

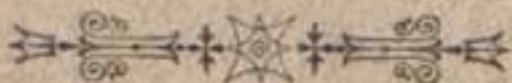
e.

ACÚSTICA ELEMENTAL

POR

J. CABELLO Y ROIG

Ingeniero industrial
y Catedrático de Física en el Instituto de Cabra



MADRID

LIBRERÍA DE LA VIUDA DE HERNANDO Y C.^a
calle del Arenal, núm. 11

1892

LE-3725

ACÚSTICA ELEMENTAL.

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

PHYSICS DEPARTMENT

ACÚSTICA ELEMENTAL

POR

J. CABELLO Y ROIG

Ingeniero industrial
y Catedrático de Física en el Instituto de Cabra



MADRID

LIBRERÍA DE LA VIUDA DE HERNANDO Y C.^a
calle del Arenal, núm. 11

—
1892

—
ES PROPIEDAD
—

PRÓLOGO.

Escribir un libro es siempre tarea difícil de llenar cumplidamente; pero las dificultades suben de punto si el libro ha de responder á las exigencias de la enseñanza en cualquiera de sus grados, y aunque parezca paradójico, es aun más difícil acomodarlo á las propias de la enseñanza elemental. La razón, sin embargo, es óbvia; sintetizar en breves páginas aquellos conocimientos pertinentes al fin que se persigue entresacándolos del abundante arsenal de las ciencias, ordenarlos de modo que constituyan un verdadero cuerpo de doctrina en el que no falte lo esencial ni huelgue lo impertinente, relacionarlo para que la unidad no sea un mito y exponerlo en forma tal que resulte perfectamente acomodado al nivel intelectual de los que han de utilizarlo y al caudal de conocimientos anteriormente adquiridos por los mismos, para que la enseñanza no peque de deficiente si el autor no ha sabido utilizar aquéllos, ó resulte estéril el esfuerzo del alumno por elevarse á esferas más altas de lo que permiten sus fuerzas, cosa es que exige gran meditación después del acabado conocimiento de la materia que debe suponerse en el que acomete la empresa.

Y si tales dificultades han de hallarse en toda ocasión, éstas acrecen cuando el objeto del libro es una tan vasta ciencia como la Física, en la que, á pesar de la diversidad aparente de su objeto, ha de ponerse formal empeño en que resulte tangible la unidad de causas, base esencialísima de la actual organización de sus conocimientos. Por eso es frecuente hallar libros en los que sus autores demuestran gran empeño en responder á este último fin, pero en los que no se traduce tal intento en hechos prácticos, pues no basta consignarlo á cada paso y en una y otra página; es necesario además que la estruc-

tura del libro sea el principal elemento de acción, y sin esto, no quedará más que enunciado el deseo del que lo escribió, de todo punto insuficiente para llevar al ánimo del lector la certeza del principio en que pretendió inspirarse.

Una de las partes de la Física en la que los autores de nuestros libros de texto han puesto menos esmero, es, sin disputa, la Acústica, sin embargo de tratarse de una serie de fenómenos interesantísimos de por sí y mucho más aun por la enseñanza que de su estudio se desprende, inmediatamente aplicable á la más cabal inteligencia de las modernas teorías del calor y de la luz, en las que se consideran estos agentes como un movimiento vibratorio perfectamente comparable con las vibraciones sonoras. Es cierto que en algunos de los libros últimamente publicados se ha tratado de subsanar la falta introduciendo un estudio completamente nuevo en nuestros programas, el del movimiento vibratorio, del que se ocupan á continuación del estudio de la comunicación del movimiento y el choque de los cuerpos elásticos; pero dejando á un lado la dificultad de tratar este asunto con los escasos conocimientos de matemáticas que nuestros alumnos poseen, enseña la experiencia que tan abstrusa exposición de fenómenos, cuya utilidad no se les alcanza, no logra fijar debidamente su atención, y que el conocimiento resulta ilusorio al llegar el momento de aplicarlo; sin contar con que la índole de la enseñanza exige que no se fíe en que el alumno sabrá hacer la aplicación por su propia iniciativa, y que si hay que repetirse, es preferible prescindir del conocimiento preliminar y exponerlo completo en el lugar mismo de su aplicación inmediata. Tiene esto último, además, la ventaja de hacer menos árido su estudio, y la de no exigir sino la exposición de aquello que en tal materia haya de resultar absolutamente necesario.

La importancia del perfecto conocimiento de la Acústica, resulta evidente desde el momento en que se considera que ésta nos presenta la ocasión de sentar principios y deducir consecuencias, aplicables á todo movimiento vibratorio, partiendo del movimiento sonoro que se ve y se toca, que entra por los sentidos como tal movimiento, comprobándose por su testimonio la vibración del cuerpo sonoro y los accidentes de su propagación, con un sinnúmero de detalles que sería inútil perseguir en otros movimientos de su misma especie que, como el calor y la luz, escapan á tan minuciosa investigación de la vista y el tacto, incapaces de apreciar en ellos otra cosa que la sensación específica correspondiente, quedando en la sombra el movimiento del foco y el del medio transmisor, que ase-

guramos, sin embargo, por la concordancia entre los hechos de experiencia y la teoría que los supone el efecto de una vibración y sus ondas llevada hasta sus más remotos límites. Quien haya llegado á formar juicio exacto de las diversas manifestaciones del movimiento sonoro, fácilmente acomodará el conocimiento adquirido al estudio de las vibraciones etéreas; sin aquella base, la imaginación se halla falta de los elementos necesarios para la representación completa del fenómeno, y no llega á ver sino quiméricas hipótesis en las teorías admitidas.

Las precedentes consideraciones nos han inducido á publicar esta monografía, iniciando al propio tiempo un camino que seguramente puede resultar provechoso. Basta para convencerse de esto último, tener en cuenta que la publicación de un tratadito especial es empresa más asequible á los escasos medios con que solemos contar los que nos dedicamos al magisterio, que la de una obra completa, y que si éste se juzga útil para la enseñanza, su adopción no implica la necesidad de sustituir un libro por otro, lo que puede ofrecer verdaderas dificultades, pues si en alguna de sus partes resulta uno de ellos deficiente, comparado con otro de la misma clase, puede el primero ser preferible al segundo bajo otros conceptos; y que, después de todo, no habría inconveniente alguno en estudiar la asignatura sirviéndose de tratados especiales de cada una de sus partes, y aun podría suceder que se hallara en esto indudables ventajas, por adaptarse cada uno de ellos al programa del profesor mucho mejor que pudiera hacerlo un tratado completo.

Cuatro palabras sobre el plan de nuestro libro. Hemos dividido éste en tres partes atendiendo á la mejor distribución de su contenido: en la primera, se hace el estudio de la naturaleza, cualidades y propagación del sonido, sin preocuparse del cuerpo sonoro; en la segunda, la del sonido, tomando en cuenta las modificaciones del cuerpo que lo produce, de donde se deriva el conocimiento de la naturaleza compleja de la casi totalidad de los sonidos, así como el del análisis y la síntesis de los mismos; y la tercera se destina á estudiar la composición de los movimientos vibratorios con la extensión indispensable para el conocimiento del importante fenómeno de las interferencias y las novísimas teorías de las consonancias y disonancias. Del contenido y método de exposición de cada una de ellas, poco hemos de decir; sólo queremos dejar consignado que nuestro objeto no ha sido el de hacer un tratado completísimo, sino un libro metódico y sencillo, en el que, dentro de los límites de la enseñanza elemental, se halle todo lo necesario á los fines de que queda hecho

mérito anteriormente, haciendo caso omiso de cuanto hemos considerado superfluo.

Si hemos acertado á hacer algo útil, nos quedará la satisfacción que produce el cumplimiento de un deseo noble y desinteresado; si no hemos sido tan afortunados, nos consolará la esperanza de que alguien lo intente con mejores armas y se consiga al fin lo que nos propusimos, si no por el propio, por el ajeno esfuerzo.

Cabra, 20 de Agosto de 1891.

J. CABELLO.

ACÚSTICA ELEMENTAL.

PRIMERA PARTE.

NATURALEZA, CUALIDADES Y PROPAGACIÓN DEL SONIDO.

CAPÍTULO I.

Naturaleza del sonido.

Sonido. Acústica.—La sensación que llamamos de sonido corresponde á la impresión que sobre el nervio acústico ó del oído produce un movimiento especial de los cuerpos, que se denomina *movimiento vibratorio*, transmitido desde el cuerpo sonoro al órgano de la audición, por un cuerpo ó *medio* elástico.

La ciencia que se ocupa del estudio del sonido se llama *Acústica*, y es una de las ramas de la Física.

Movimiento vibratorio.—Las últimas porciones de los cuerpos, átomos ó meléculas, guardan una posición de equilibrio determinada por sus acciones mutuas, y si un choque, un rozamiento ú otra causa cualquiera viene á turbarlo, produciendo una desviación de aquéllas y con ésta una deformación del cuerpo que no traspase los límites de su elasticidad, tenderá éste á recobrar su forma ó volumen primitivos, pero no conseguirá quedar en su posición de equilibrio sino después de haber ejecutado un cierto número de oscilaciones á uno y otro lado de dicha posición, en un todo comparables á las oscilaciones de un péndulo, sin más diferencia que la de ser la atracción mo-

lecular la que las determina en el caso del cuerpo elástico, y la gravedad la causa de las oscilaciones pendulares. El

isocronismo, como todas las demás leyes del movimiento oscilatorio, son en un todo aplicables á éste que se ha convenido en llamar *movimiento vibratorio*.

Vibración.—Al paso de una molécula de una de sus posiciones extremas á la opuesta, se llama *vibración sencilla*; y *vibración doble*, al paso de aquella desde una posición extrema á la opuesta y su vuelta á la primera.

Simultaneidad del sonido y del movimiento vibratorio.—Numerosos experimentos prueban de una manera incuestionable la simultaneidad



Fig. 1.ª

del sonido y del movimiento periódico ó vibratorio en los cuerpos sonoros, y entre ellos citaremos los siguientes:



Fig. 2.ª

Una varilla sujeta por uno de sus extremos (fig. 1.ª), que se desvía por el otro de su posición de equilibrio, ejecuta verdaderas oscilaciones perceptibles á la simple vista; y si

sus dimensiones son las convenientes, serán éstas bastante rápidas para producir un sonido musical. Una cuerda de una guitarra ó de un piano que se hacen entrar en vibración, describen una trayectoria en forma de huso (figura 2.^a), que se va estrechando hasta quedar en reposo y cesan entonces de producir sonido. Una placa metálica sujeta por su centro (figura 3.^a), que se frota con un arco de violín en uno de sus bordes, produce un sonido, y si sobre su superficie se echa una capa de arena fina, demuestra por sus saltos el movimiento vibratorio de que se halla animada la placa, acabando por agruparse sus granos, formando una serie de líneas que se llaman *nodales* y que corresponden á los puntos que permanecen inmóviles; dándonos al mismo tiempo datos importantes relativos á la manera de vibrar estos cuerpos, de que oportunamente nos ocuparemos. Por último, una

Fig. 3.^aFig. 4.^a

pequeña esfera de madera colocada dentro de un timbre (fig. 4.^a) que se excita en su borde por medio de un arco, demuestra por sus fuertes saltos que el sonido que se produce va acompañado de un movimiento vibratorio de dicho timbre.

Necesidad de un medio elástico para la propagación del sonido.—Desde el momento en que se observa que los cuerpos sonoros no necesitan estar en contacto con el oído para producir por su movimiento la sensación de sonido, á la manera que un cuerpo caliente no necesita tocar á la piel para hacernos sentir la sensación de calor, y del

modo mismo que percibimos los cuerpos que emiten luz por su acción á distancia sobre el nervio óptico, se concibe la necesidad de alguna cosa intermedia, que se llama *medio*, encargado de transmitir estos movimientos desde el cuerpo sonoro, caliente ó luminoso, hasta el órgano apropiado para recibir sus respectivas impresiones.

Esta transmisión se verifica en el sonido por una materia elástica ponderable, sólida, líquida ó gaseosa, como se

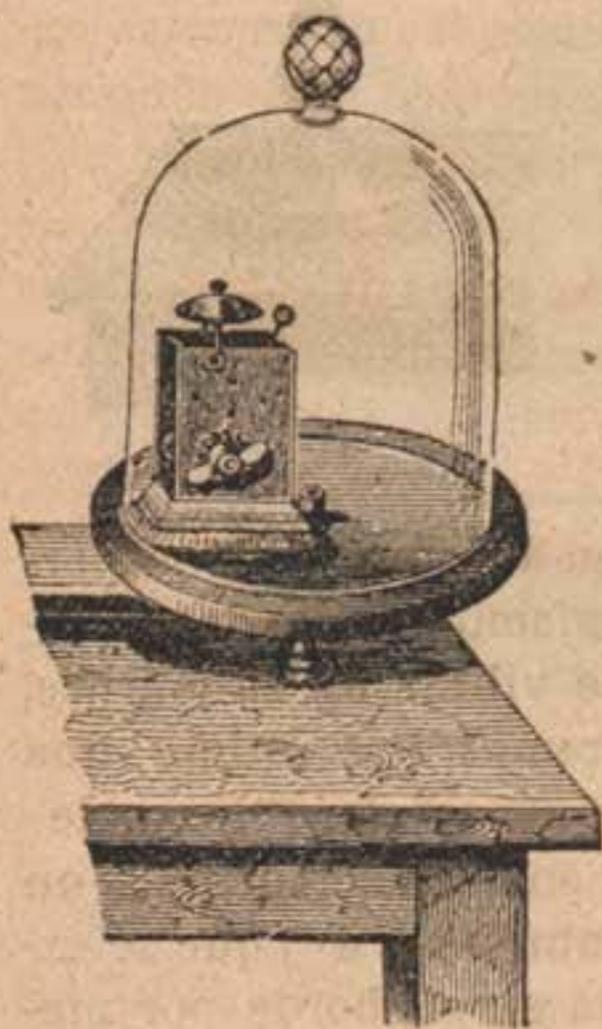


Fig. 5.ª

comprueba del siguiente modo: Debajo de la campana de una máquina neumática, y sobre algodón en rama ó suspendido por dos cordones de seda, se coloca un aparato de relojería que mueve un mazo que golpea un timbre (fig. 5.ª). Hecho el vacío debajo de la campana, deja de oírse el timbre, sin embargo de que el aparato sigue funcionando. Si se deja entrar de nuevo el aire ú otro gas cualquiera, vuelve á percibirse el sonido, y lo mismo sucedería con un vapor ó un líquido que llenara la campana. Si en vez de suspender el aparato ó colocarlo sobre algodón cardado, se deja directamente sobre

la platina de la máquina, no dejará de oírse el timbre, porque la platina y la campana que sobre ella descansa transmiten el movimiento que reciben del timbre al aire exterior, y éste al oído, probándose que los sólidos, como los líquidos y gases, transmiten el sonido. El no transmitirse por el algodón ó los cordones que sirven en la experiencia primera para soportar el aparato, se explica por la estructura filamentosa de estos cuerpos, que hace que el movimiento se extinga al pasar de unas fibras á otras, dotadas de una gran flexibilidad, pero de una muy pequeña elasticidad.

CAPÍTULO II.

Cualidades del sonido.

Sonido musical. Ruido.— Divídense los sonidos en sonidos propiamente dichos ó musicales y ruidos, sin embargo de no estar bien establecidas las diferencias entre unos y otros; pues mientras hay quien hace consistir la diferencia en la mayor ó menor duración de los sonidos y en el isocronismo de las acciones que los producen, que no existiría en tal caso en los ruidos, otros físicos, con mejor acierto sin duda, definen los ruidos diciendo que son un conjunto de sonidos discordantes.

Si se deja caer al suelo un pedacito de madera, produce un ruido; pero si uno tras otro se dejan caer siete pedacitos del mismo grueso y ancho y de longitudes convenientemente determinadas, se perciben siete sonidos que forman una escala musical. El sonido que, aislado, se consideró como ruido, pasa á la categoría de sonido musical, y comprueba que las diferencias entre unos y otros no son esenciales ni están bien determinadas.

No nos ocuparemos en lo que sigue más que de los sonidos musicales, en los que hay que considerar tres cualidades, por las que distinguimos los unos de los otros: la *intensidad*, el *tono ó altura* y el *timbre*.

Intensidad.— Siendo el sonido producido por el movimiento vibratorio de los cuerpos, los medios que sirven para transmitirlo hasta el oído están animados de movimientos idénticos, verificando sus moléculas oscilaciones más ó menos amplias á uno y otro lado de sus posiciones de equilibrio, y aquellas que están en contacto con la membrana del tímpano, la golpean á la manera de verdaderos proyectiles, por lo que la intensidad de la sensación producida es proporcional á su fuerza viva, para so-

nidos de una misma altura por lo menos; pero la fuerza viva de las moléculas depende de su velocidad, y ésta á su vez de la mayor ó menor amplitud de las oscilaciones que verifican, puesto que la velocidad, nula en las dos posiciones extremas, crece hasta llegar al punto medio, para disminuir en seguida hasta la posición opuesta.

La física no posee hoy aparato alguno que mida la intensidad del sonido, pero las consideraciones expuestas y el cálculo matemático, han conducido á admitir que es proporcional al cuadrado de la velocidad máxima que en cada oscilación adquieren las moléculas vibrantes, ó sea á sus fuerzas vivas, y por tanto, pueden enunciarse las siguientes leyes:

1.^a *La intensidad del sonido es proporcional al cuadrado de la amplitud de las oscilaciones que verifican las moléculas del cuerpo sonoro.*

2.^a *La intensidad de un sonido está en razón inversa del cuadrado de la distancia al cuerpo sonoro.*

Esta segunda ley se explica fácilmente. El sonido se propaga con igual velocidad en todos sentidos en los medios homogéneos, y llega, por consiguiente, en los tiempos sucesivos sobre superficies esféricas ú *ondas* de uno, dos, tres..... metros de radio, que siendo proporcionales á los cuadrados de los mismos, contendrán un número de moléculas que estará en la misma relación; y como la fuerza viva que representa el sonido emitido es invariable, necesariamente tendrán dichas moléculas fuerzas vivas que estarán en razón inversa de su número, por lo que la sensación que produzca su choque sobre la membrana del tímpano, estará también en razón inversa de las superficies de onda ó de los cuadrados de sus radios, que son las distancias al cuerpo sonoro.

La intensidad del sonido depende también de la densidad del aire en que se produce, disminuyendo notablemente con ella, pero no con la densidad del aire en que se oye. Un sonido producido en la mitad de la falda de un monte, es oído con la misma intensidad por dos personas

situadas á igual distancia, una en su parte baja y otra en la cima; pero si cada una de estas dispara un fusil, la que ocupa la posición intermedia oirá con mucha más intensidad el disparo del valle que el de la parte alta.

Propagación del sonido en el interior de un tubo de sección constante.—Si la propagación del sonido se hace en el interior de un tubo cilíndrico, las capas de aire puestas en movimiento tienen la misma extensión, la fuerza viva de cada molécula es igual para todas ellas, y la intensidad del sonido decrece muy lentamente con la distancia, sobre todo si la superficie interior del tubo es lisa y no hay cambios de dirección, pues en éstos tiene lugar la *reflexión* del sonido y en las superficies ásperas se verifican rozamientos, produciéndose en uno y otro caso pérdidas de fuerza viva. Biot observó en las cañerías de conducción de aguas de París, que podía sostenerse una conversación en voz baja á un kilómetro de distancia.

Tubos acústicos.—En los grandes edificios, antes de la invención del teléfono, se establecían tubos de plomo ó de goma por medio de los cuales pueden comunicarse los individuos situados en habitaciones apartadas y en voz tan baja, que no oyen la conversación ni aun los demás que se hallen en las mismas. Un pito colocado en cada uno de los extremos del tubo sirve para llamar la atención del que ha de oír, y el que quiere comunicar, quita el de su extremo y hace sonar el otro soplando suavemente. Estos aparatos recibieron también el nombre de telégrafos acústicos.

Tono.—Toda acción mecánica intermitente ó periódica puede determinar en nosotros la sensación de sonido, siempre que el período sea bastante breve para que la impresión recibida durante uno cualquiera de ellos persista hasta el siguiente, fundiéndose en una sensación continua la serie rápida de impresiones intermitentes, sucediendo con esto al oído lo que al ojo, que ve una línea luminosa por el movimiento rápido comunicado á un hierro candente ó á un carbón encendido.

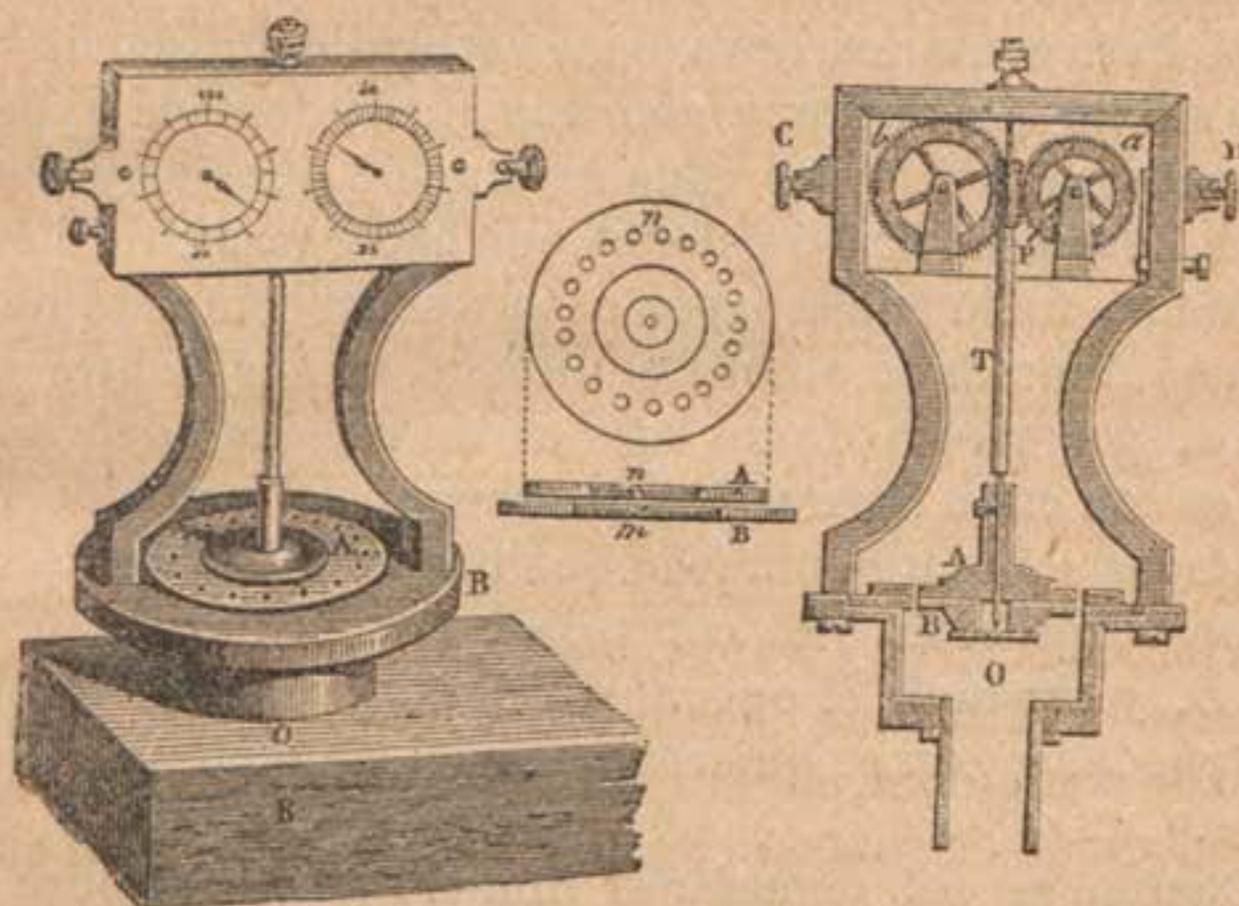
Savart producía sonidos musicales por medio de una rueda dentada y una cartulina. Imprimiendo á la rueda un movimiento rápido de rotación, sus dientes chocan con la cartulina sujeta por el otro extremo, y cada diente de la rueda la obliga entonces á doblarse, recobrando su posición primera al desengranar; oyéndose una serie de choques distintos si la velocidad de la rueda es pequeña, pero pasado cierto límite, que indicaremos luego, se funden en una sensación continua de un sonido musical, tanto más agudo, cuanto mayor es la rapidez con que pasan los dientes.

Todos los experimentos de la misma índole han venido á demostrar de un modo concluyente, *que el tono ó altura de un sonido depende única y exclusivamente del número de vibraciones que en un segundo verifica el cuerpo sonoro.* Todo sonido más *grave* ó *bajo* que otro, proviene de un cuerpo que ejecuta menor número de vibraciones que el segundo en un mismo tiempo; é inversamente, de dos sonidos es más *agudo* ó *alto*, el producido por mayor número de vibraciones en igual tiempo.

Rueda de Savart.—Este aparato, cuya disposición queda indicada en el párrafo anterior, nos da un primer medio de medir el número de vibraciones que corresponden á un sonido cualquiera, pues bastará aumentar sucesivamente la velocidad de rotación de la rueda dentada hasta que produzca un sonido que un oído músico reconozca al unísono con el que se trate de apreciar, sostenerlo durante un minuto, por ejemplo, contar el número de vueltas que en dicho tiempo dé la rueda, y multiplicarlas por el de sus dientes, para obtener un producto que represente el número de vibraciones dobles ejecutadas por la cartulina en el mismo tiempo; el cual, dividido por 60, nos daría las que corresponden en un segundo, tanto á la cartulina como al cuerpo sonoro sometido al experimento, que puede ser un instrumento de música, la voz humana, etc.

Sirena de Cagniard.—En la rueda de Savart, además de producirse sonidos desagradables, es muy difícil

sostener una velocidad constante, condición indispensable para que el sonido se mantenga á la misma altura y pueda apreciarse con exactitud el número de vibraciones correspondientes á un tiempo dado, por lo que se han ideado otros medios de medida, entre los que principalmente figura el de la Sirena. Consiste este aparato en una caja cilíndrica *O* (fig. 6.^a) que se pone en comunicación con un depósito de aire comprimido ó con un fuelle acústico, por medio del tubo en que termina por su parte inferior. En su parte superior lleva generalmente 16 agujeros,

Fig. 6.^a

aunque las hay de 8 y de 32 y aun mayor número de éstos, situados á distancias iguales sobre una misma circunferencia; y sobre esta cara se halla un disco *A* con otros tantos agujeros dispuestos de igual manera, que coinciden con aquéllos. Este disco puede girar sobre un eje vertical *T*, y su movimiento se produce por la reacción debida á la salida del aire que llega del fuelle; para lo cual, los agujeros son oblicuos y están inclinados en sentidos opuestos, como puede verse en la figura que representa el aparato en sección.

La rotación del disco superior produce como consecuencia la obturación de los orificios del inferior, que se abren de nuevo cuando la rotación es de la dieciseisava parte de una circunferencia, para volverse á cerrar y á abrir 16 veces en cada revolución. Si la entrada del aire se regula por medio de una llave, ó bien aumentando ó disminuyendo la presión en el fuelle, puede á voluntad hacerse marchar más ó menos rápidamente el disco obturador y obtener por este medio sonidos más ó menos altos, cuyo número de vibraciones dobles está representado por el número de veces que se abren ó el que se cierran los orificios. Para contarlas, lleva el eje vertical del disco un tornillo sin fin que engrana con una rueda dentada a , de la que pasa un diente por cada revolución del eje, y dicha rueda lleva un brazo ó palanca que hace pasar un diente de una segunda rueda b por cada vuelta completa de la primera, marcando ambas el número de sus dientes que pasan, por medio de las agujas de los dos cuadrantes que se ven en la figura. Las dos ruedas del contador van montadas sobre una plancha que puede desviarse de derecha á izquierda ó al contrario, por medio de un botón D , y producir el engrane ó desengrane del tornillo y la rueda, según se quiera que funcione ó no dicho contador.

