simultánea de muchas fuerzas 29
Centro de gravedad 32
Estática 32
Dinámica 34
Trabajo mecánico 35
Evolución del trabajo 36
Transformación del trabajo en fuerza viva 37
Transformación de fuerza viva en trabajo 39
Choques 42
Roces 45
Máquinas 48
Generalidades 48
Polea 48
Palanca 53
Cuña 55

II. — **Densidades** 56
Densidad de los sólidos y líquidos 56
Advertencia sobre las densidades 58

III. — **Elasticidad** 59
Generalidades 59
Importancia de la elasticidad de los cuerpos en las acciones mecánicas 63

IV. — **Resistencia de los sólidos a la ruptura** 68

V. — **Huesos** 71

VI. — **Arquitectura de los músculos** 78

VII. — **Articulaciones** 87
Generalidades 87
Acción de los músculos 89

VIII. — **Principios generales del método gráfico** 91
Generalidades 91
Amplificación y disminución de los desplazamientos. 99
Cronografía 100
Señales eléctricas 103
Tambores de Marey 105
Comprobación y corrección de los tambores de Marey 107

IX. — **Miografía** 108

X. — **Estación y locomoción del hombre** 124

Págs.

Generalidades 124
Estación 126
Marcha 128

XI. — **Principios generales de hidrostática e hidrodinámica** . . 134
Hidrostática 134
Flúidos 134
Presión 134
Principio de Arquímedes 135
Hidrodinámica 137
Generalidades 137
Canalización ramificada 141
Régimen no permanente 141
Trabajo necesario para producir un derrame determinado 142

XII. — **Circulación** 143
Revolución cardíaca 143
Estudio de la presión en el corazón 145
Generalidades 145
Método de Bloch 154
— de Basch-Potain 155
— de Riva-Rocci 158
— de Gaertner 161
— de Marey 163
Velocidad de la sangre 165
Trabajo del corazón 170
Trazados tomados del corazón 171
Esfigmografía 176
Pletismografía 181

SEGUNDA PARTE

ACCIONES MOLECULARES

I. — **Gases** 185

II. — **Densidad de los gases** 186

III. — **Medición de los gases** 187

IV. — **Fenómenos mecánicos de la respiración** 195

V. — **Disolución de los gases** 200

VI. — **Oclusión de los gases** 201

VII. — **Difusión de los gases** 202

Págs.

VIII. — **Disociación** 203
IX. — **Equilibrios químicos en las soluciones** 206
X. — **Influencia de la presión sobre los animales** 208
XI. — **Tensión superficial y capilaridad** 212
Experiencia de Pasteur 212
— *de Dupré* 212
Ley de Jurin 215
XII. — **Viscosidad** 219
XIII. — **Disolución de los sólidos y de los líquidos** 222
XIV. — **Ionización de las soluciones** 223
XV. — **Imbibición** 224
XVI. — **Difusión** 225
XVII. — **Estado coloidal** 227
XVIII. — **Osmosis** 229
Generalidades 229
Membranas semipermeables 231
Presión osmótica 232
Isotonía 234
Número de moléculas y concentración molecular . . 235
Investigaciones de la isotonía por el método de De Vries 238
Investigaciones de la isotonía por el método de Hamburger 239
XIX. — **Zonometría** 240
XX. — **Crioscopia** 241
XXI. — **Filtración** 246

TERCERA PARTE

CALOR

I. — **Termometría** 251
Generalidades 251
Temperaturas absolutas 254
II. — **Estufas** 254
Generalidades 254
Termostatos 254
Incubadoras 258
Reguladores de temperatura 258
Reguladores de gas 261
— eléctricos 261
— de Chancel 261
— de Schloesing 262
— de Raulin 262
— de Chauveau 263
— de Roux 264
— eléctrico de Regaud 264
III. — **Fusión y vaporización** 265
IV. — **Higrometría** 267
V. — **Temperatura de los animales** 269
Generalidades 269
Homeotermos 270
Heterotermos 275
Límites extremos de temperatura compatibles con la vida 277
VI. — **Cantidades de calor** 277
VII. — **Propagación del calor** 278
Generalidades 278
Propagación del calor por radiación 281
Resumen de la propagación del calor 283
Conclusiones prácticas 284
VIII. — **Transformación de trabajo mecánico en calor y conservación de la energía** 285
Generalidades 285
Energía potencial y energía cinética 288
Rendimiento de los motores 289
Rendimiento de los motores térmicos 289
Resumen de los dos principios fundamentales . . . 291
Principio de la conservación de la energía . . 291
— de Sadi-Carnot 291
IX. — **Calorimetría** 292
Generalidades 292
Método de Laplace y Lavoisier 293
— *de Dulong* 293
— *de Hirn* 294
— *d'Arsonval* 294
Calorímetro de Atwater 295
X. — **Calor animal** 296
Generalidades 296
Influencia del trabajo muscular sobre la calorificación 302

Págs.