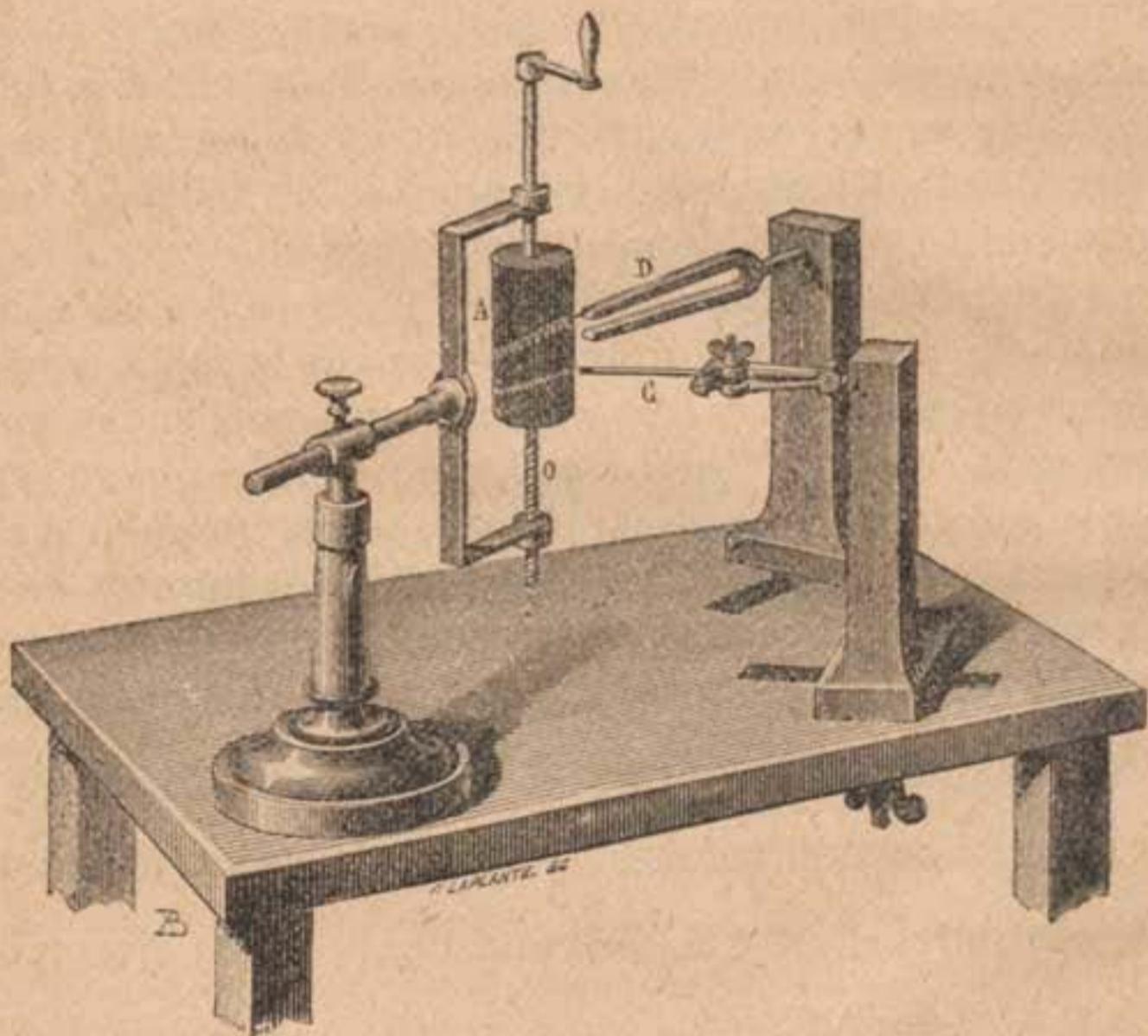
Cuando se quiere medir el número de vibraciones correspondientes á un sonido dado, se abre la llave que da acceso al aire en la sirena y empieza ésta á producir un sonido grave cuya altura aumenta rápidamente; pero manejando convenientemente la llave, se consigue sin dificultad mantenerla al unísono con el cuerpo sonoro; entonces, y en el momento mismo en que se pone en marcha un contador de segundos, se aprieta el botón y se obliga á engranar la rueda del contador con el tornillo del eje, sosteniéndola así hasta que hayan transcurrido un número exacto de segundos, en cuyo caso, se desengranan de nuevo y se halla el número de vibraciones del modo siguiente: sean n , el número de divisiones que marque la

primera rueda y n' , el de las mismas marcadas por la segunda; si la primera tiene 100 dientes y el disco 16 orificios, $n \times 16$, será el número de veces que registra la primera que se han abierto y cerrado, y $n' \times 100 \times 16$, las que registra la segunda, y por tanto, el total, $n' \times 100 \times 16 + n \times 16$; que dividido por el número de segundos que haya durado el experimento, nos dará las vibraciones que por segundo corresponden al sonido estudiado.

Método gráfico.—Duhamel ha ideado un medio por el que el cuerpo sonoro, varilla ó cuerda, escribe sus vibraciones sobre un vidrio ahumado. Para ello fija sobre una tabla un diapasón cuyo número de vibraciones se ha determinado de antemano, y junto á él la varilla ó cuerda cuyo sonido se trata de medir, armados uno y otro de un alambre muy fino que vienen á apoyarse sobre un vidrio ahumado, que puede correr á lo largo de la tabla movido por un peso. Si uno y otro cuerpo están en silencio, marcará cada uno una línea recta sobre el vidrio, pero si se ponen en vibración, marcarán una línea sinuosa en la que el número de sinuosidades representará el número de vibraciones ejecutadas respectivamente. Sean éstas n y n' , para la varilla y el diapasón, contadas en una y otra línea sobre una misma longitud; $\frac{n}{n'}$ será la relación entre el número de sus vibraciones, y si el diapasón ejecuta 435 por segundo, $\frac{n}{n'} \times 435$, será el número de las ejecutadas por el otro cuerpo.

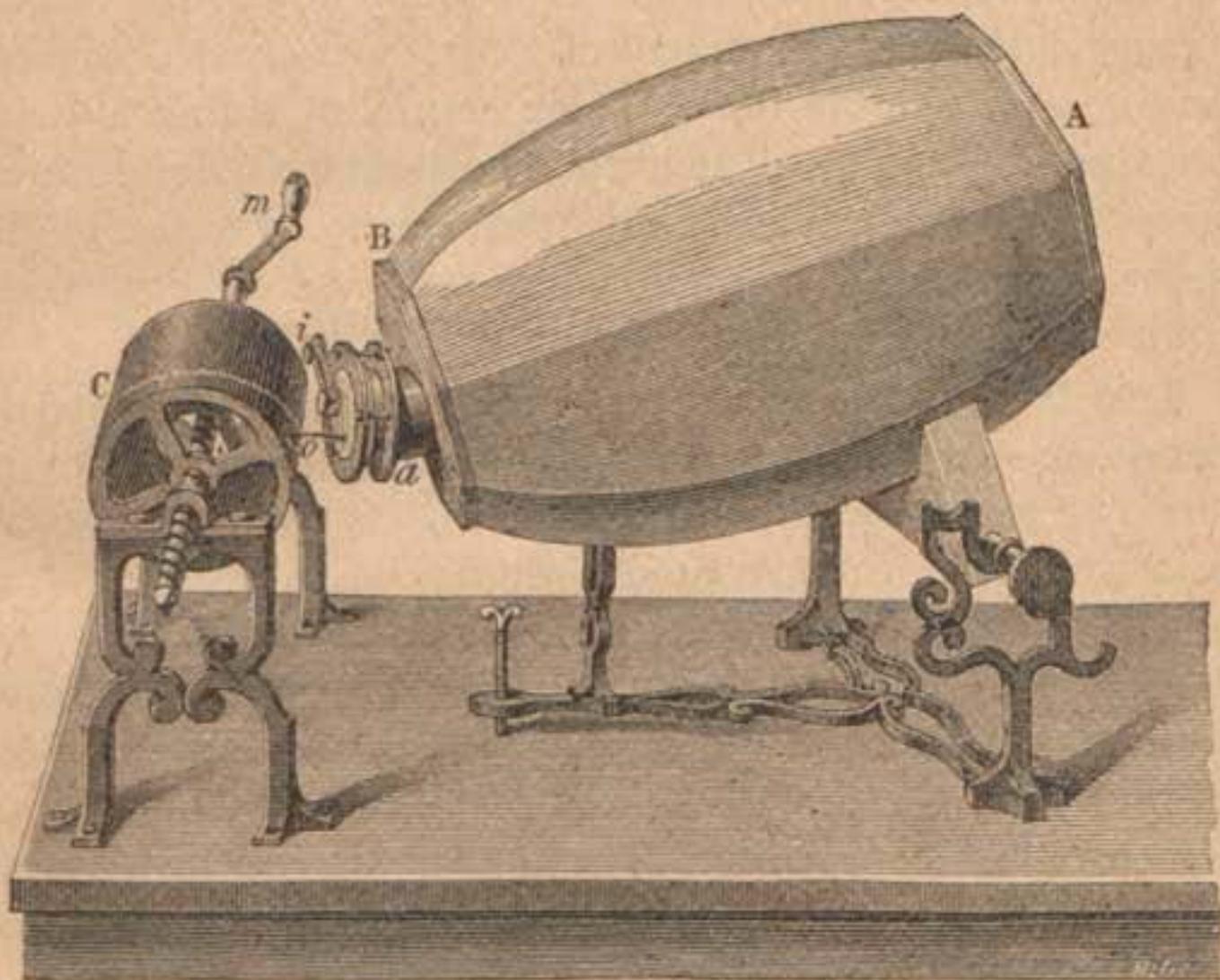
El vidrio plano de este experimento se sustituye por un cilindro A montado sobre un eje fileteado O (fig. 7.^a), lo que entre otras ventajas tiene la de poder hacer inscripciones más largas sobre una superficie mucho menor. El cilindro se cubre con un rectángulo de papel ahumado, encargado de recibir la inscripción de los sonidos, y si el cilindro gira estando el diapasón en reposo, marca una hélice de paso igual al paso del tornillo ó filete del eje; pero cuando los cuerpos vibran, escriben líneas sinuosas,

en las que el número de sinuosidades comprendidas entre dos secciones rectas del cilindro, nos dan la relación $\frac{n}{n'}$ entre el número de sus vibraciones. Para conservar estas inscripciones, basta quitar el papel cortándolo en sentido de una de las generatrices del cilindro que recubre, y sumergirlo después en alcohol por algunos momentos, con lo que el negro de humo queda adherido al papel.

Fig. 7.^a

Fonautógrafo.—El método gráfico que acabamos de describir, no puede aplicarse cuando se trate de un sonido emitido por un instrumento de viento ó de la voz humana, y aun puede decirse que tratándose de cuerpos sonoros sólidos, su aplicación será prácticamente imposible en la mayor parte de los casos; pero en todos éstos puede acudirse al procedimiento ideado por Mr. Scot con

su fonautógrafo (fig. 8.^a). Consiste éste en una caja de resonancia de forma parabólica, cuyo fondo menor se halla cerrado por una membrana elástica que, por medio de rodillos de tensión, se dispone con la conveniente para que responda á las vibraciones del aire de la caja, provocadas por el cuerpo sonoro; una cerda de jabalí pegada perpendicularmente á la membrana en su centro, hace las veces de estilo y escribe sobre un cilindro ahumado, como el anteriormente descrito.

Fig. 8.^a

Cuando se quiere determinar el número de vibraciones que corresponden á un sonido cualquiera, se produce éste delante del fonautógrafo, entra en vibración la membrana, y marca sobre el cilindro en movimiento una curva sinuosa que, como en el método anterior, sirve de base á la determinación deseada, puesto que cada sinuosidad corresponde á una vibración.

Timbre.—El timbre de un sonido es la cualidad por

la cual distinguimos dos sonidos musicales del mismo tono producidos por dos cuerpos distintos. Nadie confunde el *do* de un piano con la misma nota de una flauta, ni éstas, con la de un cornetín, ó con las de la voz humana. Cuando se trata de esta última, el timbre se llama más comúnmente *metal*, y por él llegamos á distinguir unas de otras las personas que tratamos.

Depende esta cualidad, como veremos más adelante, de que los sonidos son muy rara vez simples, y en general están formados por la superposición de varios, llamados *armónicos*, que acompañan á otro principal ó *fundamental*, que cambia de carácter según el número é intensidad de aquéllos. Los físicos alemanes denominan *supertonos* á estos sonidos que los franceses y nosotros llamamos armónicos, y que no siempre lo son en el sentido artístico de esta palabra.

Límites de los sonidos perceptibles. Analogías entre el sonido y la luz.—Hemos dicho antes de ahora que si el movimiento vibratorio es muy lento, produce cada vibración una sensación que no llega á persistir el tiempo suficiente para que, unida á la siguiente, produzca la continuidad; de aquí un primer límite de los sonidos graves, que Savart fijó en 8 vibraciones dobles por segundo, y Mr. Helmholtz en 16 recientemente, por haber demostrado que el sonido oído por Savart era la primera armónica, ó sea la octava del que había creído oír en sus experimentos. Por otra parte, si se pone en función la sirena, y se fuerza cada vez más la entrada del aire, llegan á producirse sonidos tan agudos que dañan al oído; y aumentando cada vez más la velocidad de rotación del disco, llega otro momento en que no se percibe sonido alguno. La circunstancia notable de que no todas las personas alcanzan un mismo límite superior en la audición de los sonidos agudos, aleja toda sospecha de que éstos dejen de producirse, y prueba que el movimiento vibratorio deja de producir una sensación sobre el nervio acústico cuando su velocidad es, por término medio, de

unas 38.000 vibraciones por segundo, según los experimentos de Desprez. Admitiendo estos resultados como exactos, el oído abarcaría una extensión de 11 octavas; pero prácticamente no se emplean en música sonidos que bajen de 40 vibraciones por segundo, ni que excedan de 4.000, lo que equivale á 7 octavas próximamente.

La luz, que, como el sonido, es el resultado de un movimiento vibratorio obrando sobre un nervio de sensibilidad especial, el nervio óptico, tiene también sus límites que corresponden á la luz roja, comparable al límite inferior de los sonidos graves, y la luz violada, que tiene su analogía con los más agudos. Las vibraciones más lentas producen calor, pero no sensación luminosa, y las más rápidas se llaman radiaciones ultravioletadas ó químicas, por la propiedad que poseen de determinar combinaciones y descomposiciones químicas, además de manifestarse por otra série de fenómenos, tales como la fosforescencia y fluorescencia, debidas á su transformación en vibraciones luminosas menos rápidas, por la acción de ciertos cuerpos, como el diamante, sulfuro de calcio, sulfato de quinina y otros, que se llaman, por poseer estas propiedades, fosforescentes ó fluorescentes.

La relación entre el número de vibraciones que producen la sensación de luz roja y las que corresponden á la violada, es poco mayor que la de uno es á dos; lo que en lenguaje musical se expresa diciendo que comprenden poco menos de una octava.

CAPÍTULO III.

Propagación del sonido.

Conocida la naturaleza del sonido y estudiados sus caracteres diferenciales, vamos á ocuparnos del mecanismo de su propagación en los medios *isótropos* ó de igual densidad en toda su masa (homogéneos) y la misma elas-

ticidad en todas direcciones, y de las circunstancias notables que á este hecho acompañan.

Propagación del sonido en un tubo indefinido. Onda.—Supongamos que en un tubo de longitud indefinida MN (fig. 9.^a), se mueve un émbolo P animado de un movimiento alternativo, cuyas posiciones extremas representamos por A y a . Considerémoslo en el momento en que parte de a : su velocidad, cero, crece de una manera continua hasta llegar á su posición media P , en la que alcanza un valor máximo, para decrecer, pasando por los mismos grados, hasta anularse en A . Este movimiento de avance produce una compresión del aire contenido en el interior del tubo y en el mismo sentido del movimiento que, propagándose á la manera que el choque en la serie de esferas de marfil que se usa en el estudio del choque

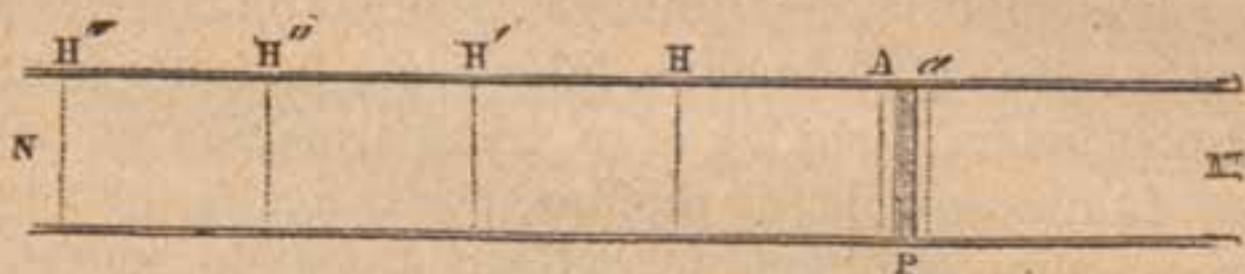


Fig. 9.^a

de los cuerpos elásticos, habrá llegado hasta H en el tiempo empleado por el émbolo en pasar de una á otra de sus posiciones extremas; ya que ésta, como toda comunicación de movimiento, no puede ser instantánea, y exige para tener lugar un tiempo apreciable. Si el émbolo permaneciera en A indefinidamente, la compresión seguiría propagándose en la dirección MN , y en un momento cualquiera, habría dentro del tubo una porción de aire comprimido igual á AH . Si consideramos al émbolo en su movimiento retrógrado de A en a , producirá una dilatación ó rarefacción del aire que, propagándose en sentido opuesto al del movimiento del émbolo, llegará también á H al mismo tiempo que éste recobre su posición primera a , y que, como la compresión del caso anterior, avanzaría por el aire del tubo con un movimiento uniforme, y afectaría á una porción de dicho aire igual á AH .

Ahora bien; si al movimiento de avance sigue sin interrupción alguna el de retroceso del émbolo, á la compresión del aire seguirá la dilatación y se propagarán juntas; y en un momento cualquiera, existirá en el interior del tubo una porción de aire de longitud doble de AH por mitad comprimida y dilatada la otra mitad, que es lo que constituye *una onda sonora*. La mitad comprimida, se llama *onda condensada*, y la mitad dilatada, *onda dilatada*, aunque con alguna impropiedad, pues debieran llamarse semi-ondas. Si el movimiento del émbolo sigue sin interrupción y se verifican sus oscilaciones en tiempos iguales, engendrará una serie de ondas sonoras iguales, cuya longitud será evidentemente la distancia á que se propaga el movimiento en el aire para el tiempo que dure una oscilación, y en un segundo se propagará á una distancia igual á la longitud l de la onda multiplicada por el número n de oscilaciones ó vibraciones dobles del émbolo, cuya distancia representará la velocidad V de propagación del sonido; y por tanto podremos decir que,

$$V = ln.$$

Propagación del sonido en un medio indefinido.—Si ahora consideramos el movimiento vibratorio de un cuerpo sonoro en una masa de aire ilimitada, como no se concibe el movimiento de una molécula de un fluido sin que se rompa el equilibrio de toda la masa, este movimiento se propagará en todas direcciones y á distancias iguales, si el medio es isótropo, dando lugar á una serie de ondas esféricas alternativamente condensadas y dilatadas (fig. 10), y cada molécula de este fluido ejecutará una serie de oscilaciones ó movimientos de avance y retroceso, que serán enteramente análogos á los ejecutados por el cuerpo sonoro; de avance en la compresión, de retroceso en la dilatación, y como resultado final, una oscilación en el tiempo que tarda en pasar por ella una onda sonora.

Puede formarse una idea de la manera de producirse y propagarse estas ondas, observando las que se produ-

cen en la superficie tranquila del agua de un estanque cuando se deja caer en ella una piedrecilla, ó mejor aún si se baja y sube un pequeño émbolo que toque á la superficie del líquido. Prodúcese, en efecto, en estas circunstancias, una série de ondas que todo el mundo ha podido observar más de una vez, y que, agrandándose, se propagan en círculos concéntricos hasta invadir la superficie toda del agua; y en las que las compresiones y dilataciones de las ondas sonoras están sustituidas por elevaciones y depresiones de las moléculas líquidas sobre el nivel medio de las mismas, formando una *cresta* seguida de una depresión ó *surco*, representantes de la onda comprimida



Fig. 10.

y dilatada; y cada molécula de agua ejecuta una elevación y una depresión por cada onda que sobre ella pasa, á la manera que avanza y retrocede la molécula de aire para servir á la transmisión de las ondas sonoras; resultando en uno y otro caso la transmisión de un movimiento á grandes distancias por efecto de movimientos de muy pequeña amplitud de cada molécula del medio transmisor.

Longitud de una onda sonora.— Representando por V la velocidad de propagación del sonido en un medio cualquiera, por n el número de vibraciones dobles que ejecuta un cuerpo sonoro, y por l la longitud de una onda sonora, podremos, como queda dicho, establecer la relación $V = n l$, ó bien

$$l = \frac{V}{n},$$

la cual permite calcular la velocidad de propagación del sonido en un medio isótropo, si se conocen la longitud de una onda y el número de vibraciones del cuerpo que las produce; ó bien calcular la longitud de la onda sonora, cuando se conozcan la velocidad de propagación del sonido y el número de vibraciones del cuerpo sonoro.

Velocidad de propagación del sonido.—Los métodos empleados para medir la velocidad de propagación del sonido, son: 1.º, el método directo, reducido á medir experimentalmente el tiempo que emplea el sonido en propagarse de un punto á otro, cuya distancia se ha determinado con exactitud; 2.º, por medio del cálculo, y 3.º, por medios indirectos, principalmente fundados en el estudio de las vibraciones longitudinales de los cuerpos sólidos y las de los tubos sonoros, ya funcionen en el seno de un gas, ó en el de un líquido. Por todos ellos se ha llegado á la conclusión de que la velocidad del sonido es directamente proporcional á la raíz cuadrada del coeficiente de elasticidad del medio en que se propaga, y está en razón inversa de la raíz cuadrada de la densidad del mismo medio. La elasticidad de los medios se mide por lo que se llama su *coeficiente de elasticidad*, que representa un peso capaz de producir, obrando en el extremo de una barra cuya sección sea de un milímetro cuadrado, un alargamiento igual á su longitud. Como este alargamiento es prácticamente imposible, pues se rompería mucho antes de doblar su longitud la barra que se sometiera al experimento, se llega á su determinación por consideraciones teóricas, deducidas de su elasticidad dentro de los límites posibles, y lo mismo se hace para los líquidos y gases, partiendo de su compresibilidad (1).

(1) La fórmula que da el alargamiento que experimenta una barra sometida á esfuerzos de tracción es, $P = \frac{1}{c} a$; en la cual, P representa el peso tensor por unidad de superficie de la sección recta de la barra, a el alargamiento por unidad de longitud de la misma barra, y c el coeficiente de compresibilidad lineal de la sustancia de que esté formada, ó sea lo

Fácilmente se comprenderá que, considerados bajo este punto de vista los cuerpos, serán menos elásticos aquellos que más se acorten ó alarguen por la acción de un mismo peso en igualdad de circunstancias, y por tanto, que los gases son menos elásticos ó tienen un coeficiente de elasticidad menor que los líquidos y sólidos, resultando asimismo ser mayor la elasticidad de estos últimos que la de los líquidos. Con estos antecedentes, y tomando en cuenta la pequeña compresibilidad de los líquidos, no nos extrañará que la experiencia enseñe que la velocidad del sonido es notablemente mayor en éstos que en los gases, y aun mayor que en ambos en los cuerpos sólidos, no obstante la mayor densidad de éstos y de los líquidos, comparada con la de los gases.

Estando la fuerza elástica de los gases (presión), en razón inversa de sus volúmenes, la velocidad del sonido debería ser doble para un mismo gas, cuando su volumen se hiciera cuatro veces menor; pero siendo la densidad inversamente proporcional al mismo volumen, y la velocidad del sonido inversamente proporcional á la raíz cuadrada de la densidad, resulta que, por haberse hecho ésta cuatro veces mayor, la velocidad del sonido debe ser la mitad de la que correspondía al gas en cuestión, y que por tanto, el resultado final será que no cambiará aquella con la presión á que se hallen sometidos los gases, suponiendo que su temperatura no varíe.

Dos gases á la misma presión tienen la misma elasticidad, y la velocidad del sonido en ambos estará en razón

que se acorta la unidad de longitud de una barra de un milímetro cuadrado de sección, sometida á la compresión de un peso igual á la unidad. La fracción $\frac{1}{c}$ se representa generalmente por Q , y la fórmula anterior toma la forma

$$P = Q a,$$

en la cual Q , que es lo que se llama *coeficiente de elasticidad*, resulta ser igual á P , si $a = 1$; es decir, que Q , es igual al peso que produciría un alargamiento igual á la longitud de la barra, ó que doblaría su longitud.

inversa de la raíz cuadrada de su densidad; así, en el hidrógeno, cuya densidad es catorce y media veces menor que la del aire, se propagará el sonido con una velocidad casi cuatro veces mayor que en éste; y en el ácido carbónico, por el contrario, se propagará el sonido con una velocidad más pequeña que en el aire, por ser más denso.

Calentando un gas en una vasija cerrada de modo que no pueda dilatarse, aumenta su fuerza elástica sin variar su densidad; y si se calienta en condiciones de poderse dilatar conservando siempre la misma fuerza elástica, su densidad se hará menor, y en uno y en otro caso, aumentaría la velocidad de propagación del sonido en la masa del mismo. Todas estas previsiones quedan perfectamente comprobadas por los resultados obtenidos en los experimentos hechos con el objeto de medir la velocidad del sonido en el aire.

Velocidad del sonido en el aire.—Se determinó ésta en 1738 por una comisión de la Academia de ciencias de París, y en 1822 por otra del Observatorio, empleando el mismo procedimiento, reducido á fijar dos estaciones á 29 kilómetros en los primeros experimentos, y disparar sucesivamente en cada una de ellas varios cañonazos, midiendo en la otra, con la mayor exactitud, el tiempo transcurrido entre el momento en que se apercibía el fogonazo y el en que se oía el estampido correspondiente. Como la luz se propaga con una velocidad de 308.000 kilómetros por segundo, se puede despreciar el tiempo que tarda en salvar la distancia comprendida entre las dos estaciones, y tomar como tiempo empleado en propagarse el sonido, de una á otra, el que queda dicho. Como los vientos favorecen la propagación del sonido en su propia dirección, se tomó la precaución de hacer los disparos de una y otra estación alternativamente á intervalos muy cortos, y tomar el término medio de cada dos observaciones. Se admite como resultado de estas investigaciones, que la velocidad del sonido en el aire á la temperatura de 15°, es de 340 metros, y por otra serie de experimentos llevados á

cabo por Mr. Regnault, la de 331 á la de 0°, aumentando ésta de unos 6 decímetros por grado de temperatura.

Velocidad del sonido en el agua.—Collandon y Sturm determinaron la velocidad del sonido en el agua en el lago de Génova, valiéndose del siguiente procedimiento: Una embarcación sostenía, sumergida en el agua, una campana que se golpeaba por medio de un mazo, movido por una palanca; esta palanca llevaba en su otro extremo una mecha encendida que determinaba la inflamación de una pequeña cantidad de pólvora en la cubierta del buque al mismo tiempo que hacía sonar la campana. Un observador, colocado á una distancia conveniente, aplicaba el oído en el extremo de un tubo cuya parte inferior, en forma de embudo y cerrado por una membrana, se hallaba sumergida en el agua, y medía el tiempo que transcurría entre el momento de la inflamación de la pólvora, que era el de la producción del sonido, y en el que oía la campana. El resultado á que llegaron fué, que la velocidad del sonido en el agua es de 1.435 metros por segundo, á la temperatura de 8°, ó sea, más de cuatro veces la velocidad del mismo en el aire.

Velocidad del sonido en los cuerpos sólidos.—Los únicos experimentos directos hechos con el objeto de determinar la velocidad del sonido en los sólidos, se refieren á los tubos de hierro fundido de una cañería destinada á la conducción de aguas. Biot dispuso en el extremo de la cañería, que mide una longitud de 951^m,25, un timbre y un martillo que, al golpearlo, golpeaba igualmente el borde del tubo, con lo que, un observador colocado en el otro extremo, oía primero un sonido correspondiente al golpe recibido por el tubo y transmitido por el mismo, y más tarde, con un intervalo de dos segundos y medio, el del timbre, transmitido por el aire. Con estos datos es fácil calcular la velocidad del sonido en la fundición, que resulta ser diez y media veces mayor que en el aire.

La velocidad en otros cuerpos sólidos, como en los lí-

quidos distintos del agua, no se ha podido determinar sino por medio de las fórmulas de Newton y Laplace, de las que no nos ocuparemos por la índole elemental de este tratado, y por medios indirectos de que hablaremos más adelante, reducidos á determinar la longitud de la onda correspondiente á un sonido, cuyo número de vibraciones se conoce, y aplicar la fórmula $V = n l$.

Efectos del movimiento de traslación de los cuerpos sonoros.—Si un cuerpo sonoro se mueve alejándose ó aproximándose del que oye, varía el tono ó altura del sonido producido, elevándose éste cuando se acerca y bajando cuando se aleja. Estos efectos se explican fácilmente, considerando que al acercarse el cuerpo sonoro, las vibraciones que se suceden recorren caminos cada vez más cortos para llegar al oído, empleando menos tiempo que el que hubieran empleado si hubiera permanecido en reposo, lo que dará por resultado, que lleguen en un segundo mayor número de ellas, ó que se eleve el tono; y que lo contrario sucederá si el cuerpo se aleja (1).

El silbato de una locomotora que marcha con una ve-

(1) Un cálculo sencillo permite valuar la variación de que se trata. En efecto, sean x la distancia del cuerpo sonoro al observador, N el número de vibraciones del sonido producido, y $\frac{1}{m} V$ la velocidad de traslación del cuerpo, referida á la velocidad V del sonido. La primera vibración tardará en recorrer la distancia x , $\frac{x}{V}$ segundos; y la producida al cabo de un segundo, por hallarse el cuerpo á una distancia $x \pm \frac{1}{m} V$, tardará en lle-

gar al oído $\frac{x \pm \frac{1}{m} V}{V} = \frac{x}{V} \pm \frac{1}{m}$, y se hallará adelantada ó atrasada de una fracción de segundo $\frac{1}{m}$. Así, pues, las N vibraciones, en vez de llegar al oído en un segundo, tardarán $1 \pm \frac{1}{m}$ segundos, y en cada segundo llegarán el número que resulte de dividir aquellas por el tiempo, es decir, $\frac{N}{1 \pm \frac{1}{m}}$. La relación, pues, entre el tono del sonido producido

y el que se oye, es la misma que entre 1 y $\frac{1}{1 \pm \frac{1}{m}}$.

locidad de 50 kilómetros por hora, que equivale aproximadamente á $\frac{1}{25}$ de $V.$, experimenta una variación de tonos tal, que si en reposo produce el *la natural*, se oye cuando se acerca el *la sostenido*, y el *la bemol* cuando se aleja.

Análogos resultados se obtienen si estando fijo el cuerpo sonoro se aproxima ó aleja el observador.

Algunos físicos han pretendido explicar la coloración de la luz de algunas estrellas por efecto de los cambios de tono (coloración, tratándose de la luz como queda dicho) producidos por el movimiento de éstas. Se elevaría el tono y tendrían una luz más ó menos violácea, las que se movieran acercándose, y bajaría, ó tendrían luz rojiza, las que se alejaran, siendo, por fin, blanca, la luz de las que permanecieran á la misma distancia; pero, aparte de que esto exigiría velocidades verdaderamente fabulosas, dada la velocidad de la luz, no hay dato positivo alguno que abone tal hipótesis.

CAPÍTULO IV.

Reflexión del sonido.

El sonido se propaga en línea recta.— Sea A (fig. 11) una esfera, de radio muy pequeño, que supondremos animada de un movimiento vibratorio, ó sea que aumenta y disminuye de diámetro, dando lugar á una serie de ondas alternativamente condensadas y dilatadas á la manera que se originaban por el movimiento del émbolo considerado en el interior de un tubo indefinido. Este movimiento se habrá propagado al cabo de un tiempo T á una distancia AB , y engendrado una superficie de onda representada por la esfera $EBF...$, cada uno de cuyos puntos podemos considerar como otros tantos focos de vibra-

ción que engendrarán series de ondas esféricas con dichos puntos por centros, y que al cabo de un tiempo T' , estarán representadas por las dDc , eCg ..., cuya resultante es la onda DCG , tangente á todas las ondas parciales, y cuyo centro está en A . El movimiento vibratorio que alcanza primero á C , y el único que no es destruido por el que procede de otros puntos de la onda EBF , procede de B , como proceden de E y F los que llegan á D y G respectivamente; y como igual razonamiento podríamos hacer sobre toda onda anterior á la DC distinta de la EBF , y ésta misma, resultará

que, el movimiento que llega á un punto cualquiera de ella, procede de los puntos de las rectas AC ó AD ... que unen á dicho punto con el foco sonoro, habiendo pasado por todos ellos, y que el sonido se propaga en línea recta. A las direcciones de propagación del sonido AD , AC , AG ... en todos los casos nor-

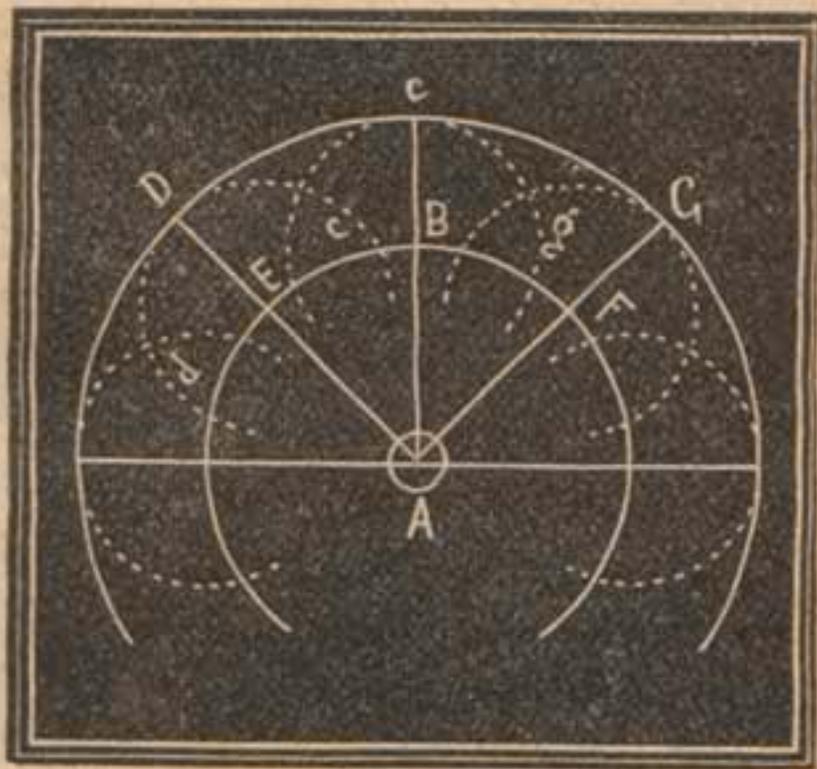


Fig. 11.

males á las superficies de las ondas correspondientes, se las llama *rayos sonoros*; y considerados en conjunto los comprendidos en un cono ó una pirámide cuyo vértice corresponda á un punto del cuerpo vibrante, forman un *haz sonoro*. Estos haces serían divergentes, pero en casos determinados, los rayos que los forman pueden ser paralelos ó convergentes, y los haces respectivos reciben estas mismas denominaciones.

Cambios de dirección en la propagación del sonido.—Cuando el movimiento vibratorio llega en su propagación á la superficie que separa dos medios, el segundo entra en vibración dando lugar á dos series de on-

das sonoras; una de ellas se propaga en el primer medio, y son las *ondas reflejadas*, que provocan un cambio brusco en la dirección de propagación del sonido llamado *reflexión*, en todo comparable al cambio brusco de dirección que experimenta una pelota que se lanza violentamente contra el suelo; y la segunda de aquéllas corresponde al movimiento vibratorio que se transmite al través del segundo medio, y que asimismo experimenta un cambio de dirección en su propagación, llamado *refracción*, si la dirección incidente es oblicua á la superficie que separa los dos medios.

Resulta, pues, que al movimiento sonoro incidente se suceden dos movimientos vibratorios: uno reflejado, que vuelve al primer medio; y otro refractado, que pasa á propagar el sonido en el segundo. Este último se propagará á mayor ó menor distancia de la superficie de separación, según que el nuevo medio sea más ó menos denso y elástico, pudiendo en casos determinados extinguirse casi en la misma superficie, como sucede en las telas, lana y demás cuerpos filamentosos, y en general en todos aquellos formados por la interposición de dos ó más de muy distinta densidad y elasticidad, como arena, aserrín, etc., entre cuyas partículas hay aire ú otro gas cualquiera; porque el gran número de reflexiones y refracciones que por las soluciones de continuidad se provocan en su seno, difunde el movimiento en todas direcciones, disminuyendo rápidamente su intensidad en cualquiera de ellas en que se considere.

Pudiera abrigarse la duda de si, movimientos al parecer tan tenues como lo son las ondas sonoras, tendrán energía suficiente para hacer entrar en vibración la superficie dura de una roca, de un muro, de una lámina metálica, etc.; pero aparte de que la experiencia diaria lo comprueba, permitiéndonos oír dentro de habitaciones cerradas los sonidos que al exterior ó en otras contiguas se producen, transmitidas por los muros, puertas y cristales, aún hallaremos más plena confirmación de este hecho en el estu-

dio del fonógrafo y del teléfono, verdaderas maravillas del presente siglo, como aparatos puestos en acción por las ondas sonoras obrando sobre una lámina elástica y destinados, el primero, á la reproducción indefinida de los sonidos, y á su reproducción instantánea y á grandes distancias el segundo.

Estos cambios de dirección en la propagación del sonido presentan la más completa analogía con los que la luz experimenta al caer sobre los cuerpos, reflejándose en su superficie y haciéndolos visibles, y transmitiéndose al través de su masa en los transparentes, ó extinguiéndose

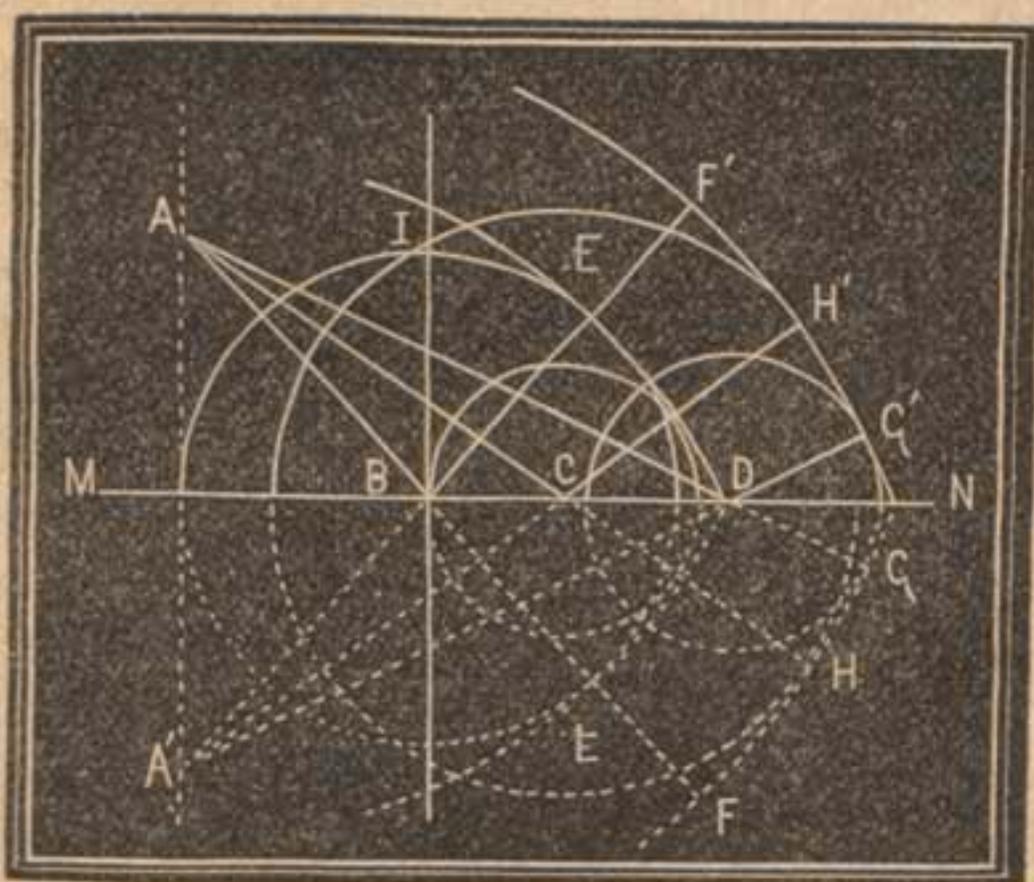


Fig. 12.

á corta distancia de la superficie en los cuerpos que no presentan esta propiedad; pudiendo asimismo formarse medios opacos por la mezcla de cuerpos transparentes divididos, como el vidrio molido, la espuma y otros, por la difusión del movimiento vibratorio en la multitud de reflexiones y refracciones que en tales medios se provocan, á semejanza de las que en los mismos se producen para el sonido y por las mismas causas.

Reflexión del sonido. Sus leyes.—Si representamos por A (fig. 12) un foco sonoro, y por *DE* y *FG* las

porciones de ondas sonoras comprendidas entre los rayos AG y AF , engendradas al cabo de los tiempos t y t' , y suponemos que á su propagación se opone la superficie MN de un cuerpo elástico, la porción BD de la misma entrará en vibración, y cada uno de sus puntos dará lugar á una serie de ondas que al cabo del tiempo t' se habrán propagado á distancias iguales á BF , CH y DG respectivamente, y serán superficies esféricas que tendrán por radios estas respectivas distancias, siendo todas ellas tangentes á la onda $\bar{G}F$ y á la $G'F'$ simétrica de GF que tenga por centro el punto A' simétrico del punto A con relación al plano MN . Pero como las porciones de dichas ondas inferiores á MN no han podido producirse por la interposición de dicha superficie, y sí las superiores, que tienen por resultante á la tangente común ó envolvente $F'G'$, las ondas directas DE , GF son sustituidas por las DE' , $F'G'$, que son las reflejadas correspondientes; y si consideramos un rayo AC directo, se reflejará según la dirección CH' , que resulta de unir el punto de incidencia C con el A' simétrico de A , y todo se producirá como si el sonido reflejado correspondiera á una serie de ondas sonoras nacidas de A' , que es el *foco virtual* ó *imagen sonora* del punto A .

La dirección AB se llama *rayo incidente*, y el ángulo que forma con la normal IB á la superficie MN en el punto de incidencia ABI , es el *ángulo de incidencia*; y la dirección BF' es el *rayo reflejado* que forma con la misma normal IB un ángulo $F'BI$, que es el *ángulo de reflexión*. Estos dos ángulos son iguales como suplementos de los $F'BN$ y ABM iguales entre sí por serlo cada uno de ellos al $A'BM$; y como además las dos direcciones AB y BF' están en el plano de la figura que comprende también á la normal IC , se enuncian las dos leyes siguientes, que vuelven á encontrarse al estudiar la reflexión del calor y la de luz, que, como la del sonido, son en un todo idénticas á la reflexión de los cuerpos elásticos:

- 1.^a *El ángulo de incidencia y el de reflexión son iguales.*

2.^a *El rayo incidente y el reflejado se hallan en un mismo plano normal á la superficie reflectante.*

La verificación experimental de estas dos leyes suele hacerse de un modo indirecto por la comprobación de las propiedades de los espejos cóncavos esféricos ó parabólicos, cuyo estudio se hace al tratar de la reflexión de la luz. Al efecto, se suspende un reloj en el foco principal (1) de un espejo, con lo que los rayos sonoros que sobre él caen se reflejan paralelamente á su eje principal, y recibidos éstos en la dirección del eje principal de un segundo espejo, sufren una nueva reflexión que los hace concurrir en el foco de este último; de donde resulta, que aplicando el oído en este punto, se oye con distinción el tic-tac del reloj, que no se oye á una distancia menor.

Si en una habitación cuyo techo tenga la forma de una bóveda elíptica se colocan dos personas en los dos focos de la misma, pueden conversar en voz bastante baja para que las personas situadas entre uno y otro de los interlocutores no lleguen á entender lo que se dicen; y propiedades análogas se citan como resultado casual producido por los arcos y bóvedas de algunas catedrales.

Ecos y resonancias.—Si se produce un sonido en la proximidad de una superficie elástica suficientemente extensa, un observador podrá oír, primero, el sonido directo, y al cabo de un tiempo más ó menos largo el sonido reflejado, que es lo que se llama *eco*; pero el sonido reflejado puede llegar al oído del observador antes que se haya extinguido la impresión producida por el sonido directo, y entonces constituye lo que se llama *resonancia*.

Supongamos que se habla frente á un muro situado á una distancia de 17 metros; como el tiempo necesario para pronunciar una sílaba es de una décima de segundo, y el sonido directo para reflejarse tiene que llegar al muro, ó que recorrer 17 metros, y otros 17 después de refle-

(1) Hállase éste á una distancia del espejo igual á la mitad de su radio de curvatura en los espejos esféricos.

jado para llegar al oído del que la pronunció, ó sea un total de 34 metros para que suceda esto último, el sonido empleará en recorrerlos una décima de segundo, puesto que su velocidad en el aire es de 340 metros, y resultará que el que habla y los que estén á su lado, oirán repetida la sílaba pronunciada á continuación de la directa. Si en vez de una sílaba se pronuncia una palabra de varias sílabas, las reflejadas llegarán al oído al mismo tiempo que las directas inmediatas, que, como sonidos más intensos, borran aquéllas, y sólo al terminar se oirá la sílaba reflejada correspondiente á la última de las pronunciadas. Éste será, pues, un eco *monosilábico*; pero si la distancia á la superficie que produce la reflexión es dos, tres veces 17 metros, se podrán oír las dos ó tres últimas sílabas, si bien con intensidades que disminuyen rápidamente hasta no producir ninguna sensación en el oído, por lo que son muy raros los *ecos polisilábicos*. Puede también sufrir un sonido varias reflexiones sobre distintas superficies, y resultar entonces los ecos *múltiples* ó que repiten muchas veces un mismo sonido. De todos ellos se citan ejemplos, ya en los desfiladeros de roca viva, en que la vegetación es escasa ó nula, ya en edificios de grandes proporciones.

Las resonancias que, como hemos dicho, son ecos en que los sonidos reflejados se confunden con los directos, reforzándolos, favorecen la audición, como en los teatros y salones de conferencias públicas; pero sucede á veces que son tantos y tan intensos los sonidos reflejados, que producen un verdadero embrollo, haciéndose imposible toda conversación en semejantes locales. Este defecto es frecuente en los anfiteatros y salones de actos cuando están desiertos, como sucede en el de la Universidad de Valencia, y se modifica hasta el punto de desaparecer por completo con el decorado y la concurrencia á los actos que en ellos se verifican, por la sustitución de las telas y ropajes á los muros y bancos que, como más elásticos, producen reflexiones que desaparecen al cubrirlos.

Bocina y trompetilla acústica.—La bocina (figura 13) consiste en un tubo de hoja de lata ó cartón ligeramente cónico, de uno á dos metros de longitud y de 4 á 5 centímetros de diámetro en su parte más ancha, que termina en un pabellón ó cono más abierto, análogo al de las trompetas y á veces plano, y en su extremo más delgado lleva una embocadura á la que se aplican los labios para hablar.

El objeto de la bocina es el de hacerse entender á distancias considerables, por la mayor intensidad que las ondas sonoras adquieren en el sentido de su eje, por efecto de las reflexiones que la voz sufre en las paredes del tubo que la forma. Parece indudable el efecto que el pabellón produce en las bocinas, sin embargo de que, teóricamente, no se explica que pueda producir alguno.

La trompetilla acústica (fig. 14) es una bocina invertida y de



Fig. 14.

dimensiones más pequeñas, cuyo objeto es hacer perceptibles sonidos que pasarían desapercibidos, ó por su poca intensidad, ó por defecto de sensibilidad auditiva del que la usa. Se comprende fácilmente que recogiendo mayor extensión de las ondas sonoras, y reflejándolas hacia la parte estrecha del tubo que se introduce en el oído, se produzca el efecto indicado. Se le dan diversas formas, en su ma-

yor parte injustificadas y completamente arbitrarias.

Megáfono.—Con este nombre ha dado á conocer

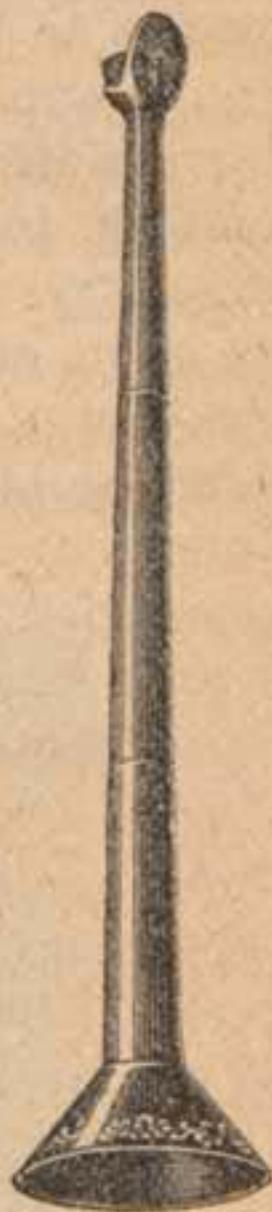


Fig. 13.

Mr. Edison un aparato, combinación de la bocina y la trompetilla acústica, que permite sostener conversaciones á distancias de dos ó tres kilómetros. Se compone de una bocina de hoja de lata de dos metros de longitud y tres centímetros de diámetro, y dos trompetillas acústicas de dimensiones extraordinarias, formadas cada una por un embudo de cartón de dos metros de longitud y 0,80 de diámetro en su parte ancha, y de cuyo fondo parte un tubo de goma que se introduce en cada oído. La bocina y los dos conos, ligeros aunque voluminosos, van montados sobre un pié y se transportan fácilmente. Cada uno de los interlocutores va armado de su aparato correspondiente, que dirige hacia el otro, valiéndose de la bocina para hablar, é introduciendo en cada oído uno de los dos tubos de goma para escuchar.

CAPÍTULO V.

Refracción é inflexión del sonido.

Refracción del sonido. Sus leyes.—Cuando el sonido pasa oblicuamente de un medio á otro, á semejanza de lo que sucede con la luz, y sujeto á sus mismas leyes, experimenta una desviación en su dirección de propagación, aproximándose á la normal á la superficie que separa los dos medios, si su velocidad en el segundo es menor que en el primero, y apartándose de la misma, si por el contrario, es mayor en éste que en aquél. Esta desviación es lo que se llama *refracción*, y de los medios en que se propaga se dice, que es *más refringente* aquel que transmite el sonido con menor velocidad, ó en el que la desviación tiene lugar acercándose á la normal.

Para simplificar la cuestión, sea AB (fig. 15) una porción de onda plana, lo que supone, ó bien que procede de

un foco situado á una distancia infinita, ó que se considera una porción de dicha onda bastante pequeña para confundirse sensiblemente con un plano tangente á la misma, y supongamos que viene á encontrar la superficie MN que separa dos medios en los que las velocidades del sonido sean v y v' respectivamente. Esta onda, al cabo de un tiempo t se hubiera transportado en el primer medio á una distancia $AD=vt$ y estaría representada por CD ; pero el movimiento vibratorio provocado en el punto A , por el encuentro de la onda con la superficie MN al empezar el tiempo t , se habrá propagado en el segundo medio á una

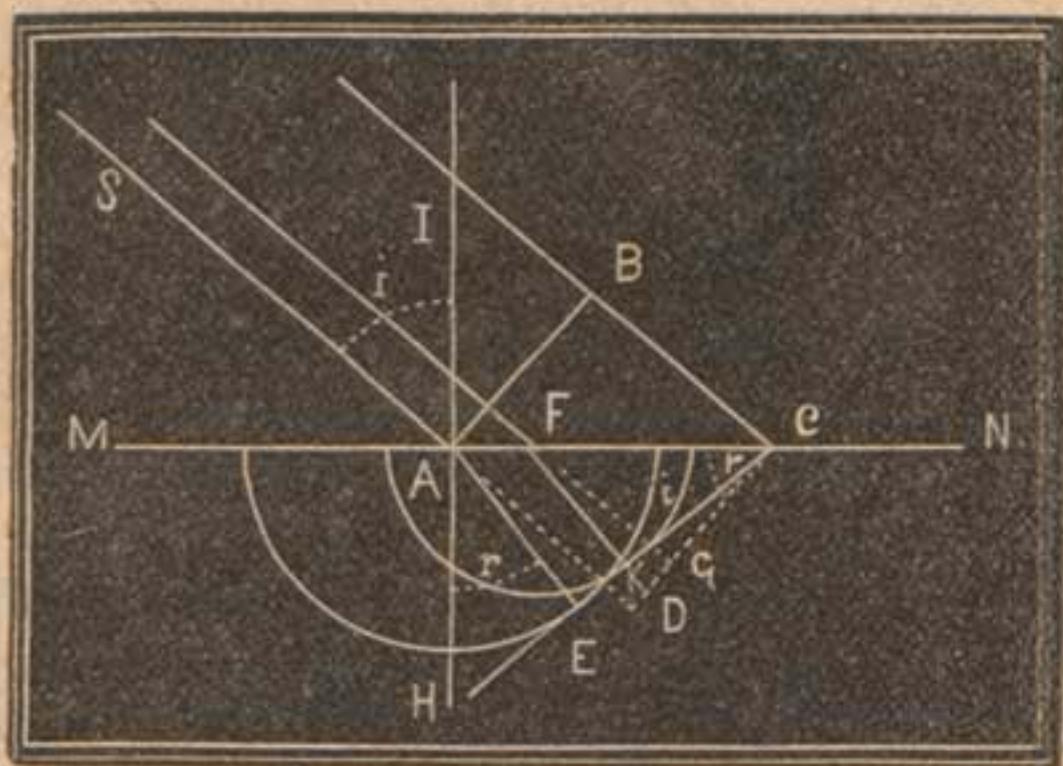


Fig. 15.

distancia $AE = v't$, y vamos á demostrar en primer término, que la tangente trazada desde C á la circunferencia cuyo centro es A y cuyo radio es AE , representa la onda refractada, por ser la envolvente ó tangente común á todas las ondas que entre A y C se han producido en dicho tiempo. En efecto, consideremos uno cualquiera de dichos puntos, el F , por ejemplo, y bajemos desde él las perpendiculares FK y FG , á la que suponemos ser la onda refractada EC , y á la directa DC respectivamente. Cada una de estas perpendiculares determina la formación de un

triángulo parcial en los triángulos ACE y ADC , que nos dan las dos proporciones

$$FK : AE :: FC : AC \quad \text{y} \quad FG : AD :: FC : AC,$$

de las que, por tener una razón común, resulta esta otra

$$FK : AE :: FG : AD$$

de donde $FK = FG \frac{AE}{AD}$;

y si sustituimos por AE y AD , sus valores $v't$ y vt , y por FG (que es el espacio recorrido por la onda directa en el tiempo t' transcurrido desde que tocó en F hasta que llegó á C), ponemos vt' , resultará

$$FK = vt' \frac{v't}{vt} = v't,$$

lo que nos dice, que toda perpendicular bajada desde un punto cualquiera de AC , sobre CE , representa el espacio recorrido por la onda, en el mismo espacio y propagada en el segundo medio durante el tiempo transcurrido desde que la onda directa tocó á dicho punto hasta que llegó al C , último que toca de la superficie de separación de los dos medios, y por tanto, que EC es un plano tangente á todas ellas, ó que es su resultante.

Como los rayos son siempre normales á las superficies de onda respectivas, si SA representa el rayo incidente, AE radio de la esfera que pasa por el punto de tangencia, será el rayo refractado, ó sea la dirección de propagación del sonido en el segundo medio.

Ahora bien; $AD = vt$, es un cateto del triángulo ADC , cuyo ángulo en C es igual al ángulo de incidencia SAI , y está ligado á la hipotenusa por la relación

$$AD = vt = AC \text{ sen. } i,$$

y por una razón análoga podemos establecer que

$$AE = v't = AC \text{ sen. } r,$$

siendo r el ángulo que forma el rayo refractado con la normal HI , que se llama *ángulo de refracción*.

Dividiendo ordenadamente las dos ecuaciones anteriores, resulta

$$\frac{AD}{AE} = \frac{v}{v'} = \frac{\text{sen. } i}{\text{sen. } r},$$

lo que nos dice, que entre los senos de los ángulos de incidencia y de refracción existe una relación constante, puesto que es la misma que hay entre las velocidades del sonido en los dos medios de que se trate, que no varían mientras éstos sean los mismos.

A esta relación se llama *índice de refracción*, y se representa por la letra n , pudiendo escribirse $\frac{\text{sen. } r}{\text{sen. } i} = n$.

Si la velocidad del sonido en el segundo medio hubiera sido mayor que en el primero, el radio AE hubiera sido mayor que AD , y el rayo refractado hubiera formado un ángulo de refracción mayor que el de incidencia; pero la relación de sus senos hubiera sido la misma establecida, y por tanto, pueden enunciarse con toda generalidad las siguientes leyes de la refracción:

1.^a *Los senos de los ángulos de incidencia y de refracción están en una relación constante, y*

2.^a *El rayo incidente, el refractado, y la normal á la superficie, en el punto de incidencia, están en el mismo plano.*

Esta segunda ley queda justificada por la sola inspección del trazado geométrico que nos ha servido para establecer la primera.

La comprobación experimental de las leyes de la refracción del sonido suele hacerse de un modo indirecto por la verificación de las propiedades de las lentes convergentes. Al efecto se toman dos trozos circulares de vejiga, ó de una membrana formada con colodión, se pegan por sus bordes, y se inyecta ácido carbónico en el espacio intermedio, con lo que resulta una masa de este

gas de la forma de una gran lenteja, terminada por dos superficies que sensiblemente pueden considerarse como dos casquetes esféricos.

Demuéstrase en óptica que si un cuerpo transparente de la forma dicha se halla en el seno de un medio menos refringente, como lo es en el caso actual el aire, todos los rayos que lleguen paralelamente á la recta que une los dos centros de curvatura de sus caras, que es lo que se llama *eje principal de la lente*, concurren, después de atravesarla, en un punto del mismo eje y del lado opuesto de la lente, que es su *foco principal*; y que todos los rayos que, partiendo de un punto cualquiera del eje situado á mayor distancia de la lente que su foco principal, caigan sobre ella, salen en direcciones tales que concurren en otro punto igualmente situado sobre el eje principal y á mayor distancia que la focal principal, que se llama el *foco conjugado* de aquel punto.

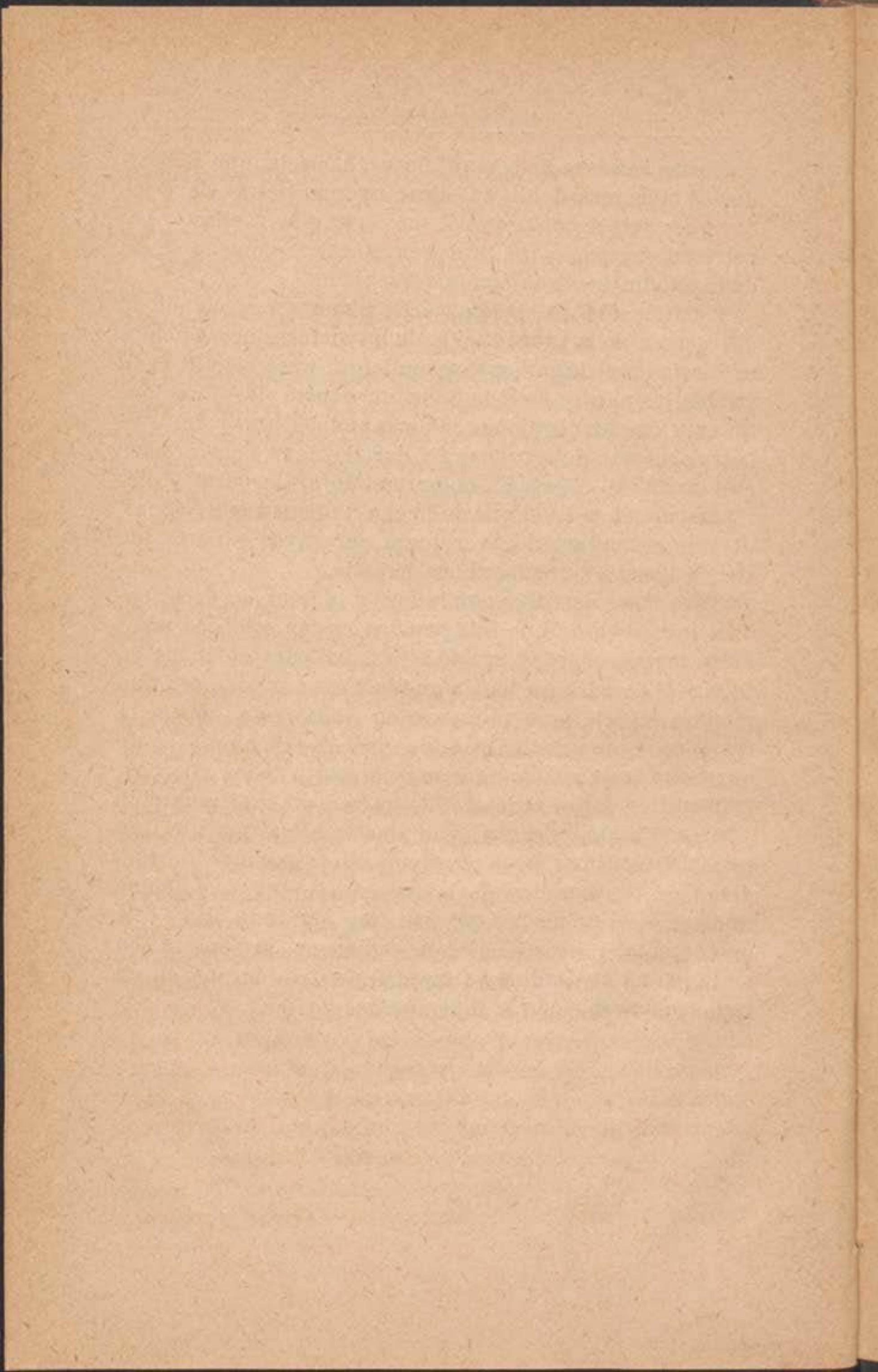
En su consecuencia, si frente á la lente de ácido carbónico y sobre un punto del eje se coloca un reloj á mayor distancia que la focal principal, deberá formarse una verdadera imagen del tic-tac del mismo, en un punto situado del lado opuesto, el cual se encuentra fácilmente colocando el oído á diferentes distancias de la lente y á lo largo de su eje, armado de un embudito de cristal que hace las veces de trompetilla acústica. Encontrado este punto, se comprueba que no se oye el reloj á distancias mayores ó menores, lo que prueba que, en efecto, es este un foco en donde concurren los rayos refractados por la lente, según las previsiones de la teoría.