Rendimiento de los motores animados 304
Regulación del calor en los animales 306

CUARTA PARTE

RADIACIONES

I. — **Constitución de las radiaciones** 309
Generalidades 309
Movimiento pendular 313
Superposición de los movimientos vibratorios . . 316
Experiencia de los dos espejos 317
Velocidad de la luz 319
II. — **Espectroscopia** 319
Espectros de emisión 322
— *de absorción* 324
III. — **Fotometría** 327
IV. — **Colorimetría** 332
V. — **Fotografía** 334
Fotografía microscópica 334
Cronofotografía 335
VI. — **Polarización** 339
Rotación del plano de polarización 341
Sacarímetro de Soleil 344
Sacarímetros de penumbra 345
Doble refracción 346
VII. — **Fosforescencia y fluorescencia.** 348
VIII. — **Efectos de luz sobre los seres vivientes** 350

QUINTA PARTE

ÓPTICA

I. — **Principios de óptica geométrica** 359
Nociones generales 359
Sombras 359
Absorción. Difusión. Reflexión y refracción de la luz. Indice de refracción 360
Retorno inverso de los rayos 364

Págs.

Objetos e imágenes 366
Espejo plano 369
Superficie refringente plana 369
Refracción a través de superficies planas paralelas 370
Reflexión y refracción a través de las superficies esféricas 371
Sistemas centrados 372
Focos principales 372
Puntos nodales y ejes secundarios 373
Focos secundarios y planos focales 373
Planos principales directos e inversos 373
Distancia focal 375
Espejos 375
Dioptros. 375
Lentes 376
Sistema centrado cualquiera 379
Propiedad inversa de los planos focales . . . 380
Construir el rayo emergente correspondiente a un rayo incidente dado 380
Determinación de los puntos cardinales . . . 384
Construcción de la imagen de un objeto . . . 384
II. — **Potencias de los sistemas centrados** 394
III. — **Ojo reducido** 397
IV. — **Visión** 401
Emetropía 401
Acomodación 402
Amplitud de acomodación 407
V. — **Ametropías** 409
Miopía 409
Hipermetropía 411
Procedimiento para distinguir el miope y el hipermétrope del emétrope, y corregirlos . . 411
Procedimiento para determinar la posición del punctum proximum y la amplitud de acomodación 413
Astigmatismo 414
VI. — **Agudeza visual** 424
VII. — **Campo visual** 428
VIII. — **Propiedades de la retina** 431
IX. — **Visión binocular** 435

Págs.

Diploscopo de Rémy 442

X. — **Optómetros** 443
XI. — **Oftalmoscopia** 446
Determinación de una ametropía por medio del oftalmoscopio 450
XII. — **Endoscopia** 454
XIII. — **Lupas** 459
Diversos modelos de lupas 462
XIV. — **Microscopios** 466
Oculares 468
Objetivos 469
Preparaciones 469
Medidas hechas sobre las preparaciones 477
Ultramicroscopio 478
Microscopio polarizante 479

SEXTA PARTE

ELECTRICIDAD

I. — **Principios generales de electricidad** 481
II. — **Leyes y unidades eléctricas** 483
Unidad de resistencia 487
— *de diferencia de potencial* 487
— *de intensidad* 487
— *de cantidad* 487
— *de capacidad* 487
— *de potencia* 488
III. — **Producción de electricidad** 489
IV. — **Máquinas estáticas** 489
V. — **Pilas** 492
Pila Daniell 495
— *de Poggendorf* 496
— *Leclanché* 496
— *al cloruro de plata* 497
— *al bisulfito de mercurio* 498

Págs.

VI. — **Acumuladores** 499
VII. — **Agrupación de elementos** 501
Conclusión 503
VIII. — **Empleo de la corriente continua** 506
IX. — **Corriente alterna** 511
X. — **Máquinas dinamoeléctricas** 513
XI. — **Medida de las magnitudes eléctricas** 514
Intensidad 514
Diferencias de potencial. 524
Resistencias 527
Cantidades 533
Capacidades 535
XII. — **Electricidad producida por los animales** 538
Músculos y nervios 540
Glándulas. Ojo. Centros nerviosos 550
Peces eléctricos 551
Plantas eléctricas 553
XIII. — **Acciones químicas de la corriente** 553
XIV. — **Papel de los iones en la electrolisis y la conductibilidad de las soluciones** 557
XV. — **Fenómenos de acarreo** 558
XVI. — **Acción de la corriente continua sobre los tejidos organizados** 559
XVII. — **Termoelectricidad** 563
XVIII. — **Electrotono** 567
XIX. — **Excitación eléctrica de los nervios y de los músculos** . . 571
XX. — **Corrientes de alta frecuencia** 586
Accidentes causados por la electricidad 594

SÉPTIMA PARTE

RAYOS X y RADIUM

I. — **Rayos catódicos** 595
II. — **Rayos X** 597
Aplicaciones de los Rayos X . . . . . .
III. — **Radium** 607

Págs.

OCTAVA PARTE

ACÚSTICA

I. — **Generalidades** 611
II. — **Cualidades del sonido** 614
III. — **Producción de los sonidos** 619
IV. — **Resonadores** 626
V. — **Fonación y audición** 627