Inflexión del sonido.—Cuando las ondas sonoras hallan un obstáculo en su camino, pasan á uno y otro lado del cuerpo y se forma detrás de él una verdadera *sombra sonora* que todos hemos tenido ocasión de comprobar cuando en el campo se ha interpuesto un edificio, un cerro, ó una roca, entre nosotros y un tren en marcha ú otro cuerpo que produzca un sonido susceptible de oirse á distancias considerables; pero también sabe todo el mundo

que estas *sombras* no son absolutas, es decir, que el sonido, si bien más débil, se sigue oyendo detrás de estos cuerpos; parece como que el sonido se ciñe á ellas y penetra en el espacio que protegen. A este fenómeno se ha dado el nombre de *inflexión del sonido*.

La inflexión se explica perfectamente recordando lo que acerca de la propagación de las ondas sonoras hemos expuesto en el lugar correspondiente, pues siendo cada uno de los puntos de toda onda un centro de vibración, es claro que las porciones de éstas que del uno y del otro lado del obstáculo se propagan, darán origen á otras ondas que invadirán el espacio comprendido en la parte posterior de aquél, y en el que de hecho no penetraría el sonido si la propagación se verificara por rayos sonoros, en vez de hacerlo por superficies de onda.

Otro tanto acontece con la luz, y la falta de experiencias que probaran que ésta penetra en las sombras arrojadas por los cuerpos, sirvió á Newton para defender su teoría de la emisión, en la que la luz se supone ser una materia especial que se mueve en línea recta, contra la teoría de las ondulaciones, que considera este agente como el resultado de un movimiento vibratorio de los cuerpos, transmitido por el éter; medio universalmente esparcido y al que se atribuye tan gran elasticidad al par que tan pequeña densidad, como es preciso para explicar la velocidad de propagación de la luz en su seno, que, como queda dicho, es de 308.000 km. por segundo. Hoy está demostrada, y se estudia en la *difracción*, la penetración de la luz en las sombras arrojadas por los cuerpos, en un todo comparable con la inflexión del sonido.



SEGUNDA PARTE.

ESTUDIO DE LOS SONIDOS EN RELACIÓN CON LOS CUERPOS QUE LOS PRODUCEN.

Estudiado el sonido sin habernos preocupado del cuerpo que lo ha producido y su propagación al través de los diferentes medios, tócanos ahora hacerlo tomando en cuenta las condiciones del movimiento vibratorio del cuerpo sonoro. De este estudio deduciremos que cada sonido es, por regla general, la superposición de otros varios susceptibles de ser separados, y de aquí una nueva dirección de nuestras investigaciones encaminadas á descomponer y recomponer los sonidos, ó lo que es lo mismo, á hacer el análisis y síntesis de los sonidos compuestos.

Siendo la causa de todo sonido una serie de deformaciones que experimenta un cuerpo elástico, y presentando los sólidos las formas de elasticidad por flexión y torsión, de que carecen los líquidos y gases, estudiaremos separadamente las vibraciones de los cuerpos sólidos, si bien descartando las vibraciones por torsión, que no presentan interés alguno en el actual estado de la ciencia.

VIBRACIONES DE LOS CUERPOS SÓLIDOS.

CAPÍTULO VI.

Vibraciones transversales.

Estudiaremos estas vibraciones, peculiares de los cuerpos sólidos, considerándolos, ya bajo la forma de *cuerdas*, que consisten en hilos ó cilindros flexibles de pequeño diámetro con relación á su longitud, ya la de *varillas* ó barras rígidas, ya por fin bajo la forma de *placas* ó *membranas*, de extensión superficial considerable con relación á su espesor.

Cuerdas.—Son éstas, según queda dicho, cuerpos filiformes y más ó menos flexibles, metálicas en algunos instrumentos, como el piano, ó de sustancias animales, como en la guitarra, violín, etc.; y pueden hacerse vibrar en sentido de su longitud y transversalmente ó en sentido perpendicular á ésta.

Para hacerlas vibrar transversalmente, se fijan por sus dos extremos, ó por uno solo, manteniéndolas tensas en este último caso por medio de un peso, y se puede, ó golpearlas con un macito de madera cubierto de piel, como en los pianos, ó pulsarlas, como se hace en la guitarra, cogiéndolas entre el índice y el pulgar y desviándolas de su posición de equilibrio, ó por último, frotarlas con un arco como en el violín.

Al vibrar las cuerdas, ponen en conmoción una masa tan pequeña de aire, que su sonido no es perceptible sino á

condición de que transmitan sus vibraciones á superficies extensas, como las tablas de armonía de los pianos, ó á cajas de resonancia, como en el arpa, violín, etc. Se comprueba esto suspendiendo de un cordón de seda una cuerda de cuyo extremo penda un peso y pulsándola; con lo cual no se logra percibir sino un sonido muy débil aproximando mucho el oído, mientras resulta aquel muy intenso, si la misma cuerda se fija directamente á una tabla de algunos decímetros cuadrados de extensión, por el extremo mismo que antes se ató al cordón de seda.

Sonómetro.—En física se usa el sonómetro (fig. 16), para estudiar las vibraciones transversales de las cuerdas.

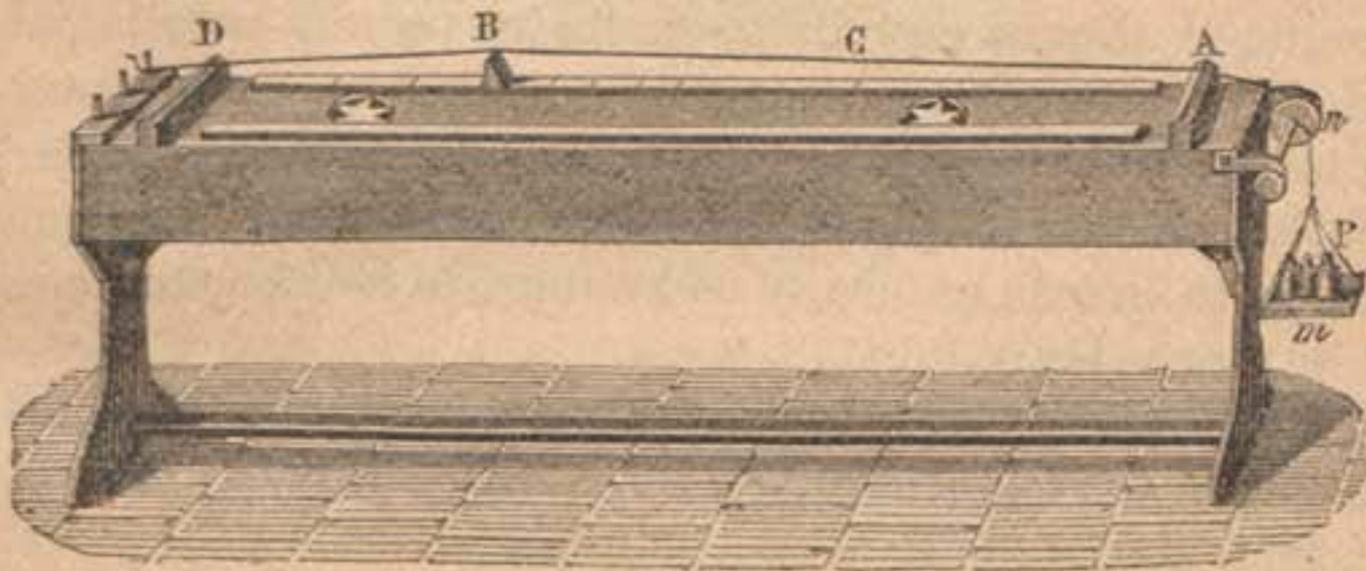


Fig. 16.

Este aparato consiste en una caja de madera de paredes delgadas, sobre la que se fijan tres cuerdas que se sujetan por uno de sus extremos á otros tantos clavos fijos en uno de los extremos de la cara superior de la caja, y por el otro, á unas clavijas que permiten aumentar ó disminuir su tensión, excepto la del centro, que pasa por una polea y se pone tensa por la acción de un peso, como se indica en la figura. Lleva además la caja dos puentes fijos *A* y *D*, de aristas vivas, situados á la distancia de un metro, sobre los que se apoyan todas las cuerdas, que resultan así de esta misma longitud; y un tercer puente movable *B*, permite acortar la que se quiera, dándole una posición inter-

media y apoyando la cuerda contra su arista con el dedo. La longitud de esta cuerda se mide entonces por una escala dividida en centímetros y milímetros que va sobre la misma caja.

Leyes de las vibraciones transversales de las cuerdas.—Si se hace vibrar una cuerda del sonómetro y luego se coloca el puente movable en su mitad y se hace vibrar cada una de las dos porciones en que queda dividida después de aplicarla fuertemente con el dedo sobre su arista, un oído músico reconocerá en la nueva nota la octava de la que producía la cuerda entera; y si se miden por medio de una sirena las vibraciones que á una y otra corresponden, se hallará que son precisamente el doble de las que verificaba aquella las halladas para la cuerda mitad. Si es la tercera, la cuarta ó la quinta parte de la cuerda la que se hace vibrar, el número de vibraciones será 3, 4, 5... veces mayor que el que verifica en el mismo tiempo la cuerda entera, y se ha llegado así á establecer la siguiente ley:

1.^a *El número de vibraciones, para cuerdas que solo difieren por sus longitudes, están en razón inversa de estas mismas.*

Esta ley supone que las cuerdas son de la misma sustancia, de igual diámetro, y que se hallan sometidas á la misma tensión.

Si ponemos en el sonómetro cuerdas de la misma sustancia, tendidas por pesos iguales y de diámetros distintos y medimos el número de vibraciones que en un mismo tiempo ejecutan, hallaremos que decrecen aumentando su diámetro, y son la mitad si el diámetro es doble, y la tercera parte para otro tres veces mayor, y en general, que:

2.^a *El número de vibraciones para cuerdas de la misma naturaleza y de igual longitud, sometidas á tensiones iguales, están en razón inversa de sus diámetros.*

Colocando en el sonómetro cuerdas de la misma longitud y diámetro, sometidas á tensiones iguales, pero de

diferentes sustancias, una de hierro, por ejemplo, y otra de platino, se halla que el número de vibraciones disminuye á medida que aumenta la densidad de la materia de que están formadas, en la relación de las raíces cuadradas de dichas densidades; y por consiguiente, que puede establecerse una nueva ley:

3.^a *El número de vibraciones para cuerdas de igual longitud y diámetro, sometidas á la misma tensión, pero formadas de sustancias diversas, están en razón inversa de las raíces cuadradas de sus densidades.*

La segunda y tercera ley pueden enunciarse en conjunto diciendo:

4.^a *Para igualdad de longitud y tensión, el número de vibraciones de una cuerda está en razón inversa de la raíz cuadrada de su peso.*

En efecto, el peso de una cuerda es igual al producto de su volumen por su densidad, y su volumen es proporcional á su sección, para cuerdas de la misma longitud; pero las secciones son como los cuadrados de sus diámetros; luego el número de vibraciones que está en razón inversa de los diámetros, estará igualmente en razón inversa de la raíz cuadrada de sus secciones ó de sus volúmenes para la misma longitud; y resulta: que estando el número de vibraciones en razón inversa de la raíz cuadrada de su volumen, como consecuencia de la segunda ley, y en razón inversa de la raíz cuadrada de su densidad, en virtud de la tercera, lo estará también en razón inversa de la raíz cuadrada de sus pesos, que son los productos de dichas dos cantidades.

En los pianos y guitarras y otros instrumentos de cuerda, se apela al medio de arrollar un alambre sobre la cuerda para que, aumentando su peso, produzca ésta sonidos más bajos sin necesidad de aumentar considerablemente, ni su longitud, ni su diámetro.

Ultimamente; si colocada una cuerda en el sonómetro la ponemos en tensión por medio de un peso de un kilogramo, y después de medir el número de vibraciones que

ejecuta en un segundo le agregamos pesas, hasta 4, 9, 16, v. gr., el número de vibraciones que en cada caso corresponderá á los nuevos sonidos, será proporcional á la raíz cuadrada de los pesos tensores 2, 3, 4...; por consiguiente:

5.^a *Las vibraciones de las cuerdas, en igualdad de las demás condiciones, son proporcionales á las raíces cuadradas de las tensiones á que se hallan sometidas.*

Las leyes establecidas se deducen igualmente por medio del cálculo, y se traducen en la fórmula

$$N = \frac{1}{2rl} \sqrt{\frac{gP}{\pi d}}$$

en la cual, N representa el número de vibraciones dobles en un segundo; r el radio de la cuerda, l su longitud, g la aceleración de la gravedad, P el peso tensor, π la relación de la circunferencia del diámetro, y d la densidad de la materia de que esté formada la cuerda.

División de las cuerdas en segmentos.—Hemos supuesto, para el estudio de las leyes de las vibraciones de las cuerdas, que éstas no ejecutan más que las de su totalidad; es decir, que de una posición extrema pasa á la opuesta, formándose un *vientre* en su punto medio, y dos *nodos* en los extremos ó puntos de apoyo sobre los caballetes; pero en realidad, el movimiento, y por consiguiente el sonido que las cuerdas producen, no es tan sencillo, dividiéndose éstas en segmentos que vibran independientemente de la totalidad y producen sonidos más altos que acompañan al *fundamental*, que así se designa al que resulta de la vibración de la cuerda entera; llamándose *armónicos* á los que producen las vibraciones de los segmentos en que se divide aquélla.

Es sumamente fácil el provocar estas divisiones en las cuerdas; basta para ello apoyar la cuerda sobre el caballete movable situado á una distancia de uno de los fijos que represente la parte alícuota que se quiera que comprenda cada segmento. Así, apoyando la cuerda en su

punto medio y pulsando una de las dos mitades, entra la otra en vibración, y resulta dividida en dos segmentos vibrantes. Si se apoya, ó simplemente se toca, con el dedo ó con las barbas de una pluma en el tercio de la longitud de la cuerda, y se pulsa ó se frota con un arco en el punto medio del segmento menor, se divide el mayor espontáneamente en otros dos iguales, resultando la totalidad dividida en tres partes, formándose tres vientres separados por dos nodos. Si se toca en la cuarta, la quinta... parte de su longitud, resulta la cuerda dividida en 4, 5, 6... segmentos; y para comprobar la existencia de los nodos en los puntos correspondientes á las divisiones dichas, se colocan en cada caso tantas tiritas de papel doblado sobre la cuerda, cuantos sean los nodos que deban formarse y en los puntos mismos de división, y entre cada dos de éstos, otra tirita, que puede ser de papel de color. Tocando luego con el arco el segmento separado de la cuerda, son lanzados los papeles de color que ocupan el lugar de cada vientre, y permanecen á caballo los de los nodos, aunque agitados por un movimiento de trepidación suave.

Sonidos armónicos de las cuerdas.—Queda indicado que la división de las cuerdas en segmentos vibrantes es un hecho general que tiene lugar aunque no se provoque por los medios expuestos en el párrafo anterior, y que al sonido fundamental, que procede de las vibraciones de la totalidad de la cuerda, acompañan siempre los llamados armónicos, resultado de las vibraciones de dichos segmentos; faltando tan solo determinar cuáles sean éstos, y por qué medios se comprueba su existencia.

Ante todo, haremos notar que el punto de la cuerda en que ésta se pulsa, golpea ó frota con el arco, tiene una gran importancia respecto á los sonidos armónicos que se producen.

En efecto; pulsando una cuerda en su punto medio, no hay posibilidad de que se divida ésta en dos segmentos vibrantes, puesto que esto exigiría la formación de

un nodo en el punto mismo en que la excitación es mayor; y del mismo modo haremos imposible, á nuestra voluntad, la división de la cuerda en 3, 4, 5... n , segmentos, pulsándola ó excitándola á $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$... $\frac{1}{n}$ de su longitud.

Un oído músico convenientemente educado, puede percibir, sin más que prestar atención, los sonidos armónicos que acompañan al sonido fundamental, á veces de gran intensidad; pero en defecto de esta disposición del oído, se le puede auxiliar, ya disminuyendo, ya apagando por completo el sonido fundamental. Supongamos que se excita una cuerda en su tercio, y que se toca ligeramente con las barbas de una pluma en su mitad. El sonido fundamental disminuirá en intensidad, puesto que disminuirán en amplitud las oscilaciones de la totalidad de la cuerda, y aún podrán llegar á anularse, mientras que el sonido que resulta de la división de la cuerda en dos partes iguales, si existe, no sufrirá ninguna alteración, debido á que el punto tocado ha de ser un nodo, es decir, un punto fijo; y así sucede, en efecto, oyéndose con toda claridad la octava del sonido que se percibía antes de apagar el fundamental que, como más intenso, no dejaba oír con distinción este otro, á la manera que la intensidad de la luz del sol impide ver las estrellas durante el día y aparecen éstas en los eclipses. Si en vez de excitar la cuerda en el tercio de su longitud lo hacemos en su punto medio y apagamos el fundamental como antes, esta vez seguirá el silencio completo, pues hemos empezado por hacer un vientre del punto medio, y no cabe ninguna división de la cuerda en un número par de segmentos, que exigiría la formación de un nodo en dicho punto; pero podremos repetir el experimento apagando en el tercio de su longitud, y obtendremos la segunda armónica, ó sea una nota que, como producida por las vibraciones de cada una de las porciones que resultan de dividirse la cuerda en tres segmentos iguales, corresponde á un número de vibraciones tres veces mayor que la fundamental. De igual

modo obtendríamos notas correspondientes á las vibraciones de segmentos iguales á $\frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6} \dots \frac{1}{n}$ de la cuerda, apagando el sonido fundamental á estas respectivas distancias, si no se ha excitado aquélla en alguno de los puntos que para cada división deba ser un nodo.

Esto prueba de un modo evidente que, como habíamos asegurado al principio, el sonido de las cuerdas es complejo y está compuesto del fundamental, acompañado de un número indeterminado de armónicos más ó menos intensos, según la manera de poner en vibración la cuerda. De éstos podemos eliminar una serie determinada, como por ejemplo, la primera armónica y sus múltiplos, excitando la cuerda en su punto medio; la segunda, y todas las que comparadas con la fundamental correspondan á un número de vibraciones múltiplo de tres, excitándola en su tercio, y así sucesivamente.

Los sonidos armónicos producen con el fundamental una impresión tanto más agradable, cuanto son más bajos; así es que, por faltar la octava, es hueco y sin expresión el sonido que resulta de una cuerda que se pulsa en su punto medio; y los fabricantes de pianos disponen los mazos de manera que golpeen las cuerdas en la séptima ó la novena parte de su longitud, para eliminar el séptimo ó noveno armónico, que se funde mal con el sonido fundamental. Por producir armónicos muy altos y de gran intensidad, se excluyen las placas como elemento de los instrumentos de música.

Timbre.—Del conjunto de sonidos armónicos, resulta una impresión más ó menos agradable y característica que varía de un cuerpo á otro aunque produzcan una misma nota fundamental, y aun para un mismo cuerpo, según el modo especial de ponerlo en vibración; y esto es precisamente lo que constituye el *timbre*, en un todo comparable al matiz ó color de la luz, que también resulta, como se demuestra en óptica, de la superposición de varias vibraciones ó radiaciones más ó menos rápidas, co-

rrespondientes á los diversos colores; variando el tono ó color resultante, según la clase y la intensidad de las radiaciones simples que lo forman. Esta analogía es tan grande, que los físicos alemanes, y Mr. Helmholtz en particular, denominan al timbre *color del sonido*.

Hasta hace muy pocos años se consideraba el timbre como una propiedad misteriosa y característica de cada cuerpo, que solo el oído podía apreciar en su conjunto, y á Mr. Helmholtz se debe, casi exclusivamente, el perfecto conocimiento de las causas que lo producen, que, lejos de ser peculiares de las cuerdas, son, por el contrario, un hecho general en todos los cuerpos sonoros, pues es muy difícil hallar sonidos simples, fuera de los producidos por los diapasones montados en sus cajas de resonancia y en los tubos de órgano, constituyendo casos verdaderamente excepcionales. La confirmación completa de esta teoría resultará del estudio que más adelante haremos del análisis y síntesis de los sonidos.

Vibraciones transversales de las varillas.—

Las varillas pueden vibrar transversalmente como las cuerdas, pero en estas, no es una tensión más ó menos grande representada siempre por una causa exterior al cuerpo, como sucede en las cuerdas, la que determina las oscilaciones alrededor de su posición de equilibrio cuando de un modo cualquiera se hace que se separen de ella, sino su fuerza elástica, en general, muy superior á las tensiones dichas; y si á esta circunstancia se agrega la de que las varillas pueden someterse al movimiento vibratorio sujetándolas por ambos extremos, ó por uno solo, quedando el otro libre, ó bien teniendo libres los dos extremos, fácilmente comprenderemos que las leyes han de ser distintas de las halladas para las cuerdas. Las vibraciones transversales de las varillas presentan para nosotros muy escaso interés, por lo que sólo enunciaremos las leyes más importantes, pudiendo desde luego dejar sentada como ley general, aplicable á todos los casos, que:

El número de vibraciones que ejecuta una varilla, es proporcional á su espesor é independiente de su ancho.

Cuando las varillas están fijas por sus dos extremos, pueden vibrar en su totalidad ó dividirse en segmentos, como las cuerdas, correspondiendo la nota más baja, ó sea su sonido fundamental, á la vibración de la totalidad, en cuyo caso se forma un solo vientre comprendido entre los nodos de los extremos. Si la varilla se divide en 2, 3, 4... segmentos vibrantes, el número de vibraciones no está en razón inversa de sus longitudes respectivas, como en las cuerdas, sino que son entre sí como los cuadrados de la serie natural de los números impares 3, 5, 7, 9... $2n - 1$; es decir, que si representamos por 100 el número de vibraciones que corresponden á la nota fundamental de una varilla, su mitad ejecutará $100 \times \frac{5^2}{3^2}$, y su tercera parte $100 \times \frac{7^2}{3^2}$... etc.

Cuando las varillas están fijas por uno de sus extremos y libres por el otro, y vibran sin dividirse en segmentos, el número de vibraciones está en razón inversa del cuadrado de su longitud. Estas varillas son las que se emplean en las cajas de música, y su espesor y longitud se calculan fácilmente con arreglo á las leyes dichas, conocida que sea la nota que cada una ha de producir cuando llegue el momento de ponerse en vibración por efecto de las puntas de que va armado el cilindro de la caja.

Por último, las varillas que entran en vibración teniendo libres sus dos extremos, producen su sonido fundamental cuando se forman dos nodos, distantes cada uno de ellos de los extremos de la varilla la cuarta parte de la distancia comprendida entre los mismos. Con varillas ó placas estrechas de vidrio y dos cordones que se fijan en los dos nodos que á cada una corresponden para producir su sonido fundamental, se construye el instrumento de música que se llama armónica, en el que las placas se ponen en vibración golpeándolas con un mazo ó esferi-

lla de corcho sujeta al extremo de una barrita de madera.

Diapasón.—Si se toma una barra recta y se la hace vibrar teniendo libres sus dos extremos, de modo que dé la nota fundamental, y se marca la posición de los nodos, y hecho esto se va encorvando poco á poco, se observará que los nodos se van separando de los extremos á medida que aumenta la curvatura, pero sin que lleguen á confundirse; y que al mismo tiempo, el sonido fundamental de la barra se hace mas bajo. Encorvada la barra hasta que sus



Fig. 17.

dos ramas sean paralelas ó ligeramente convergentes y sostenida por un pie que nace de la parte media del vientre inferior, constituye lo que se llama un *diapasón* (figura 17) y es muy usada en música para dar el tono á los demás instrumentos, tanto por su fijeza, cuanto por la pureza y duración del sonido que produce; pues si bien es cierto que empieza por producir sonidos armónicos muy elevados, en cambio se extinguen muy pronto. Se le pone en vibración, bien haciendo pasar entre sus dos ramas un cilindro duro de diámetro algo mayor que la distancia entre las mismas, bien frotando una de sus ramas con un arco de violín, ó golpeándolo sobre un cuerpo duro; y para aumentar la intensidad del sonido, se le apoya sobre una tabla ó se monta sobre una caja de resonancia, como está indicado en la figura.

Vibraciones de las placas.—Las placas pueden vibrar á la manera que las varillas, de las que solo se diferencian por su ancho con relación al espesor, que es pequeño; pero como no hay razón para que las vibraciones se ejecuten en una sola dirección, resultan vibraciones

simultáneas en sentidos perpendiculares, que obligan á la placa á dividirse en porciones llamadas *concameraciones*, separadas por líneas de reposo ó nodales, que Chladni halló la manera de determinar con exactitud y del modo más sencillo que pueda imaginarse. Basta para ello extender sobre la placa una pequeña capa de arena fina ó polvos de salvadera y hacerla vibrar por medio de un arco, teniéndola sujeta, bien por su centro á un pie, ó bien por sus bordes, cogiéndola en un tornillo como el que usan los herreros para sujetar las piezas que trabajan, é instantáneamente se ve replegarse la arena, rechazada por las porciones vibrantes, formando líneas rectas ó curvas, correspondientes á los puntos en reposo ó nodos, y un dibujo, siempre regular, y más ó menos complicado, según el modo como se haya excitado la placa.

En las placas rectangulares ó cuadradas, se forman dos sistemas de líneas nodales rectas, paralelas á los lados unas, y según las diagonales las otras, pero se forman además otras nodales curvas de formas muy complicadas. Si las placas son circulares, hay formación de nodales en sentido de los radios, y otras circulares. En todos los casos, las concameraciones contiguas vibran en sentidos contrarios, es decir, que suben los puntos de una mientras bajan los de otra, é inversamente, siendo por tanto necesario que el número de concameraciones sea siempre par.

La nota fundamental de una placa cuadrada corresponde á la división de la misma en cuatro cuadrados por dos líneas nodales paralelas á sus lados, y por dos diámetros perpendiculares, si es circular.

Una misma placa puede dar sonidos que varían al infinito, según la manera como se la excite, correspondiendo siempre á un mismo dibujo de sus líneas nodales una misma nota; pero la inversa no es cierta, pudiendo dar una placa la misma nota dividiéndose en distintas concameraciones en cada caso.

Dos placas de figuras semejantes que se dividan del mismo modo, ejecutan vibraciones cuyo número es pro-

porcional á su espesor, y está en razón inversa de su superficie.

La figura 18 representa los modos de división más sencillos de una placa cuadrada sujeta por su centro. La primera se obtiene tocando con la uña el punto medio de uno de los lados, y frotando con el arco un punto próximo á un vértice. La segunda, tocando un ángulo y excitando en el punto medio de uno de los lados; y la tercera, tocando dos puntos *a* y *b* con el índice y el pulgar, y excitando en el punto medio del lado opuesto.



Fig. 18.

Los timbres y campanas pueden considerarse como placas, y sus vibraciones siguen las mismas leyes, correspondiendo su sonido fundamental á la división en cuatro segmentos iguales separados por dos líneas nodales perpendiculares.

Vibraciones de las membranas.—Las membranas, formadas por cuerpos flexibles como las pieles, papel, etc., sujetos á un marco de metal ó de madera, y á las que puede dárseles tensiones variables, como en los tambores, pueden entrar en vibración golpeándolas como en éstos, ó por influencia de un cuerpo sonoro, como queda dicho al hablar del fonautógrafo. Su modo de vibrar es en un todo comparable con el de las placas, y como en ellas puede estudiarse su división en concameraciones vibrantes, echando sobre la membrana una capa de arena fina, dando lugar á la formación de líneas nodales muy complicadas en general. Su sonido fundamental varía con

la tensión, y son susceptibles de vibrar al unísono de un cuerpo cualquiera, con tal de que su sonido no difiera mucho del fundamental de la membrana en aquel momento, y como éste puede variar dentro de límites muy extensos, puede asegurarse que una misma membrana es susceptible de vibrar al unísono de un cuerpo cualquiera, como sucede prácticamente con la membrana del oído llamada tímpano.

CAPÍTULO VII.

Vibraciones longitudinales.

Vibraciones longitudinales de las cuerdas.— Las cuerdas y las varillas pueden vibrar longitudinalmente, es decir, que se puede provocar en ellas una serie de compresiones y dilataciones en el sentido de su longitud, verdaderas ondas sonoras que, comunicando al aire una parte de su fuerza viva bajo la misma forma de movimiento ondulatorio, produzcan en nosotros la sensación de sonido. Basta para ello frotarlas en sentido de su longitud con un paño ó pedazo de cuero espolvoreado con colofonia. Supongamos que se excita una cuerda del sonómetro como se acaba de decir, y que ésta produce su nota fundamental, ó sea la más baja posible para este modo particular de entrar en vibración, que corresponde al caso en que no se forma nodo alguno entre los dos extremos de la cuerda. Las compresiones que nazcan en uno de dichos extremos se propagarán hasta encontrar al otro, en donde se reflejarán para volver al primero y así sucesivamente, dependiendo de la longitud de la cuerda el mayor ó menor tiempo que tarde en verificarse el fenómeno, que no será otra cosa que una onda sonora, divisible en dos semi-ondas, condensada y dilatada. La onda condensada ó comprimida, corresponde al movimiento direc-

to del primero al segundo de sus extremos, y la dilatada, al reflejado, y ambas constituyen una vibración completa de la cuerda, de donde se deduce la siguiente ley:

1.^a *El número de vibraciones es inversamente proporcional á la longitud de las cuerdas, é independiente del diámetro de las mismas.*

Se comprueba experimentalmente esta ley, fijando el punto medio, el tercio, etc., de la cuerda, por medio del caballete movable, y contando el número de vibraciones correspondientes á las notas que en cada caso se producen, por medio de la sirena.

Como aquí determina el movimiento vibratorio la fuerza elástica de la cuerda y no la mayor ó menor tensión á que se la someta, una misma cuerda produce siempre la misma nota cualquiera que sea su tensión, y por consiguiente, podemos dejar sentado que:

2.^a *El número de vibraciones es independiente de la tensión de las cuerdas.*

Cuando se fija un punto de una cuerda, como su medio, tercio, cuarto, etc., y se pone en vibración el segmento menor, entra igualmente en vibración la parte mayor y se divide espontáneamente en segmentos vibrantes separados por nodos, á la manera que se verifica en las vibraciones transversales; y como en aquéllas, el número de vibraciones de la serie de los sonidos armónicos son entre sí, como la de los números naturales 1, 2, 3, 4...

Vibraciones de las varillas.—Las varillas pueden, como las cuerdas, estar sujetas por sus dos extremos; pero pueden además sujetarse por uno solo, quedando el otro libre, ó bien estarlo los dos, fijándolas por un punto intermedio. En el primer caso, siguen absolutamente las mismas leyes indicadas para las cuerdas, y solo nos resta ocuparnos de los otros dos.

Varillas libres por un extremo.—Cuando se fija una varilla por uno de sus extremos y se frota en sentido de su longitud, puede entrar en vibración en su totalidad sin formación de nodos entre el extremo libre y el punto

fijo, y produce entonces su nota fundamental, cuyo número de vibraciones dependerá, como en las cuerdas, de la velocidad de propagación de las ondas en el cuerpo de que esté formada, y de la longitud de la varilla, siendo independiente de su sección.

Para explicarnos el movimiento vibratorio de estas varillas, consideremos una serie de esferas de marfil iguales (fig. 19) en contacto y atadas una á otra, de modo que no puedan separarse, y la última, invariablemente unida á un muro resistente *B*. Si suponemos que la primera *A*, separada de su posición por un momento, viene á chocar con la segunda, se transmitirá el choque, como sabemos, de unas en otras, hasta llegar á la última en la dirección

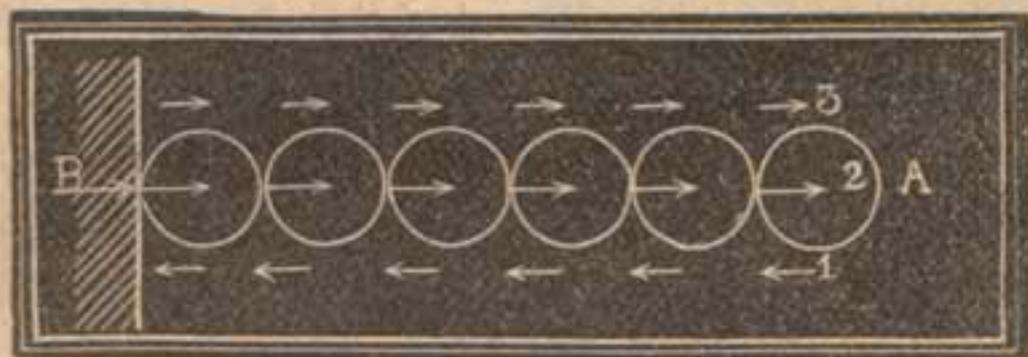


Fig. 19.

indicada por las flechas de la parte inferior del grabado (número 1). Transmitido el movimiento al muro, devolverá éste una reacción igual y contraria, y se reflejará el movimiento incidente de *B* hacia *A*, es decir, en sentido opuesto, ó como se dice, *con signo contrario*, según se indica con las flechas del centro (núm. 2). Cuando llegue á *A*, tenderá esta esfera á separarse de la anterior con una velocidad igual á la que tenía en el momento del choque, y así lo haría si estuviera libre; pero no pudiéndolo verificar, tenderá á arrastrar en su movimiento á la segunda, ésta á la tercera... y así sucesivamente, reflejándose ahora el movimiento incidente de dirección *B A*, en esta misma dirección, según se indica en la tercera fila de flechas (núm. 3), determinándose en *A una reflexión sin cambio de signo*. Llegado el movimiento reflejado á *B*, devolverá el muro una

reacción igual y contraria, ó sea en la dirección $A B$, volviendo á cambiar de signo con esta nueva reflexión, y así sucesivamente; resultando siempre una reflexión con cambio de signo en el movimiento, cuando éste tenga lugar contra un cuerpo resistente, y una reflexión sin cambio de signo, cuando el movimiento se refleje en un extremo libre ó contra un medio menos resistente.

De lo dicho se infiere que, para que una comprensión se transforme en dilatación, ó al contrario, se necesita, en una varilla libre por un extremo, doble tiempo del que para lo mismo exige otra de igual longitud y sujeta por sus dos extremos, pues el movimiento necesita recorrer dos veces la primera para cambiar de signo, mientras que no la recorre más que una sola vez para producirse igual cambio en la segunda. El número de vibraciones que ejecute una varilla libre por un extremo será, pues, la mitad de las que ejecutaría si tuviera fijos los dos, é igual al que ejecutaría una varilla de doble longitud en estas condiciones.

Estas varillas pueden producir otras notas ó sonidos armónicos, que dependen de otros tantos modos de división, formándose uno, dos ó más nodos entre sus extremos. La formación de un nodo corresponde á la primera armónica, y se halla éste situado á la tercera parte de su longitud, á contar del extremo libre. Si son dos los nodos, se forma el primero á la quinta parte de su longitud, á contar desde el mismo extremo, y el otro divide el resto en dos partes iguales. Si tres, se forma el primero á la séptima parte de la longitud de la varilla, y los otros dos dividen los $\frac{6}{7}$ restantes en tres partes iguales; y así sucesivamente, siendo la porción próxima al extremo libre $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{11}$, $\frac{1}{13}$... de la longitud total, ó sea una fracción de la misma, representada por la unidad dividida por la serie de los números impares, y siempre la mitad de la distancia comprendida entre dos nodos consecutivos.

La figura 20 representa los tres primeros modos de división de una varilla; 1 y 2, corresponden á la nota fundamental, en la que el punto fijo es un nodo y el extremo libre corresponde á un vientre, y las flechas indican las dos fases de propagación de la compresión en sentidos contrarios; 3 y 4, el caso en que se forma un solo nodo *a*, al que vienen á concurrir las dos compresiones, como en 3, ó del que parten á la vez, como en 4, lo que produce en este punto un cambio de densidad de la materia en cada fase del movimiento; pero las moléculas de la sección correspondiente no se mueven, mientras que para los demás puntos sucede todo lo contrario, siendo invariable la densidad del medio en los vientres, y ejecutando movimientos de vaivén tanto más extensos cuanto más distan de los nodos.



Fig. 20.

El período de vibración está evidentemente sujeto al tiempo necesario para que se verifique en la porción comprendida entre el extremo libre y el primer nodo, y como estas porciones son proporcionales á los números $1, \frac{1}{3}, \frac{1}{5}, \frac{1}{7} \dots$ y el tiempo necesario para que una vibración recorra dichas porciones, proporcional á la longitud de las mismas, el número de vibraciones ejecutadas en un segundo será como los números impares 1, 3, 5, 7..., denominadores de las fracciones respectivas. Luego:

El número de vibraciones de los sonidos armónicos de una varilla libre por uno de sus extremos, son entre sí como la serie natural de los números impares.

Varillas libres por sus dos extremos.—Si se fija

una varilla por su punto medio y se frota una de las dos partes con un pedazo de cuero con colofonia, entra en vibración, no sólo la mitad excitada, sino que también la otra, formándose un nodo en el punto medio. La nota que en este caso produce es la fundamental, y es igual á la que produce una varilla de longitud mitad y libre por uno solo de sus extremos, lo que fácilmente nos explicaremos observando que cada mitad vibra independientemente de la otra y en las mismas condiciones que aquélla.

Los otros modos de dividirse una barra libre por los dos extremos, corresponden: 1.º, á la formación de dos nodos, situados á igual distancia de su punto medio que de cada uno de los extremos, distando de éstos, por consiguiente, la cuarta parte de la longitud, y ejecutando una vibración en la mitad del tiempo que en el caso de producirse la nota fundamental en el que el segmento era la mitad de la barra; 2.º, á la formación de tres nodos, de los que uno ocupa el punto medio y los otros dos distan de los extremos la sexta parte de la longitud total de la barra, produciéndose la vibración en la tercera parte del tiempo que para la nota fundamental; 3.º, á la formación de cuatro nodos, de los que, los próximos á los extremos,



Fig. 21.

distan de estos la octava parte de la longitud total de la barra; y en general, á la formación de un número n de nodos, aumentando de uno en uno y distando de los extremos, los más próximos, de $\frac{1}{2n}$ de la longitud de la barra, y ejecutando una vibración en un tiempo representado por la fracción $\frac{1}{n}$ del tiempo empleado

en verificar una vibración de su nota fundamental.

La figura 21 representa los tres primeros nodos de división de una barra libre por sus dos extremos, y las flechas el sentido de la onda en cada segmento.

De estos hechos resulta, que *el número de vibraciones de la serie de los sonidos armónicos de una barra libre por sus dos extremos, son entre sí, como la serie natural de los números 1, 2, 3, 4... n, ó como 2, 4, 6, 8... 2n, que es la serie natural de los números pares; para enunciar esta ley en oposición á la establecida para las varillas libres por uno solo de sus extremos.*

CAPÍTULO VIII.

Vibraciones de los fluidos.

Vibraciones longitudinales de una columna gaseosa.—Los líquidos y los gases pueden, bajo la forma de columnas prismáticas ó cilíndricas, entrar en vibración á la manera que las varillas de que venimos hablando, sin que el cambio de estado del cuerpo vibrante suponga alteración en las leyes establecidas; y entre las diversas maneras de provocar las vibraciones en una columna gaseosa, elegiremos, por ahora, para facilitar su estudio, la de excitarla por medio de un diapasón.

Tubos cerrados por un extremo.—Supongamos que, después de haber excitado un diapasón con un arco y cogerlo por su pie, se coloca sobre una probeta, como se indica en la fig. 22. Es lo más probable que, el sonido apenas perceptible del diapasón, no gane en intensidad ab

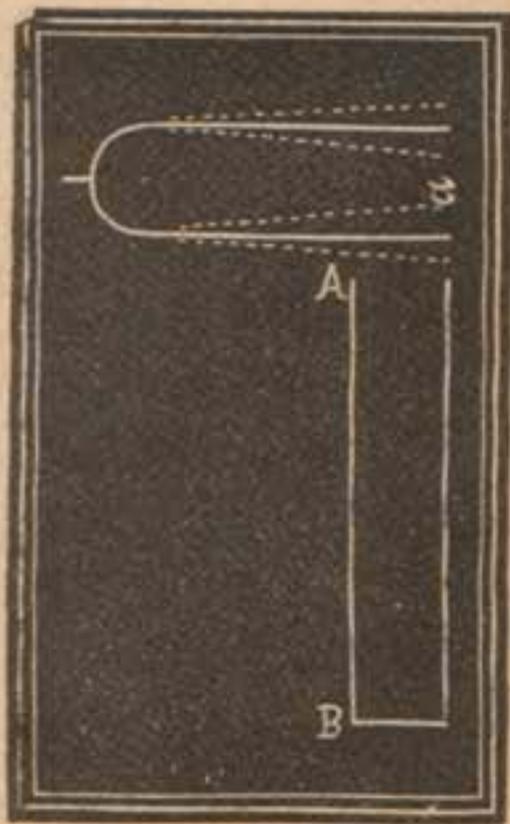


Fig. 22.

solamente nada; pero si echamos agua poco á poco en la probeta, siendo ésta suficientemente alta, llegará un momento en que el sonido, reforzado cada vez más por las vibraciones del aire contenido en ella, llegue á adquirir toda la plenitud que pudiera alcanzar apoyando aquél sobre una tabla ó una caja sonora. Si entonces continuamos echando agua, decrecerá nuevamente la intensidad del sonido hasta no oirse, como al empezar el experimento. Si se repite éste con varios diapasones, todo sucederá lo mismo que en el primero, sin más diferencia que la distinta altura de la columna de aire que para cada uno produce el refuerzo del sonido, siempre igual para cada uno en particular. Tratemos de explicar este hecho.

Sean a y b las dos posiciones extremas de la rama del diapason en cada vibración. Cuando de la posición a pase á la opuesta b , producirá una compresión en el aire que hay inmediatamente debajo, que se transmitirá al contenido en el vaso AB , y que reflejada sobre el fondo y con signo contrario, volverá á encontrar á la rama del diapason en un período de su movimiento que supondremos sea el momento en que, hallándose en b , empiece su vuelta hacia a . En este mismo instante empieza á producirse, por el retroceso de la rama, una rarefacción del aire que, durando tanto como duró la compresión, se transmitirá hasta el fondo B y se reflejará en él, llegando á A en el momento mismo en que la rama se prepare á verificar de nuevo su oscilación de a á b , para repetir los mismos hechos y en el mismo orden mientras duren las oscilaciones. Todo lo cual significa que hay concordancia perfecta entre los movimientos de compresión y dilatación de la columna de aire y los que ejecuta la rama del diapason. En efecto: si la compresión producida por la vibración sencilla de la rama, ó sea su paso de a á b , se ha propagado durante el tiempo empleado en verificar ésta, hasta el fondo del vaso y desde éste, por reflexión, hasta b , llegando á este punto en el momento en que empieza el retroceso, continuará pasando por el mismo punto durante un tiempo igual,

que es precisamente el que la rama empleará en volver á a . En este momento llega, reflejada por el fondo, la dilatación, ó sea un movimiento de las moléculas del aire de arriba hacia abajo, en un todo conforme con el de la rama del diapasón, que persistirá mientras ésta llegue á b . Hay, pues, en efecto, completa armonía entre los movimientos del diapasón y los del aire que contiene el vasc, por ser iguales y verificarse en los mismos tiempos, ó como se dice también, por ser movimientos *sincrónicos*; sincronismo que se traduce por una mayor amplitud en las vibraciones del aire, y como consecuencia, mayor intensidad del sonido. Para explicarnos la mayor amplitud de las oscilaciones de las moléculas de la columna de aire contenido en la probeta, por efecto de la concordancia entre sus movimientos y los del diapasón, consideremos una persona en un columpio y otras dos encargadas de darle impulso; si cada una de ellas lo hace al llegar el que se columpia al final de su carrera, bastará un pequeño empuje para que tome vuelo y verifique oscilaciones cada vez más amplias; pero si los empujes no guardan ritmo alguno, ó éste no se arregla al movimiento adquirido, cada nuevo impulso aplicado al columpio, obrando en sentido opuesto á su movimiento actual, destruirá en parte el que ya tiene, y sus oscilaciones se irán reduciendo en extensión en virtud de los mismos. Esto es lo que sucede en el caso de ser la columna de aire, ó más corta ó más larga de lo necesario para cada diapasón; y sólo nos resta, para conocer á fondo el fenómeno, determinar la longitud de la misma, necesaria para producir el refuerzo del sonido.

Esta determinación se hace fácilmente. Supongamos que se trata de un diapasón que ejecuta 256 vibraciones dobles en un segundo; la longitud de su onda sonora, ó lo que es lo mismo, la distancia á que se propaga el sonido en el tiempo en que se verifica una vibración doble, será igual á la velocidad del sonido en el aire, 340 m., dividida por el número de vibraciones, 256 (pág. 26), ó $1^m,32$

próximamente; y el camino recorrido por el sonido durante una vibración sencilla $0^m,66$. Si el vaso tiene $0^m,33$ de altura, el sonido tendrá el tiempo necesario para propagarse hasta el fondo y desde éste hasta el diapasón, mientras su rama va de a á b , y se cumplirán las condiciones apetecidas. Luego *habrá refuerzo del sonido, ó resonancia, siempre que la columna de aire tenga una longitud igual á la cuarta parte de la onda sonora.*

Inversamente, si nos dan la longitud de una columna gaseosa y se quiere averiguar qué número de vibraciones debe ejecutar el diapasón reforzado por ella, bastará multiplicar por 4 para tener la longitud de la onda, y dividiendo la velocidad del sonido por ésta, obtendremos por cociente el número de vibraciones dobles del diapasón de que se trata.

Una misma columna de aire puede reforzar el sonido de varios diapasones si el número de vibraciones de éstos son 3, 5, 7... $2n - 1$ veces las del primero, ó sea las del que tiene por longitud de onda, el cuádruplo de la altura del vaso. Esto nos dice que la columna gaseosa puede afectar varios modos de vibración, y que la serie de sus sonidos armónicos sigue la ley de los números impares, como las varillas libres por un extremo.

Tubos abiertos por sus dos extremos.—Si en vez de un vaso empleamos un tubo abierto por sus dos extremos, conseguiremos los mismos resultados de resonancia, á condición de que la longitud del tubo sea igual á la mitad de la onda sonora, ó sea *el doble de la longitud del tubo cerrado que produce el mismo sonido*; y una misma columna gaseosa puede resonar, ó entrar en vibración sincrónica, con una serie de diapasones cuyo número de vibraciones estén en la relación de los números 2, 4, 6... $2n$, ó lo que es lo mismo, que *la serie de los sonidos armónicos de un tubo abierto sigue la ley de los números pares*, á la manera que las varillas libres por sus dos extremos.

En estos tubos, como en los cerrados, *el número de vibraciones está en razón inversa de su longitud.*

Tubos de órgano.—Son éstos tubos prismáticos ó cilíndricos, de paredes bastante gruesas para no doblarse bajo la acción del movimiento vibratorio del aire que contienen, y de sección bastante pequeña para que la columna gaseosa no pueda subdividirse en dos ó más en el sentido de su longitud, pudiendo vibrar independientemente

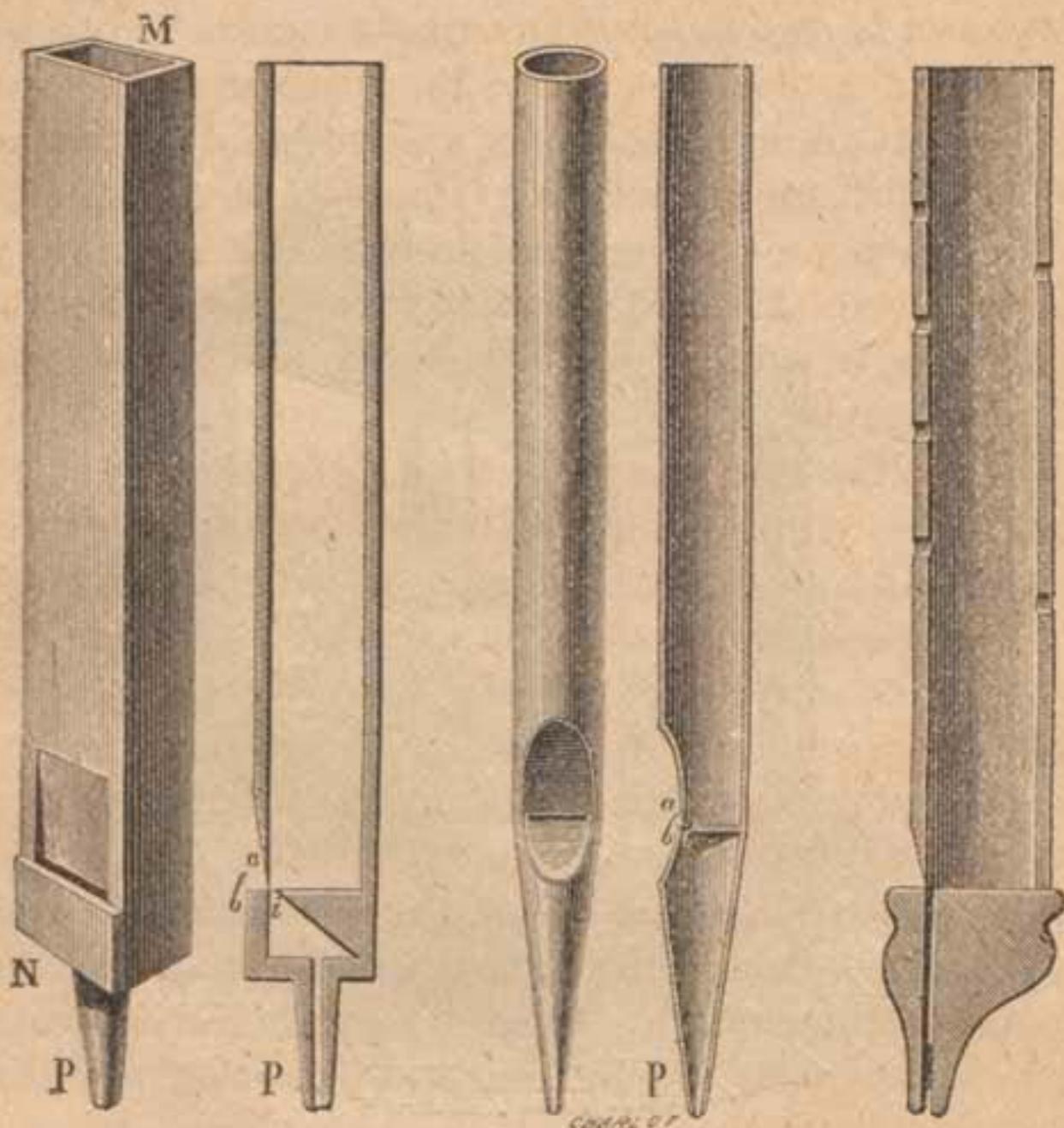


Fig. 23.

las unas de las otras; y en ellos, se provoca la vibración del aire, soplando por medio de embocaduras de flauta ó de lengüeta.

La naturaleza de las paredes, si son suficientemente gruesas, así como la forma del tubo, recto ó curvo, y de la embocadura que se emplee, no influyen sobre la altura

del sonido que producen, pero sí sobre su timbre; y cuanto se diga de los tubos de órgano es aplicable á los instrumentos de viento.

Tubos de boca.—Estos tubos (fig. 23) tienen la embocadura de flauta ordinaria. Se montan sobre un fuelle (figura 24), introduciendo el tubo *P* en que terminan (*pie*) en un agujero practicado en la tabla superior de la cáma-

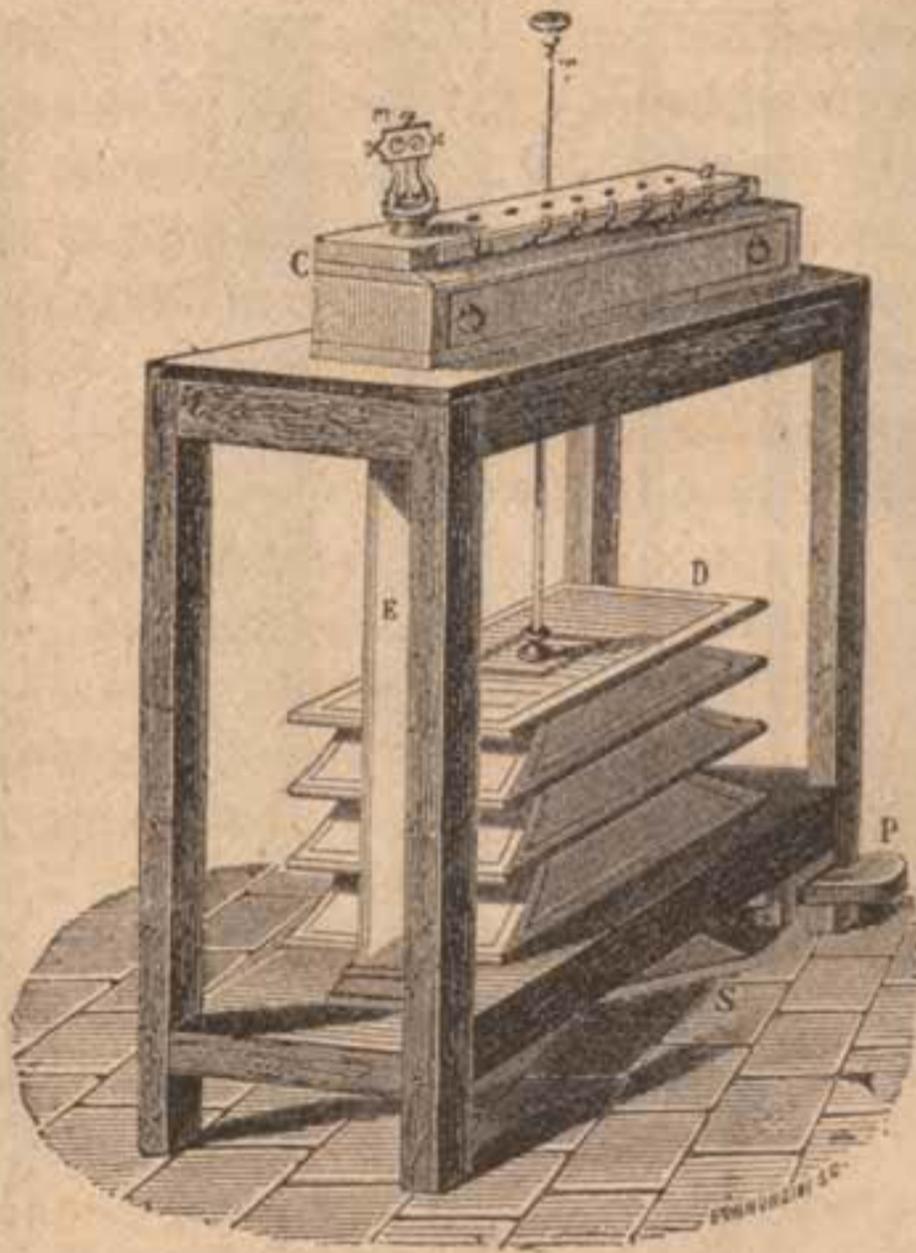


Fig. 24.

ra de aire, y se puede, por medio de una válvula, que se abre ó cierra por el movimiento de una tecla, hacer que salga el aire por la hendidura *i* llamada *luz*, y venga á chocar contra el *labio superior a* cortado en bisel. Este choque produce un ruido, verdadera confusión de sonidos de muy corta duración, entre los que cada tubo refuerza el que conviene al período de vibración que le es propio; y una

vez iniciado el movimiento vibratorio de la columna del tubo, obra ésta sobre el aire que sale por la luz y determina intermitencias que corresponden á las ondas dilatadas y condensadas de la misma, produciéndose el mismo efecto que en el caso del diapasón; hasta el punto de que el tubo produce la misma nota, soplando ó aproximando á su boca un diapasón cuya onda sea cuatro, ó dos veces la longitud del tubo, según que éste sea cerrado ó abierto por su parte superior.

Tubos de lengüeta.—En éstos se producen las intermitencias en la salida del aire por medio de una lengüeta ó lámina elástica que cierra el orificio de salida, y puede ser batiente ó libre; batiente, si la lámina es mayor que una canal que cubre, aplicándose sobre la cara plana de la pieza en que está practicada, que se llama *canilla*; y libre, si es algo menor que el orificio de salida, y oscila libremente hacia uno y otro lado sin tocar á los bordes. La figura 25 representa dos tubos: de lengüeta libre uno y otro batiente. El tubo *N* que lleva el pie, y por el cual llega el aire del fuelle, se llama portaviento; la pieza *a*, generalmente semicilíndrica, es la *canilla*, en la que va practicada la hendidura rectangular cubierta por la lengüeta *l*. Las vibraciones de ésta dependen en parte de su elasticidad, y para que puedan acomodarse á las del tubo, lleva un alambre *b*, que, bajando ó subiendo, sólo deja vibrar su parte inferior, lo que equivale á hacerla más ó menos larga. Las vibraciones de la lengüeta se acomodan dentro de ciertos límites á las del tubo, pero pasados éstos, el tubo no suena, y sólo se oye el sonido que corresponde á las vibraciones de la lengüeta.

Los tubos de órgano pueden ser abiertos por su extremo opuesto á la boca, ó cerrados, y se hallan sujetos á cuanto hemos dicho anteriormente acerca de unos y otros, que puede resumirse del modo siguiente:

- 1.º *El número de vibraciones está en razón inversa de la longitud de los tubos, sean abiertos ó cerrados.*
- 2.º *Un tubo cerrado y otro abierto de doble longitud que*

el primero, producen la misma nota ó sonido fundamental.

3.º Los sonidos armónicos de un tubo abierto son entre si como la serie de los números naturales, ó como la de los números pares.

4.º Los sonidos armónicos de un tubo cerrado son entre si como la serie natural de los números impares.

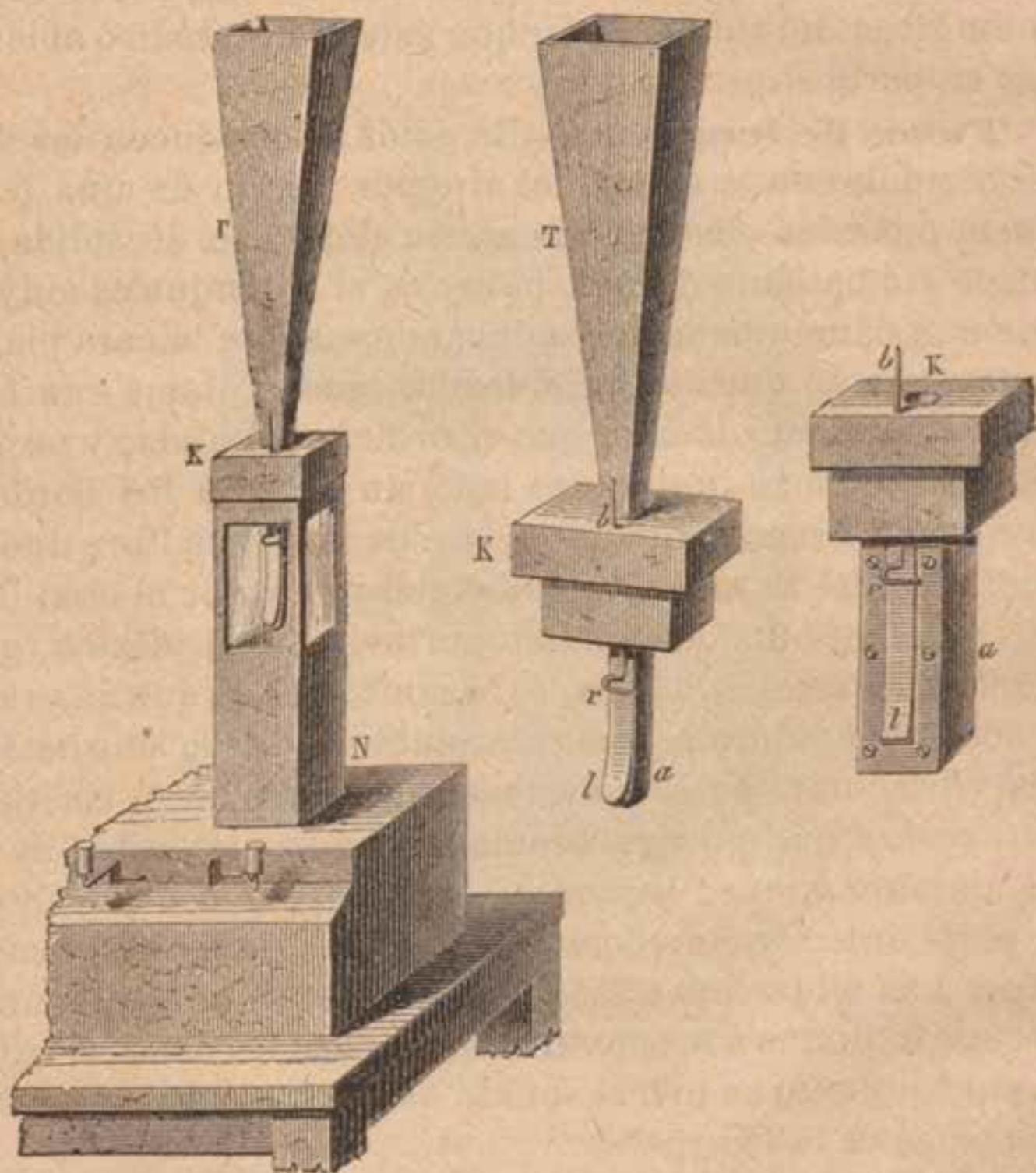


Fig. 25.

De aquí se deduce que un tubo abierto que produzca un sonido fundamental correspondiente á 100 vibraciones por segundo, podrá también producir otros de 200, 300, 400... vibraciones, pero de ningún modo un sonido intermedio entre los indicados, de 350 vibraciones, por ejem-

plo; y que si el tubo es cerrado, siendo 100 el número de vibraciones de su sonido fundamental, su segunda armónica corresponderá á 300 vibraciones por segundo y las sucesivas á 500, 700, etc.

Para conseguir la subdivisión en segmentos de la columna de aire, y que los tubos produzcan los sonidos armónicos correspondientes, basta forzar la corriente, aumentando la presión en el fuelle.

Se puede comprobar la formación de los nodos y vientres en los puntos indicados al hablar de las vibraciones longitudinales de las varillas y de las columnas ganosas, por medio del siguiente experimento debido á Hopkins. En un tubo abierto, una de cuyas caras es de vidrio, se introduce un arito (fig. 26) sostenido por medio de unos hilos, en el que se pega una membrana ó un pedacito de papel muy finos, formando con él como un cedacito. Si hacemos que el tubo dé su nota fundamental, deberá formarse un nodo en su punto medio, y sus extremos serán dos vientres; pero nosotros sabemos que en el nodo hay cambios de densidad del aire, una compresión cuando reflejado el movimiento en los extremos del tubo viene á concurrir en el centro, y una dilatación cuando retrocede y va del centro á los extremos en la fase siguiente, y que cada molécula del aire que ocupa estos puntos no ejecuta movimientos de vaivén ú oscilaciones alrededor de su posición de equilibrio, mientras que en los vientres no hay cambio de densidad, pero sí movimientos amplios de sus moléculas. Ahora bien; ¿qué deberá resultar de bajar el arito hasta el fondo mientras suena el tubo? Que su membrana participa



Fig. 26.

del movimiento de vibración del aire en los vientres, y produce al hacerlo un ruido que indica la especie de temblor de que se halla poseída en ellos, y va disminuyendo en intensidad á medida que se acerca hacia la mitad del tubo, en donde permanece tranquila, para volver á su temblor en cuanto se aleja de éste hacia uno ú otro extremo. Si sobre la membrana se pone arena, ésta indica por sus saltos lo que la membrana por el ruido que produce, y si en un tubo se forman dos ó más nodos, basta pasear el aro á todo lo largo, para que nos indique, por los puntos en que

hay silencio, las posiciones de los mismos; pero König ha ideado otro medio más elegante y de más general aplicación, para hacer constar la presencia de los nodos y vientres, que vamos á exponer.

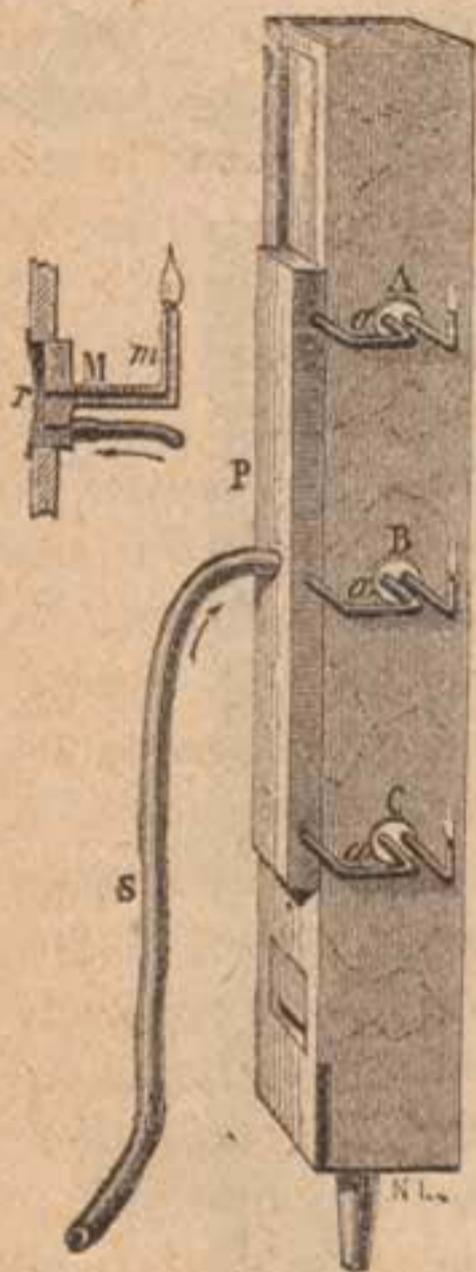


Fig. 27.

Llamas manométricas.— En la pared del tubo que se somete al experimento (fig. 27), se han abierto tantos orificios cuantos sean los puntos en que han de formarse nodos, dados los sonidos que se vayan á producir, y estos orificios se cubren con una lámina delgada de goma elástica. Sobre esta lámina, va una cápsula de madera *M* que lleva un mechero de gas; éste se hace llegar á la cápsula por medio de un tubo *a* que parte de una caja ó cámara de gas, que lo recibe por otro tubo *S* del gasómetro ó de la cañería del alumbrado. Dejando llegar el gas á la cámara y á los mecheros, se encienden éstos, y

cuando suene el tubo, la membrana de la cápsula que se halle sobre un nodo será empujada en el momento de una compresión hacia el interior de la cápsula, y se alargará la llama; y por el contrario, cuando haya rarefacción, se do-

blará hacia el interior del tubo, produciendo una verdadera aspiración en la cápsula, y la llama se acortará ó apagará por completo, si se ha regulado la llegada del gas convenientemente. La cápsula que se halle sobre un vientre no sufre compresión ni dilatación alguna, y la llama no oscila ni se apaga, permanece inmóvil, como si el tubo no sonara. En el tubo representado en la figura se pueden comprobar los dos primeros modos de división de un tubo abierto. Encendiendo los tres mecheros y soplando suavemente, se apagará siempre el de enmedio; y soplando con más fuerza, se apagarán los dos de los extremos, situados á un cuarto de la longitud total del tubo, en el momento mismo en que se oiga la primera armónica, que será la octava del sonido fundamental, permaneciendo entonces encendido el mechero del centro, que caerá sobre un vientre.

Instrumentos de viento.—En los órganos hay por lo menos un tubo para cada nota que el instrumento ha de producir, y en muchos casos un juego de tubos que producen, además de la nota fundamental, algunas de sus armónicas, remediando así la falta de vigor inherente á los tubos sonoros, como á todo instrumento que produce sonidos simples, es decir, no acompañados de sonidos armónicos; pero en los demás instrumentos que, como la flauta, el clarinete, el saxofón, trompa, etc., se tocan soplando con la boca, no hay más que un solo tubo, al que se le hace producir un número más ó menos grande de notas distintas, valiéndose de varios artificios. El más comúnmente usado consiste en practicar agujeros que se cierran por medio de llaves ó con los dedos, y que al destaparlos producen el mismo efecto que si se cortara el tubo por el punto que ocupan, formándose en ellos un vientre. Otras veces se alarga ó acorta el tubo por medio de otros tubos suplementarios que pueden formar parte ó no del tubo total, cerrando ó abriendo válvulas convenientemente dispuestas, por medio de lo que se llaman *pistones*. A estos medios, hay que agregar un tercero, co-

mún á todos los instrumentos, que consiste en forzar la corriente de aire soplando con más fuerza, para producir sonidos armónicos en relación con las condiciones de cada tubo.

Entre los instrumentos de viento, los hay que, como la flauta, se pueden considerar como tubos abiertos por sus dos extremos y pueden dar toda la serie de sus armónicos pares é impares. Hay otros que, como el clarinete, tienen embocadura de lengüeta, compuesta de dos láminas elásticas inclinadas, que forman un ángulo muy agudo, entre las que queda una hendidura lineal que se cierra al soplar, aplicándose la una contra la otra, y se abre por la elasticidad de las láminas, y que, según Mr. Helmholtz, son verdaderos tubos cerrados, formándose un nodo en el extremo que ocupa la lengüeta, y no dan, por consiguiente, sino sonidos armónicos impares. En los instrumentos de cobre, la embocadura está reducida á una especie de embudo en el que se aplican los labios que, al soplar, vibran á la manera de una lengüeta, abriéndose ó cerrándose y produciendo intermitencias en la emisión del aire, que se arreglan á la longitud del tubo y al sonido armónico que se quiere producir. Éstos funcionan como tubos abiertos por sus dos extremos.

CAPÍTULO IX.

Medición indirecta de la velocidad del sonido.

Procedimiento general.—Al hablar de la determinación experimental de la velocidad del sonido, vimos que tan sólo ha podido llevarse á cabo, en el aire para los gases, en el agua para los líquidos, y en el hierro fundido para los sólidos, á causa de la dificultad de procurarse espacios suficientemente extensos, llenos de otros medios, á los que se pudiera aplicar el procedimiento empleado en

aquéllos; pero el estudio que hemos hecho de las vibraciones longitudinales, nos da la manera de hacer extensiva la investigación de la velocidad del sonido en los diferentes medios sólidos, líquidos y gaseosos, sin necesidad de disponer de grandes masas de cada uno de ellos.

En efecto, hemos visto que la longitud de un tubo abierto, ó la de una varilla libre por sus dos extremos, que producen su nota fundamental, es la mitad de la onda sonora correspondiente (pág. 70) y sabemos, que $\frac{v}{n} = l$, siendo v la velocidad del sonido, n el número de vibraciones, y l la longitud de la onda sonora; y por tanto, que $v = n l$, ó lo que es lo mismo, que multiplicando el duplo de la longitud de una varilla libre ó de un tubo abierto, que es la longitud de la onda l , por el número de vibraciones que ejecutan, determinado por medio de la sirena, tendremos la velocidad del sonido en el sólido de que esté formada la varilla, ó en el cuerpo gaseoso ó líquido que contenga el tubo sonoro.

Aplicación.—Cuando se trata de gases distintos del aire, se pone el tubo en comunicación con un gasómetro que contenga el gas de que se trate y se hace sonar por una corriente del mismo, mientras que con la sirena se determina el número de vibraciones del sonido producido, poniéndola al unísono con el mismo, ó se sustituye la sirena por un diapasón cuyo sonido se conoce de antemano; y en el caso de un líquido, se sumerge el tubo en una caja ó cuba llena de dicho líquido, y se hace sonar el tubo por medio de una corriente del mismo. Se emplean con este objeto tubos de boca que suenan como pudieran hacerlo en el aire.

En vez de determinar el número de vibraciones de cada sonido, es más sencillo para los sólidos hallar longitudes de varillas que produzcan la misma nota, siendo entonces la velocidad del sonido proporcional á su longitud para cada cuerpo; y conocida ésta para uno, lo será igualmente para los demás. Comparando dichas longitudes con la

del tubo de órgano correspondiente, bastará multiplicar la velocidad del sonido en el aire, por la relación ó cociente que resulte de dividir la longitud de las varillas por la del tubo, para tener la velocidad en los cuerpos sometidos al experimento.

Velocidad del sonido en s gases á 0°.

Aire.....	333, ^m	00
Oxígeno.....	317,	47
Hidrógeno.....	4269,	50
Ácido carbónico.....	264,	60

Velocidad del sonido en los líquidos.

Agua á 15°.....	4437 ^m
Agua de mar á 20°.....	4433
Alcohol á 20°.....	4286
Éter á 0°.....	4459

Velocidad del sonido en los sólidos, tomando por unidad la velocidad del sonido en el aire.

Hierro recocido.....	45, 108
Acero.....	45, 108
Cobre.....	41, 467
Cinc puro.....	9, 683
Plata.....	8, 057

CAPÍTULO X.

Análisis de los sonidos.

Resonancia.—El refuerzo del sonido de un diapasón, determinado por el aire contenido en una probeta cuya altura sea igual á la cuarta parte de la longitud de su onda sonora, constituye un fenómeno de resonancia en-

teramente igual al que se obtiene montando los diapasones sobre cajas prismáticas de madera, verdaderos tubos sonoros cuya nota fundamental es la de su diapason correspondiente. Este fenómeno adquiere proporciones extraordinarias en el aparato denominado timbre de Savart (fig. 28). Es éste un timbre de 20 á 30 centímetros de diámetro, montado sobre un pie, y un tubo de latón, en el interior del cual se mueve otro con fondo; por cuyo artificio se puede alargar ó acortar la columna de aire que ha de producir la resonancia. Frotando los bordes del timbre con un arco de violín, se produce un sonido de

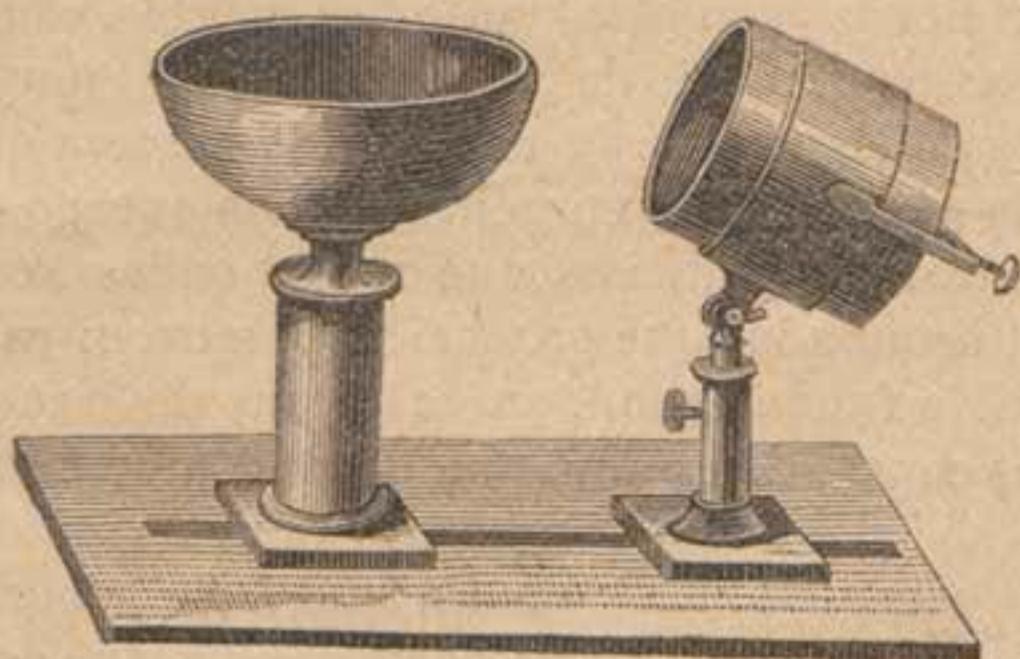


Fig. 28.

una gran intensidad; pero acercando el tubo, y haciendo correr el interior hacia uno ú otro lado, se llega á una posición para la cual el sonido se hace verdaderamente insoportable; y si se deja que se extinga el del timbre antes de aproximarle el tubo de resonancia, ó bien antes de darle la longitud conveniente, basta hacer una de estas dos cosas, para que se reanime y se vuelva á oír con una intensidad de que no se le creería susceptible.

Una circunstancia facil de preveer, y que la experiencia confirma plenamente, es, que la duración del sonido está en razón inversa de la intensidad que adquiere por estos refuerzos. En efecto, la mayor intensidad supone

mayor masa de aire puesta en movimiento, y mayor gasto de fuerza viva en un mismo tiempo; y como el cuerpo sonoro la posee en cantidad limitada, su duración será inversa del gasto.

Si se toman dos diapasones iguales montados sobre sus cajas de resonancia; se pone en vibración uno de ellos, y después se coloca frente al otro, se puede apagar el primero al poco tiempo y observar que el no excitado continúa el sonido emitido por aquél.

Si en un sonómetro se ponen dos cuerdas al unísono y se obliga á vibrar á una de ellas, dividiéndose en dos, tres ó más segmentos, entrará asimismo la otra en vibración, dividiéndose en otros tantos segmentos, como puede comprobarse por medio de pedacitos de papel muy ligeros colocados en los vientres y nodos, á la manera que se indicó en la página 53. Y en general, todo cuerpo susceptible de entrar en vibración, que recibe ondas sonoras de longitud igual á las que produciría él mismo; ya se trate de su sonido fundamental, ya de alguno de los armónicos de que es capaz, determina una absorción de movimiento

sonoro ó fuerza viva de dichas ondas, que hace sonar á dicho cuerpo; que es lo que constituye en esencia el fenómeno de la resonancia.

Aplicación de los fenómenos de resonancia al análisis de los sonidos.—

Mr. Helmholtz ha hecho una brillante aplicación de las leyes de la resonancia al análisis de los sonidos compuestos. Sabido es, que un tubo sonoro no refuerza más sonidos que aquellos que es susceptible de producir el mis-



Fig. 29.

mo, y que si se producen varios á un mismo tiempo en presencia de tubos diversos, cada uno reforzará el suyo, si

existe, ó permanecerá callado en caso contrario. Mr. Helmholtz ha sustituido los tubos por unas esferas de cobre (figura 29) con un tubo que forma la boca y otro opuesto terminado en punta afilada, para aplicarlo al oído; y por su medio determina el número y tono de los sonidos

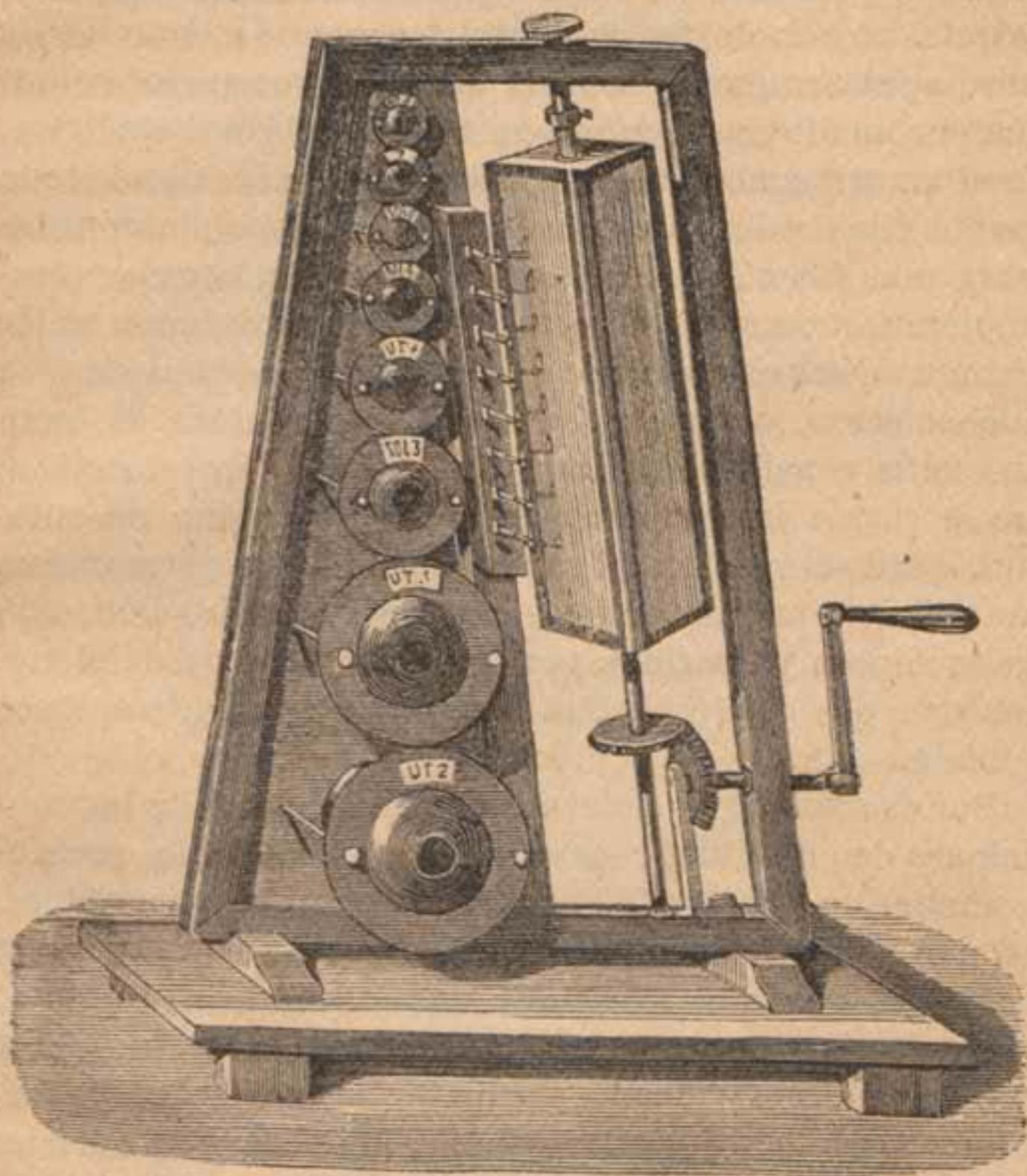


Fig. 30.

armónicos que acompañan á un sonido fundamental; y Mr. Koenig, los ha perfeccionado adicionándoles una cápsula manométrica.

Analizador del timbre de Mr. Koenig.—Agrupando varios resonadores, como se indica en la fig. 30,

resulta un aparato por medio del cual se pueden apreciar de una vez los sonidos armónicos que acompañan al fundamental de un sonido compuesto, que, como sabemos, es lo que le da carácter y constituye su timbre. Los resonadores, en número de ocho, pueden producir sonidos que son entre sí, como los números 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8; es decir, un sonido fundamental representado por 1, y la serie de sus armónicos hasta el 7.^o. Cada resonador comunica por medio de un tubo con una cápsula manométrica, y las llamas permanecen inmóviles mientras el aire de cada uno de ellos no responde á las vibraciones sincrónicas de algunos de los sonidos que se analizan, y, por el contrario, demuestran por sus oscilaciones la existencia de los mismos. Estas oscilaciones pasarían desapercibidas en muchos casos, y para hacerlas más perceptibles, se montan cuatro espejos, formando un prisma, sobre un eje, al que se puede imprimir un movimiento rápido de rotación, dando el resultado de que, si las llamas permanecen tranquilas, se ve, mirando á los espejos en rotación, una faja luminosa y continua por cada luz; pero desde el momento en que una oscila, la faja correspondiente aparece dentada.

Por este medio ha determinado Mr. Helmholtz las condiciones de emisión de las vocales, y encontrado que, independientemente de la nota que se cante al pronunciarlas, que puede ser cualquiera, hay sonidos característicos esenciales á cada una de ellas, y que varían de un idioma á otro. Las hay que sólo exigen uno, como la *a*, la *o* y la *ou* francesa, que podemos equiparar á nuestra *u*, y son: el $(si^b)_4$ para la primera y $(si^b)_3$, y fa_2 para las otras dos respectivamente. Las demás exigen lo menos dos, como la *i*, cuyo sonido va siempre acompañado de las notas fa_2 y re_6 .

En vez del analizador de Koenig, en el que el número de resonadores es pequeño, y exige un gran número de ellos para cambiarlos, según la indole del sonido que se va á analizar, se puede hacer uso de un piano de cuerdas

horizontales. Separando los apagadores y colocando en las cuerdas tiritas de papel muy ligeras, se produce el sonido que se quiere analizar, y las cuerdas que responden á alguno de los que lo constituyen, hacen saltar el papelito que sostenían.

Síntesis del sonido.—Del mismo modo que un sonido compuesto se puede resolver en dos ó más simples, pueden superponerse estos últimos proviniendo de [cuerpos sonoros distintos, y producir el efecto mismo sobre el oído que el sonido compuesto; ó mejor aún], puede reforzarse uno de los armónicos de un sonido determinado, para imprimirle el carácter peculiar á otro distinto. Así es como se consigue que un diapasón pronuncie una vocal, como la *o*, por ejemplo. Basta para ello poner en vibración un diapasón que dé el $(si^b)_2$, y ponerlo frente á un resonador que dé su octava $(si^b)_3$. El mismo resultado se obtiene soplando contra los bordes de los resonadores respectivos. Suenan éstos, y se entiende perfectamente el sonido de la vocal correspondiente.

Mr. Willis, por medio de tubos de lengüeta, y Helmholtz con diapasones, han tratado de resolver en toda su extensión el problema de la síntesis de la voz humana en lo relativo á la emisión de las vocales, y Mr. Faber, ha llegado á construir una verdadera máquina parlante, imitando el órgano vocal en sus diversas partes; pero todos estas disposiciones, de una complicación extraordinaria, dejan bastante que desear respecto á la propiedad de su función, y contrastan con la sencillez del aparato ideado por Edison.

Fonógrafo.—El fonógrafo de Mr. Edison se deriva del fonautógrafo de Mr. Scott; pero la feliz idea de invertir la función de sus órganos, para llegar á obtener la maravillosa reproducción de la palabra en todos sus detalles y accidentes, corresponde exclusivamente á Edison. Este aparato (figs. 31 y 32) está compuesto de un portavoz, *E*, en el fondo del cual hay una delgada lámina metálica, apoyada por el intermedio de dos pedazos de goma elás-

tica, *C*, contra un resorte *l* que lleva un estilete metálico *s*, corto y rígido, destinado á grabar el sonido en una lámina de estaño arrollado sobre un cilindro *I*. Este cilindro, que lleva en toda su extensión una ranura fina en forma de hélice de paso muy corto, se prolonga en un tornillo del mismo paso. Cuando se hace girar el cilindro por medio del manubrio, y se habla al mismo tiempo contra el portavoz armado de un cono de cartón *C*, para concentrar mayor número de ondas sonoras sobre la plancha, vibra ésta y hace que el estilete trace sobre la lámina de estaño unos surcos

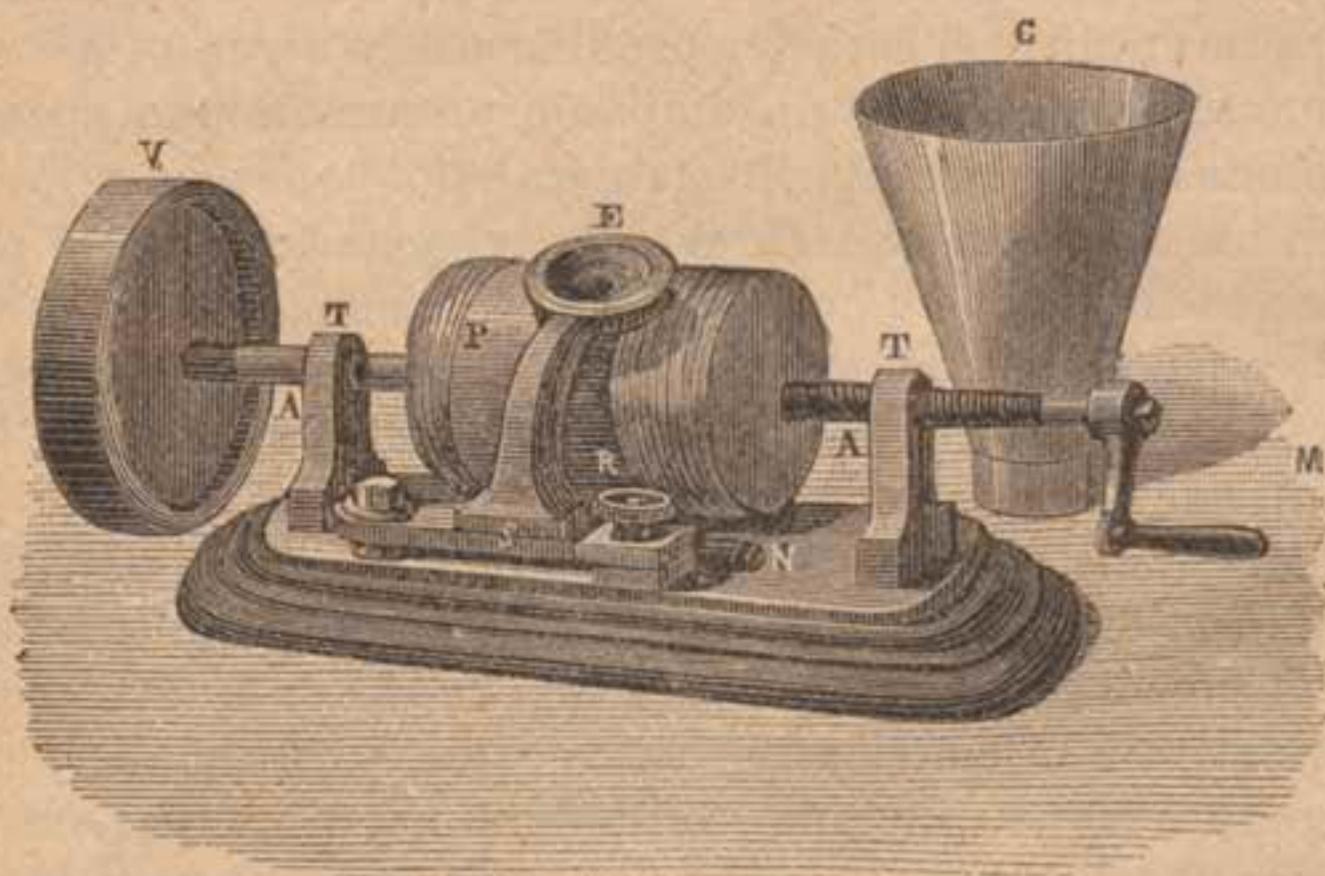


Fig. 31.

discontinuos, cuya forma está íntimamente ligada á las peculiares vibraciones que la voz imprime á la membrana ó lámina metálica. Para hacer hablar al fonógrafo, basta colocar el cilindro en la posición que ocupaba al empezar, cuidando de levantar antes el estilete, y hacer girar otra vez el manubrio, de modo que el grabado vaya pasando de nuevo por la punta del estilete. Este subirá ó bajará, siguiendo los accidentes del trazado, y obligará á la membrana á pasar por las mismas posiciones que ocupó al vibrar bajo la acción de la voz, y por consiguien-

te, invirtiéndose los papeles, comunicará al aire los movimientos necesarios para producir ondas exactamente de la misma forma y duración que las emitidas por el que habló, que reproducen la palabra con toda fidelidad.

Es indispensable que la velocidad de rotación del cilindro sea la misma al tiempo de grabar el sonido y al hacer hablar al fonógrafo; sin esta circunstancia, varía el

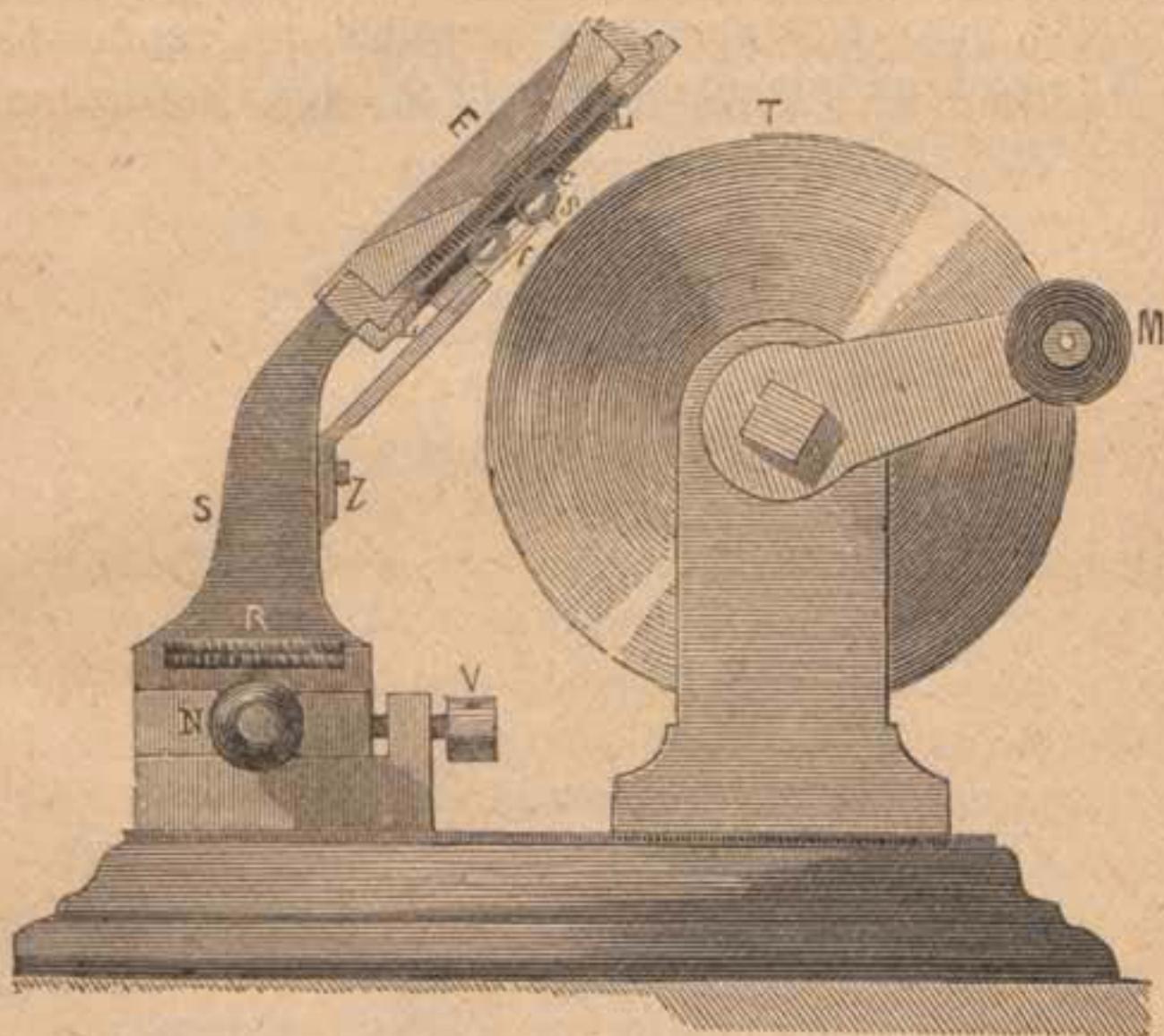


Fig. 32.

tono de la palabra, lo que sería perjudicial, sobre todo, si se tratara de reproducir el canto.

En el fonógrafo se pueden grabar muchos sonidos simultáneos, que después se reproducen á la vez, y que el oído puede separar; á la manera que lo hacemos cuando hablan muchas personas á un mismo tiempo ó tocan todos los instrumentos de una orquesta.

El grabado de la lámina de estaño desmerece mucho con las repeticiones, y si se trata de reproducir la misma

palabra muchas veces, llega bien pronto á hacerse ininteligible. Se ha tratado de sustituir la lámina de estaño por una placa resistente de plata, animada de un movimiento rectilíneo; lo que no deja de tener inconvenientes cuando se trata de inscripciones largas; y hoy se construyen con cilindros cubiertos de una pasta de cera endurecida. De todos modos, resulta ser el fonógrafo un aparato defectuoso bajo el punto de vista de sus aplicaciones prácticas, pero seguramente susceptible de grandes perfeccionamientos, que no es de creer se hagan esperar mucho en estos tiempos.

TERCERA PARTE.

COMPOSICIÓN DE LOS MOVIMIENTOS VIBRATORIOS.

CAPÍTULO XI.

Interferencia.

Superposición de las vibraciones.—Supongamos que en el agua tranquila de un estanque dejamos caer á un mismo tiempo dos piedrecitas separadas una de otra. En cada uno de los puntos en que encuentren á la superficie, nacerá una serie de ondas circulares que, avanzando, llegarán á tocarse, y desde este momento se superpondrán, sin que por esto dejen de existir cada una de ellas, cuya propagación podemos seguir con la vista hasta llegar á las paredes, en donde, reflejadas, producen nuevas series de ondas que se cruzan con las primeras, encontrando del mismo modo las condiciones necesarias á su existencia individual, cualquiera que sea su número, sin que sea después de todo condición indispensable la quietud de la superficie en que nacieron las primeras. En efecto, lo que hemos dicho en dos series de ondas, se puede extender á un número cualquiera de ellas que se produzcan simultáneamente y en un mismo momento, aunque la superficie en que se originen se halle á la sazón cruzada por otras muchas. Allí caben todas; no importa el número ni su magnitud, sin que á ninguna le

falte ni el espacio ni el movimiento indispensables á sus manifestaciones individuales.

Otro tanto sucede con las vibraciones sonoras. En el aire mismo de una habitación se propagan á la vez miles de ondas provocadas por los instrumentos de una orquesta y las voces de los coros, sin que sea obstáculo para que el oído las analice y separe perfectamente, apreciando las cualidades de cada sonido, hasta el punto de que el director puede notar la más leve falta, y fijar con toda precisión su naturaleza y el instrumento ó la voz que la cometió. ¿Cómo representarnos el estado de semejante aire? La imaginación retrocede ante la confusión de su imagen; pero la razón puede ayudarnos á resolver el problema, fundándose en un principio de la mayor sencillez: el principio de la independencia de los efectos de las fuerzas simultáneas y el del movimiento anteriormente adquirido. Si una molécula de aire se halla solicitada á la vez y en un mismo sentido por dos ondas, ejecutará un movimiento que será la suma de los dos movimientos; si estos son de sentido contrario, el movimiento resultante será igual á su diferencia; si forman un ángulo, seguirá la dirección de la diagonal del paralelogramo construído sobre las rectas que representen las velocidades que respectivamente tienden á imprimirle; si son en mayor número, las velocidades respectivas tendrán, en todo caso, una resultante en virtud de la cual, la molécula ejecutará un movimiento que será como la superposición de todos los movimientos individuales. Cada uno, nos dice el principio, producirá sobre ella el mismo efecto que si la molécula se hallara en reposo; y su posición final será la misma que si, obedeciendo sucesivamente á cada una de las acciones que la solicitaron, hubiera ejecutado los respectivos movimientos en diferentes momentos.

Interferencia del sonido.—La posibilidad de que coexistan en un espacio dado un número indeterminado de movimientos vibratorios, no significa que no ejerzan acción alguna unos sobre otros; antes al contrario, es una

manifestación característica de esta clase de movimientos, la interferencia ó anulación de un movimiento por otro; y el haber observado que un rayo de luz puede ser destruido por otro, produciendo la obscuridad, ha sido la causa de que se considere aquélla como el resultado de un movimiento ondulatorio. Supongamos dos series de ondas exactamente iguales en la superficie de un líquido. Nosotros sabemos que no consisten en otra cosa que en elevaciones y depresiones sobre el nivel medio del líquido, siguiéndose, á un círculo de elevación ó cresta, otro de depresión ó surco; pues bien, al llegar á tocarse, puede suceder que lleguen á la vez al punto de contacto dos elevaciones, en cuyo caso las moléculas solicitadas por una y otra onda formarán una cresta de doble elevación que en todos los demás puntos de ambas; ó dos depresiones, y se formará un surco de doble profundidad en su punto de contacto; ó últimamente, una depresión y una elevación, en cuyo caso, las moléculas solicitadas por tendencias iguales y enteramente opuestas, no se elevarán ni se deprimirán, permaneciendo en el nivel medio del líquido, ó lo que es lo mismo, no habrá onda, y el movimiento que procede de un centro se destruye por el que procede del otro: hay *interferencia*.

Consideremos ahora dos diapasones que produzcan exactamente el mismo sonido. Uno de ellos producirá una serie de ondas sucesivamente condensadas y dilatadas que vendrán á encontrar á la serie igual de ondas que parten del segundo, que supondremos que ejecute sus movimientos vibratorios en el mismo tiempo y en el mismo sentido que el primero, lo que se expresa diciendo que hay concordancia en las *fases* de sus movimientos. Si la distancia entre ambos es igual á un número exacto de ondas sonoras, se encontrarán: una onda condensada del uno, con otra onda condensada del otro, y una onda dilatada del primero, con otra onda dilatada del segundo; y las condensaciones, como las dilataciones, serán dobles, allí donde se verifique la superposición de ondas, aumentando con ello la

amplitud de los movimientos, y por consiguiente (pág. 13) la intensidad del sonido, que alcanzará una intensidad cuatro veces mayor que la del sonido de cada uno de los diapasones, puesto que á un camino doble corresponde, para la molécula vibrante, una velocidad doble, y á ésta una fuerza viva $m v^2$, que, por crecer con su segunda potencia, se hará cuatro veces mayor. Pero si la distancia de los diapasones es igual á media onda ó á un número impar de veces la longitud de media onda, cada onda condensada del uno se encontrará con una onda dilatada del otro, y viceversa, y las moléculas de aire, solicitadas á un mismo tiempo por una y otra, permanecerán en repo-

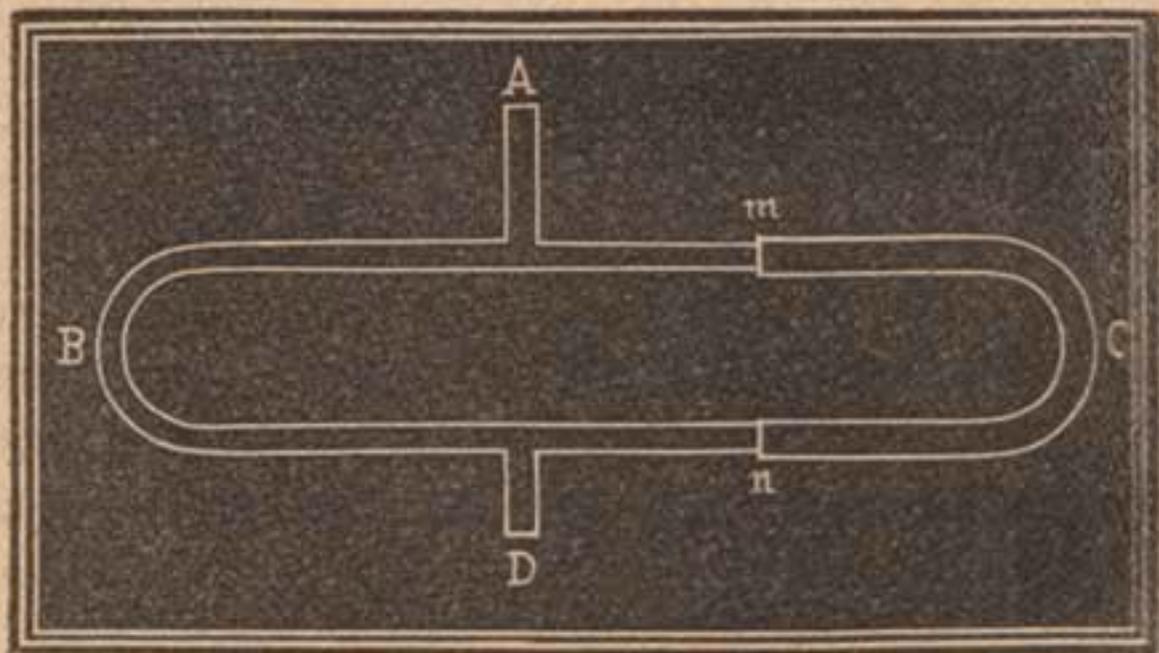


Fig. 33.

so, y un sonido habrá destruido otro sonido, produciéndose la interferencia del sonido.

Siendo absolutamente imposible tener dos diapasones que llenen los requisitos anteriormente expuestos, es preciso que busquemos la comprobación experimental de la interferencia por algún otro medio; y entre los muchos que pudieran emplearse, preferimos los siguientes, ya por su analogía con las condiciones supuestas al establecer su teoría, ya por la facilidad en repetir los experimentos:

1.º Sea *A* (fig. 33) un tubo que se bifurca en dos ramas *B* y *C* para reunirse nuevamente en *D*, y en el que la porción *mCn* está dispuesta de modo que puede correr hacia

un lado ú otro y hacer el camino ACD más largo ó más corto, á nuestra voluntad, que el ABD . Si en el extremo del tubo A se coloca un diapasón en vibración, el sonido se propagará por una y otra rama, y llegará á D habiendo recorrido espacios desiguales. Si la diferencia de caminos es media onda, ó un número impar de medias ondas, no se oirá el diapasón aplicando el oído en D ; porque mientras por la rama B llegue una onda condensada, llegará por C una onda dilatada, y al contrario, y se destruirán; pero si la diferencia de los caminos recorridos por el sonido que llega por una y otra rama es de una onda, ó un número exacto de ondas, que constituyen un número par de medias ondas, se encontrará una onda condensada con otra onda condensada, y una onda dilatada con otra dilatada, y el sonido de la una reforzará el sonido de la otra rama, y aplicando el oído en D , se oirá con gran intensidad. Cuando de una diferencia de caminos, igual á un número impar de medias ondas, se pasa lentamente á una diferencia de un número par de las mismas, el sonido, que reaparece débil al principio, porque aún interfieren en gran parte unas y otras ondas, va gradualmente aumentando en intensidad hasta llegar á su maximum, para decrecer otra vez hasta anularse, si se sigue alargando la rama C . Por este medio se puede determinar la longitud de onda de un sonido, y conociendo el número de vibraciones, calcular su velocidad.

2.º Si se montan sobre un mismo fuelle y uno junto al otro dos tubos sonoros exactamente iguales, producen, haciéndolos sonar aisladamente, un sonido intenso; pero si suenan los dos á la vez, resulta un sonido tan débil, que apenas se oye á una pequeña distancia. La razón de su interferencia es sencilla: los períodos de vibración de dichos tubos son opuestos, porque mientras en uno se verifica una compresión, opone mayor resistencia á la salida del aire del fuelle que se precipita en el otro, y al contrario; y produciendo el uno una onda dilatada, mientras el otro la produce comprimida, se destruyen ó interfieren.

Si los tubos son abiertos, y en su punto medio, que corresponde á su nodo, se coloca una cápsula manométrica, las dos llamas, situadas una encima ó más alta que la otra, dan, por la rotación de un espejo, dos bandas dentadas, en las que las partes salientes ó dientes de la una corresponden á las entrantes de la otra, confirmando que los períodos de compresión y dilatación son opuestos en los dos tubos.

3.º Las dos ramas de un mismo diapasón producen interferencias, como lo comprueban los hechos siguientes: si se aproxima un diapasón sin caja de resonancia al oído, y se le hace girar sobre sí mismo de una vuelta completa, se hallan cuatro posiciones, en las cuales no se percibe sonido alguno. Más notable aún resulta el mismo hecho, cuando se observa con el auxilio de una probeta que refuerce el sonido del diapasón. Colocado éste de modo que sus dos ramas estén en un plano horizontal ó en uno vertical, la resonancia llega á su maximum, y disminuye en las posiciones intermedias hasta llegar á anularse en cuatro posiciones distintas para una revolución completa. Si colocado el diapasón en una de estas cuatro posiciones, se cubre, sin tocarla, una de las dos ramas con un tubo de cartón, renace el sonido, confirmando de este modo que la falta de resonancia reconoce por causa la destrucción de las ondas sonoras de una rama por las ondas de la otra.

De un modo análogo interfieren las ondas producidas por dos concameraciones contiguas de una placa en vibración ó las de un timbre; y esta circunstancia explica cómo puede aumentarse la intensidad del sonido, cubriendo una ó más concameraciones de una placa con cartones de forma apropiada que no lleguen á tocarla, ó interponiendo un cartón en el timbre de Savart, que tape la mitad del tubo de resonancia, cuando en aquel se ha provocado la formación de una línea nodal en un plano que pase por el eje del mismo tubo.

Pulsaciones—Si tenemos dos diapasones tales, que uno verifique 100 vibraciones por segundo y el otro 99;

y suponemos que empiezan á vibrar en un mismo instante, siendo las mismas las fases de vibración, habrá coincidencia entre sus ondas y se reforzarán al principio; pero retrasándose algo en cada vibración el que verifica 99; cuando haya transcurrido medio segundo, habrán verificado, 50 el primero y 49 y media el segundo, y se hallarán en fases opuestas, produciendo interferencia. Aumentando cada vez más el retraso, llegará á ser de una vibración completa al cabo de un segundo, cuando uno haya verificado las 100 y el otro las 99 que le corresponden, reproduciéndose los mismos hechos en cada segundo. Ahora bien; el refuerzo que se produce al empezar la coincidencia de las vibraciones, disminuye gradualmente hasta que llegan á la oposición, en cuyo momento apenas se oyen, aumentando la intensidad [del sonido á partir del mismo para volver á decaer, y así sucesivamente. Estas intermitencias en la intensidad del sonido, que resultan de la interferencia incompleta de dos sonidos próximos, se llaman *pulsaciones*. Si la diferencia entre el número de vibraciones fuera de dos, se reproduciría la misma serie de hechos dos veces por segundo, y en general, habrá tantos refuerzos del sonido y tantos momentos de silencio en cada segundo, cuantas sean las vibraciones que uno de los diapasones ejecute más que el otro en el mismo tiempo.

Los cambios de intensidad serían: en el caso especialísimo de tratarse de dos sonidos de la misma intensidad, desde el silencio absoluto ó cero, hasta el cuádruplo de la intensidad de cada uno de ellos; y en el más general de tener distintas intensidades, no se llega al silencio absoluto, y al máximun de intensidad corresponde un valor mínimo igual á cuatro veces la intensidad del más débil de los que producen las pulsaciones.

Las pulsaciones son fáciles de producir por medio de dos tubos de órgano al unísono, de los que el uno se puede alargar ó cortar, ó simplemente, acercando un dedo á su boca mientras suena, ó poniendo la mano sobre su ex-

tremo superior, con lo que se consigue en todos los casos hacer más lentas sus vibraciones.

Es sumamente curioso el estudio óptico de las pulsaciones por el método de Mr. Lisajous. Se colocan dos diapasones, *A* y *B* (fig. 34), que estén al unísono, y se arman sus dos ramas interiores de los espejitos *M* y *N*. Sobre el *N* se hace llegar un rayo de luz (puede éste proceder de un quinqué, cuyo tubo se cubre con otro de chapa de hierro, en el que se hace un agujero pequeño), que se refleja en él y cae sobre el espejo *M*, que lo refleja á su vez, viniendo á caer sobre una pantalla en *I*. Si el diapason *B* vibra solo, el punto *I* describirá una línea vertical, y lo

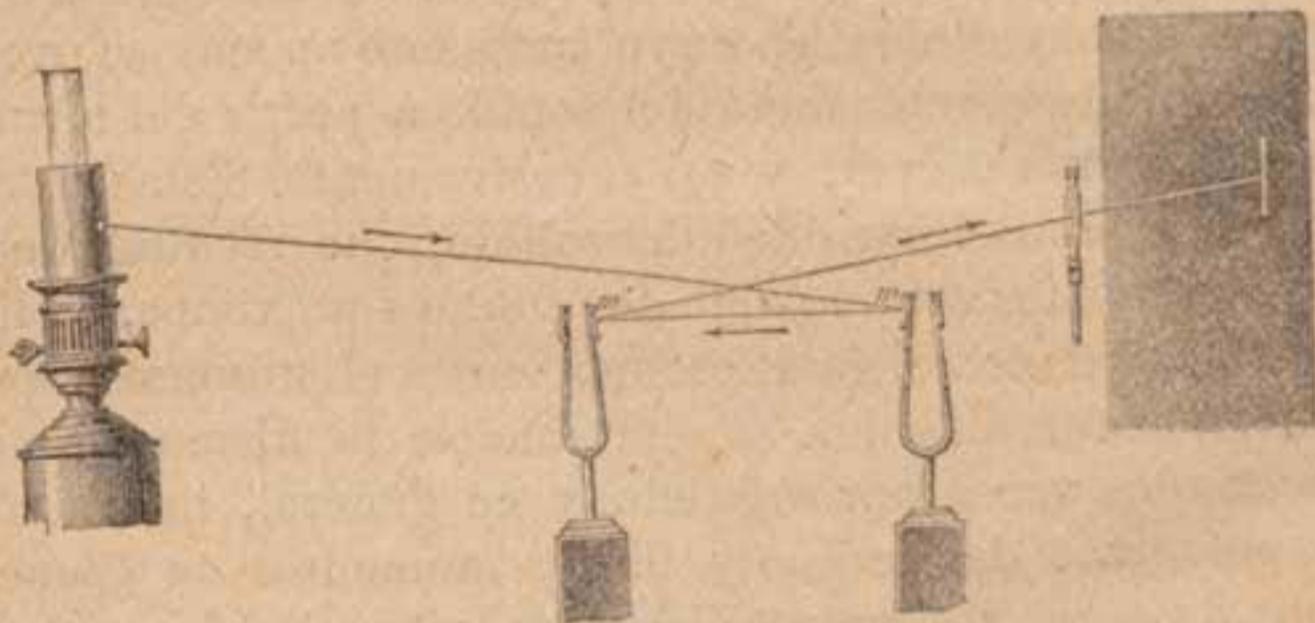


Fig. 34.

mismo sucede si vibra solo el *A*; pero si vibran los dos á la vez y sus vibraciones guardan las mismas fases, permaneciendo siempre paralelas las dos ramas, el punto *I* permanecerá inmóvil; y si, por el contrario, sus fases son opuestas, el punto *I* describirá una línea que será igual á la suma de las que cada uno le harían describir vibrando solo; y finalmente, si sus fases no son iguales ni opuestas, el punto *I* describirá una línea más ó menos larga, pero siempre menor que en el caso de oposición. Ahora bien; si se carga uno de los diapasones con una bolita de cera pegada á una de sus ramas, ó con una moneda pequeña, se retrasan sus vibraciones, interfiere con el otro, y en

cada segundo se verifica un número de coincidencias y de oposiciones de fases igual á la diferencia de vibraciones, y el punto *I* pasará desde la inmovilidad hasta describir una línea vertical más ó menos larga, que irá decreciendo hasta reducirse á un punto, tantas veces como sea el número de pulsaciones de los dos sonidos en cada segundo. La línea que describe el punto *I* se ve como un trazo de luz por la persistencia de las impresiones luminosas sobre la retina, á la manera que se ve una línea de fuego cuando se hace girar rápidamente un carbón encendido, y si al espejo *M* se le imprime un pequeño movimiento de rotación, se resuelven las líneas verticales en una curva sinuosa representada en la fig. 35; correspondiendo la mayor amplitud de las sinuosidades á los refuerzos del sonido, y la menor á las interferencias.

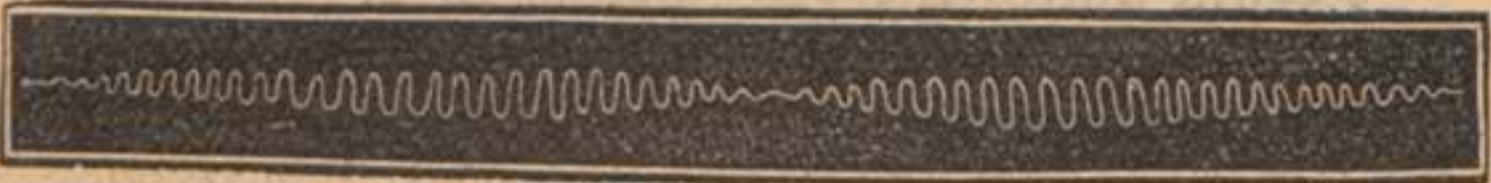


Fig. 35.

Sonidos resultantes.—Así se llaman unos sonidos que se hacen perceptibles cuando simultáneamente se producen dos sonidos intensos y bastante distantes por sus tonos para no producir pulsaciones. Young consideró estos sonidos como el resultado de pulsaciones tan rápidas que producían una sensación continua; fundándose, principalmente, en que el sonido resultante tiene una velocidad de vibración igual á la diferencia de las velocidades de los sonidos que los determinan; pero Mr. Helmholtz, ha hecho ver: 1.º, que además de los sonidos resultantes dichos, que llama por *diferencia*, hay otros cuyo número de vibraciones es igual á la suma de los que corresponden á los dos sonidos, ó sean sonidos resultantes por *adición*; y 2.º, que un sonido, resultado de las pulsaciones entre otros dos, debe alcanzar, como sucede á cada pulsación, una intensidad cuatro veces mayor que el so-

nido más débil, cuando menos; mientras que los sonidos resultantes son siempre más débiles que cada uno de los que los producen, y no se oyen sino cuando éstos alcanzan cierta intensidad. En su consecuencia, Mr. Helmholtz explica los sonidos resultantes como ondas secundarias que producen por su combinación las primitivas de ambos sonidos, cuando la amplitud del movimiento sonoro pasa de ciertos límites.

CAPÍTULO XII.

Teoría de la consonancia.

Escala diatónica.—Se emplean en la música una serie de sonidos ó notas que no encierran en sí nada de absoluto en cuanto á su altura ó tono, pero sí respecto á la relación del número de vibraciones que ejecutan los cuerpos sonoros que las producen. La serie de sonidos adoptados desde tiempos muy remotos, sin el menor conocimiento de las relaciones que entrañan y sin otra razón que la de las impresiones agradables ó desagradables que produce la sucesión ó simultaneidad de las mismas, puede reducirse á siete, que se repiten en el mismo orden, sin más diferencia que la de ser cada vez más altas. Estos sonidos forman la *gama natural* ó *escala diatónica*, cuyos nombres y número de vibraciones, con relación á la primera, son los siguientes:

<i>do</i>	<i>re</i>	<i>mi</i>	<i>fa</i>	<i>sol</i>	<i>la</i>	<i>si</i>	
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	ó
24	27	30	32	36	40	45	

Los números de la última línea representan las mismas relaciones que los de la segunda, pero en números enteros.

A esta escala sigue otra, en la que su primera nota es el *do*, cuyo número de vibraciones es doble del primero, y cuyas notas se distinguen de las anteriores por un sub-índice, como *do*₂, *re*₂... *si*₂, y á ésta, otra, *do*₃, *re*₃... *si*₃, y así sucesivamente. Se emplean sub-índices negativos, para designar las notas de otras escalas en las que el número de vibraciones son submúltiplos de la que lleva el sub-índice 1; como por ejemplo: *do*₋₁, *do*₋₂.

Intervalos musicales.—Se llama intervalo, á la relación entre el número de vibraciones de dos notas determinadas. Así, los intervalos entre cada nota y la inmediata anterior, serán:

$$\frac{re}{do} = \frac{9}{8}, \quad \frac{mi}{re} = \frac{10}{9}, \quad \frac{fa}{mi} = \frac{16}{15}, \quad \frac{sol}{fa} = \frac{9}{8}, \quad \frac{la}{sol} = \frac{10}{9},$$

$$\frac{si}{la} = \frac{9}{8}, \quad \frac{do_2}{si} = \frac{16}{15}.$$

En los que podemos observar que hay tres valores diferentes:

El primero $\frac{9}{8}$, que se llama *tono mayor*.

El segundo $\frac{10}{9}$, que es el *tono menor*, que puede transformarse en $\frac{9}{8} \times \frac{80}{81}$, y por consiguiente, que sólo difiere del precedente en un $\frac{80}{81}$, que es lo que en música se llama *comma*; intervalo que el oído apenas aprecia.

Y el tercero $\frac{16}{15}$ ó *semitono mayor*, equivalente á

$$\frac{10}{9} \times \frac{24}{25},$$

de cuya relación se desprende, que un tono menor ó $\frac{10}{9}$, se compone de un semitono mayor $\frac{16}{15}$, y de otro intervalo $\frac{25}{24}$, que se llama *semitono menor*, siendo éste últi-

mo el intervalo más pequeño que se emplea ó considera en la música.

Resulta, pues, que la escala está compuesta de la sucesión de dos tonos, de un semitono, de tres tonos y un semitono.

Sostenidos y bemoles.—Con el objeto de disponer de mayor número de sonidos, se han intercalado otros, subiendo ó bajando cada nota de la escala de un semitono menor, ó sea multiplicándolas por $\frac{25}{24}$ ó por $\frac{24}{25}$, resultando así los llamados *sostenidos* y *bemoles*, respectivamente.

Escala melódica.—Antes de la adopción de la escala diatónica se estableció el uso de otra llamada *pitagórica*, en la que los intervalos estaban todos representados por fracciones, cuyos dos términos son potencias de 2 y de 3; y las recientes investigaciones sobre los sonidos empleados en música, han dado por resultado establecer que los buenos artistas no dan el mismo valor á los intervalos cuando ejecutan una melodía y una armonía. En el primer caso se valen de la escala melódica ó pitagórica, y en el segundo de la diatónica ó natural, llamada también de Ptolomeo. En la melodía, el efecto resulta de la sucesión de los sonidos, mientras que en la armonía, la belleza depende principalmente de la superposición de los mismos.

Escala temperada.—En los instrumentos en que, como en el piano, hay una cuerda para cada nota, se complicaría mucho su construcción, y no menos la ejecución de una pieza de música, si se quisiera satisfacer en ellos las exigencias antes establecidas para la melodía y la armonía, pues cada octava tendría que comprender cada nota de las dos escalas, con los sostenidos y bemoles correspondientes; y en su lugar se ha establecido el sistema de dividir la octava en doce intervalos iguales, llamados *semitonos medios*, con lo que resulta una serie de sonidos muy próximos á los que se obtendrían en el otro caso, pero en menor número; quedando sustituidas dos ó más

notas, por una intermedia. A esta escala, se le da el nombre de *escala temperada*; y si bien es cierto que en rigor no hay en ella nota alguna exacta, á excepción del *do* de cada octava, no lo es menos que las diferencias entre los sonidos que la constituyen y los verdaderos, son tan pequeñas, que pasan desapercibidas.

Acordes musicales.—Cuando se producen á la vez dos sonidos distintos, resulta una impresión agradable al oído ó una impresión desagradable; en el primer caso, se dice que son acordes ó que forman una consonancia; y en el segundo, que son discordantes ó que forman una disonancia.

La experiencia ha establecido que la consonancia no resulta del valor absoluto de cada uno de los sonidos consonantes, sino de la relación entre el número de sus vibraciones, y que estas relaciones pueden reducirse á las siguientes: $\frac{1}{1}$, $\frac{2}{1}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{4}{3}$, $\frac{5}{4}$, $\frac{6}{5}$, que reciben los nombres de *unísono*, *octava*, *quinta*, *cuarta*, *tercera mayor* y *tercera menor*, respectivamente; cuyos nombres hacen referencia á la distancia ó número de notas comprendidas en la escala, entre aquellas cuyo número de vibraciones están en las relaciones que expresan. A estos intervalos se pueden agregar otros dos, $\frac{5}{3}$ y $\frac{8}{5}$, que corresponden á una *sexta mayor* y á una *sexta menor*, que, aunque consonantes, lo son menos que las anteriores. Las denominaciones de tercera y sexta, mayor y menor, reconoce por causa la desigualdad de los intervalos entre dos notas consecutivas de la escala, de donde nacen diferentes intervalos para dos notas igualmente distanciadas; diferencia muy sensible en las terceras y sextas, en las que se hace necesaria esta distinción, que es nula ó muy pequeña para los demás intervalos.

Hay *acordes múltiples*, que resultan de la superposición de tres ó más sonidos; y entre ellos son los más notables, el *acorde perfecto mayor*, en el que los sonidos son

como los números 4, 5 y 6; y el *acorde perfecto menor*, en el que la relación es la misma que la de los números, 10, 12 y 15; y corresponden á las notas de la escala natural *do, mi, sol*, el primero, y *mi, sol, si*, el segundo.

Teoría de las consonancias y disonancias.— La música, como arte, ha precedido con mucho al conocimiento científico de los hechos que á la misma se refieren, pero no podía aspirar á dar una explicación del fenómeno fisiológico de las consonancias y disonancias, ni acertaron á explicarle filósofos y matemáticos que intentaron hacerlo, fundándose principalmente en la sencillez de las relaciones entre los sonidos consonantes. La causa estaba fuera de su alcance, y la gloria de haberlas explicado satisfactoriamente corresponde á un físico contemporáneo, Mr. Helmholtz. Según éste, las disonancias son producidas por las pulsaciones que resultan de la superposición ó simultaneidad de dos ó más sonidos. Las pulsaciones afectan de un modo desagradable al oído, cuando se producen de 30 á 40 por segundo, y dejan de hacerlo así, cuando su número pasa de 130. Así, dos sonidos serán consonantes, ó formarán un acorde, cuando, de producirlos simultáneamente resulten menos de 30 ó más de 130 pulsaciones por segundo, que, como sabemos, se miden por la diferencia entre el número de vibraciones que á los sonidos corresponden; y la consonancia será tanto más perfecta, cuanto más se aparte dicho número de los límites fijados.

El efecto desagradable de las pulsaciones parece ser el resultado de los cambios bruscos de intensidad que las caracterizan, pues, como hemos dicho, en cada una de ellas se pasa de un período de interferencia ó silencio casi absoluto, á otro de coincidencia ó refuerzo, en el que el sonido adquiere una intensidad por lo menos igual á cuatro veces la del sonido más débil de los que las producen, lo cual hace que, aun sucediéndose con bastante rapidez para producir sobre el oído una sensación continua, no se fundan en un sonido melódico como el que resulta

de un número igual de vibraciones. Treinta y tres pulsaciones por segundo afectan de un modo muy desagradable al oído, mientras que un sonido de treinta y tres vibraciones en igual tiempo, constituyen uno de los sonidos más bajos que en música se emplean, y aunque faltos de vigor y tan sólo propios para prestárselo á algún otro de sus armónicos superiores, como sucede en los órganos y pianos cuyas notas más bajas representan, no llegan á ser desagradables como aquéllas.

La impresión que en el oído producen las pulsaciones dentro de ciertos límites, puede explicarse, por comparación, por el efecto que sobre la vista produce el cambio de intensidad de la luz, dentro también de límites parecidos. En efecto, si la luz de una bujía, la de un quinqué ó la de un mechero de gas, oscilan alargándose y acortándose, fenómeno muy frecuente en las primeras y no muy raro en las otras dos luces, sabe todo el mundo que producen una molestia notable, hasta el punto de hacerse insoportables si se sucede el hecho con alguna frecuencia; pero todas las luces de gas experimentan estas oscilaciones, como se comprueba colocándolas dentro de tubos de cristal abiertos por sus dos extremos y de longitudes tales, que el número de vibraciones de los sonidos que son susceptibles de producir las columnas en ellos contenidas, correspondan aproximadamente al de las oscilaciones ó vibraciones de la llama correspondiente, resultando así lo que los físicos han llamado *llamas cantantes*, porque en efecto, *cantan*, haciendo sonar los tubos como podrían hacerse sonar con un diapason apropiado ó como podrían hacerlo colocados en un fuelle acústico provistos de una boca; pues bien, si ordinariamente no molestan estos cambios de intensidad, es tan sólo porque se producen con gran rapidez, aunque por la persistencia de las impresiones en la retina, pasen desapercibidos. En uno y otro caso, se trata del efecto producido por ondas que obran sobre un nervio de sensibilidad específica, transmitidas: por el aire, hasta el nervio acústico, para el sonido;

y por el éter, hasta el óptico, para la luz; y la analogía no puede resultar más evidente.

Como los sonidos son muy raras veces simples, no basta tomar en cuenta los fundamentales, sino que es preciso atender igualmente á las series de sus armónicos, y muy especialmente á los inferiores que, como más intensos, influyen más en la consonancia resultante; y para que ésta sea perfecta, es necesario que, ni los sonidos fundamentales, ni los armónicos, tomados de dos en dos de todos los modos posibles, produzcan más de 30, ni menos de 130 pulsaciones por segundo. Y otro tanto debe decirse de éstos y los sonidos resultantes, si llegan á producirse.

Valor absoluto de los sonidos. — Los intervalos musicales no expresan otra cosa que relaciones entre el número de vibraciones de los sonidos correspondientes; pero en la práctica es preciso fijar la altura de cada sonido si se quiere que los diferentes instrumentos de música puedan acompañarse; y en vista de esta necesidad, se ha adoptado un sonido de 435 vibraciones dobles por segundo para la nota la_3 de la octava media del piano. Esta nota se obtiene por la vibración de un diapasón que se designa generalmente con el nombre de *diapasón normal*, y de ella es fácil deducir la altura de todas las demás, pues basta multiplicar el número de las vibraciones que ejecuta, por la fracción que represente el intervalo entre ella y la nota de que se trate. Así, por ejemplo, el do_3 de su misma octava, ejecutará, $435 \times \frac{3}{5} = 261$ vibraciones dobles por segundo.

Con el objeto de simplificar los cálculos, emplean los físicos sonidos algo más bajos, en los que la nota *do* de cada octava corresponde á un número de vibraciones representado por una potencia de 2, empezando por la cuarta; ó sea, por el do_2 de 16 vibraciones dobles por segundo, y correspondiendo por consiguiente al do_3 , 256 vibraciones en vez de las 261 que tiene partiendo del diapasón normal.

FIN.

ÍNDICE.

	<u>Páginas</u>
PRÓLOGO.....	5

PRIMERA PARTE.

NATURALEZA, CUALIDADES Y PROPAGACIÓN DEL SONIDO.

CAPÍTULO I.

NATURALEZA DEL SONIDO.

Sonido.—Acústica.....	9
Movimiento vibratorio.....	9
Vibración.....	10
Simultaneidad del sonido y del movimiento vibratorio.....	10
Necesidad de un medio elástico para la propagación del sonido.....	11

CAPÍTULO II.

CUALIDADES DEL SONIDO.

Sonido musical.—Ruido.....	13
Intensidad del sonido.—Sus leyes.....	13
Propagación del sonido en el interior de un tubo de sección constante.....	15
Tubos acústicos.....	15
Tono.....	15
Rueda de Savart.....	16
Sirena de Cagniard.....	16
Método gráfico.....	19
Fonautógrafo.....	20
Timbre.....	24
Límite de los sonidos perceptibles.—Analogías entre el soni- do y la luz.....	22

CAPÍTULO III.

PROPAGACIÓN DEL SONIDO.

	<u>Páginas.</u>
Propagación del sonido en un tubo indefinido.—Onda.....	24
Propagación del sonido en un medio ilimitado.....	25
Longitud de la onda sonora.....	26
Velocidad de propagación del sonido.....	27
Velocidad del sonido en el aire.....	29
Velocidad del sonido en el agua.....	30
Velocidad del sonido en los cuerpos sólidos.....	30
Efectos del movimiento de traslación de los cuerpos sonoros.	31

CAPÍTULO IV.

REFLEXIÓN DEL SONIDO.

El sonido se propaga en línea recta.....	32
Cambios de dirección en la propagación del sonido.....	33
Reflexión del sonido.—Sus leyes.....	35
Ecos y resonancias.....	37
Bocina y trompetilla acústica.....	39
Megáfono.....	39

CAPÍTULO V.

REFRACCIÓN É INFLEXIÓN DEL SONIDO.

Refracción del sonido.—Sus leyes.....	40
Inflexión del sonido.....	44

SEGUNDA PARTE.

ESTUDIO DE LOS SONIDOS EN RELACIÓN CON LOS CUERPOS QUE LOS PRODUCEN.....	47
---	----

Vibraciones de los cuerpos sólidos.

CAPÍTULO VI.

VIBRACIONES TRANSVERSALES.

Cuerdas.....	48
Sonómetro.....	49
Leyes de las vibraciones transversales de las cuerdas.....	50

	<u>Páginas.</u>
División de las cuerdas en segmentos.....	52
Sonidos armónicos de las cuerdas.....	53
Explicación del timbre.....	55
Vibraciones transversales de las varillas.....	56
Diapasón.....	58
Vibraciones de las placas.....	58
Vibraciones de las membranas.....	60

CAPÍTULO VII.

VIBRACIONES LONGITUDINALES.

Vibraciones longitudinales de las cuerdas.....	61
Vibraciones de las varillas.....	62
Varillas libres por un extremo.....	62
Varillas libres por los dos extremos.....	63

CAPÍTULO VIII.

VIBRACIONES DE LOS FLUIDOS.

Vibraciones longitudinales de una columna gaseosa.....	67
Tubos cerrados por un extremo.....	67
Tubos abiertos por sus dos extremos.....	70
Tubos de órganos.....	71
Tubos de boca.....	72
Tubos de lengüeta.....	73
Llamas manométricas.....	76
Instrumentos de viento.....	77

CAPÍTULO IX.

MEDICIÓN INDIRECTA DE LA VELOCIDAD DEL SONIDO.

Procedimiento general.....	78
Aplicación.....	79
Resultados.....	80

CAPÍTULO X.

ANÁLISIS Y SÍNTESIS DEL SONIDO.

Resonancia.....	80
Aplicación de los fenómenos de resonancia al análisis de los sonidos.....	82

	<u>Páginas.</u>
Analizador del timbre de M. Koenig.....	83
Síntesis del sonido.....	85
Fonógrafo.....	85

TERCERA PARTE.

COMPOSICIÓN DE LOS MOVIMIENTOS VIBRATORIOS.

CAPÍTULO XI.

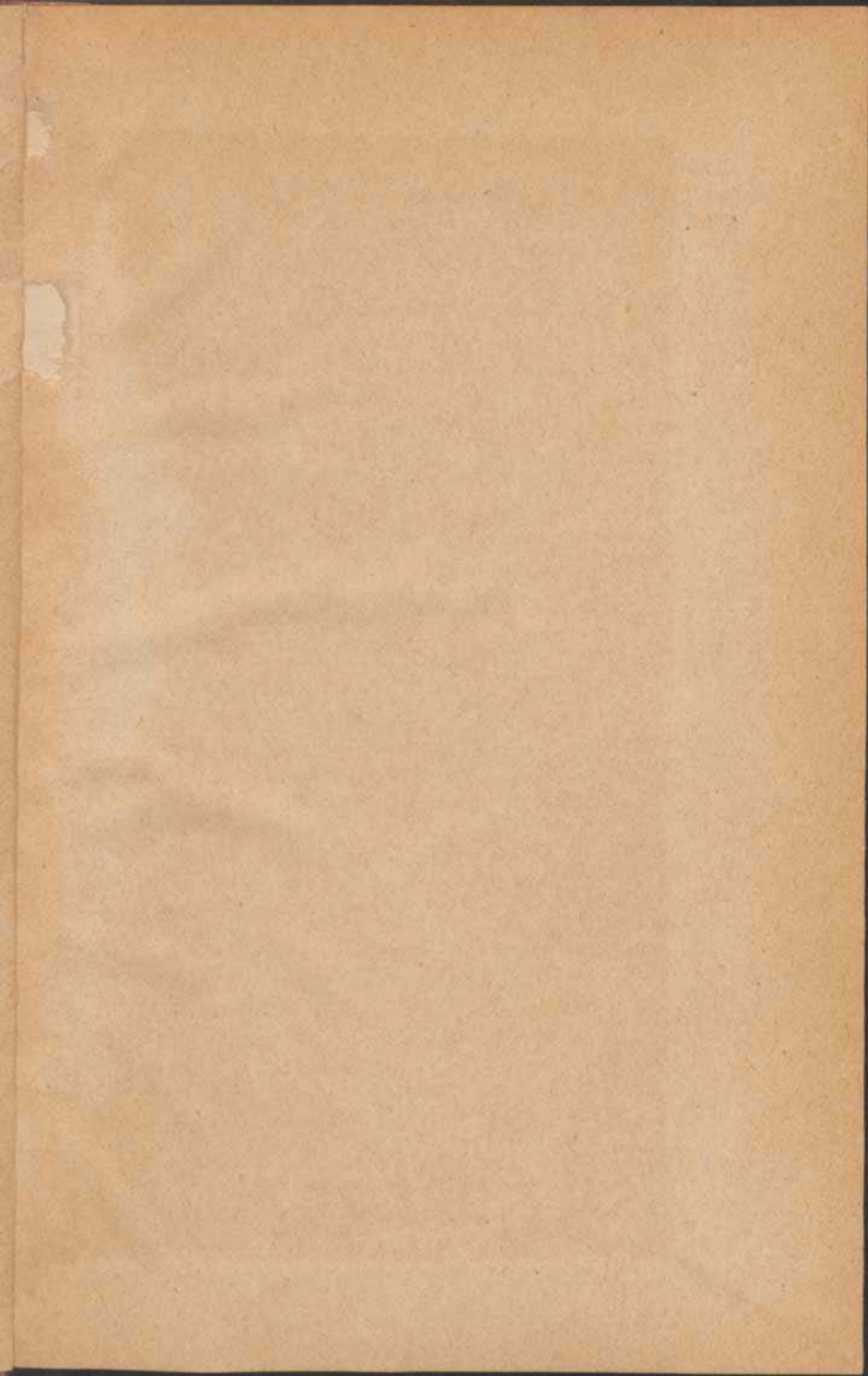
INTERFERENCIA.

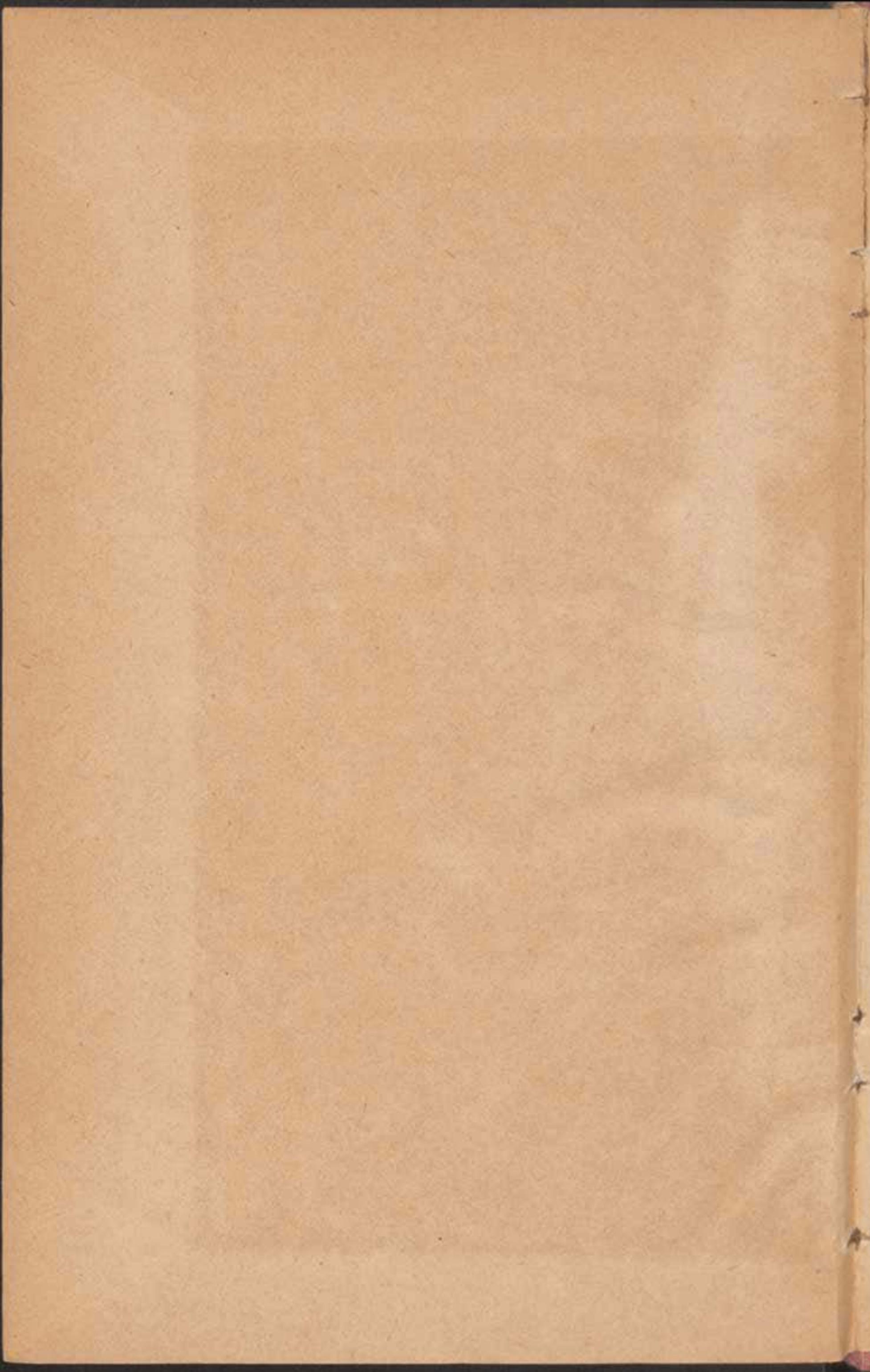
Superposición de las vibraciones.....	89
Interferencia del sonido.....	90
Pulsaciones.....	94
Sonidos resultantes.....	97

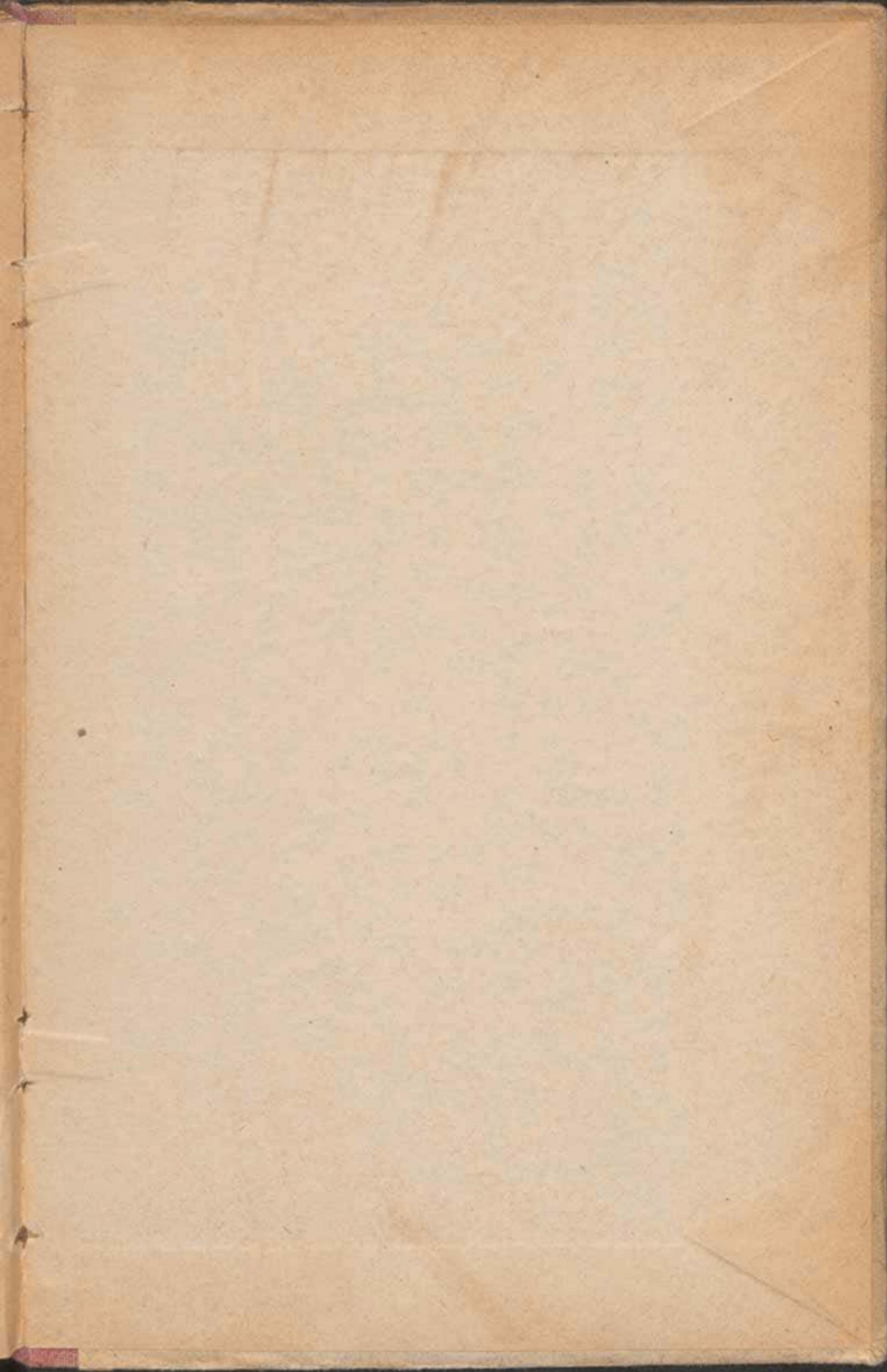
CAPÍTULO XII.

TEORÍA DE LA CONSONANCIA.

Escala diatónica.....	98
Intervalos musicales.....	99
Sostenidos y bemoles.....	100
Escala melódica.....	100
Escala temperada.....	100
Acordes musicales.....	101
Teoría de las consonancias y disonancias.....	102
Valor absoluto de los sonidos.....	104







BIBLIOTECA CIENTÍFICA RECREATIVA.

Esta *Biblioteca* forma una preciosa colección de tomos en 8.^o, en la que se explican en forma sencilla y clara las leyes de la Naturaleza, así como todos los principios científicos que informan las ciencias exactas, físicas y naturales, sus aplicaciones á la industria, á las artes, y á todos los adelantos modernos. Consta de las siguientes obras, adornadas todas ellas con profusión de grabados intercalados en el texto:

Viaje por debajo de las olas.	Viajes de una gota de agua.
Los grandes fenómenos de la Naturaleza.	La fuerza y la destreza del hombre.
Las habitaciones maravillosas (dos tomos).	La llobía y el buen tiecapo.
Los secretos de la playa.	Las fuerzas físicas.
Historia de un pliego de papel.	Los medios de destrucción.
El mundo antes del Diluvio.	La Hidráulica.
Mi casa.	El genio de las Bellas Artes.
Los misterios de una bujía.	Las grandes cacerías.
El vapor y sus maravillas.	La Luna.
La vida de un tallo de hierba.	El Sol.
La chispa eléctrica.	Curiosidades.
Historia de un rayo de sol.	Habitabilidad de los astros.
Historia de un pedazo de carbon.	Los globos.
Los monstruos invisibles.	El hierro.
Historia de un pedazo de vidrio.	El mundo subterráneo.
Historia de un grano de sal.	El sonido.
La inteligencia de los peces.	La metamorfosis de los insectos.
La inteligencia de las aves.	Las grandes pescas.
Los fantasmas de la imaginación.	El fondo del Océano.
	El mundo de los vegetales.

Todas estas obras se hallan de venta en la librería de la Viuda de Hernando y C.^a, Arrenal, 11, al precio de una peseta el tomo en rústica y 1'50 en tela.