

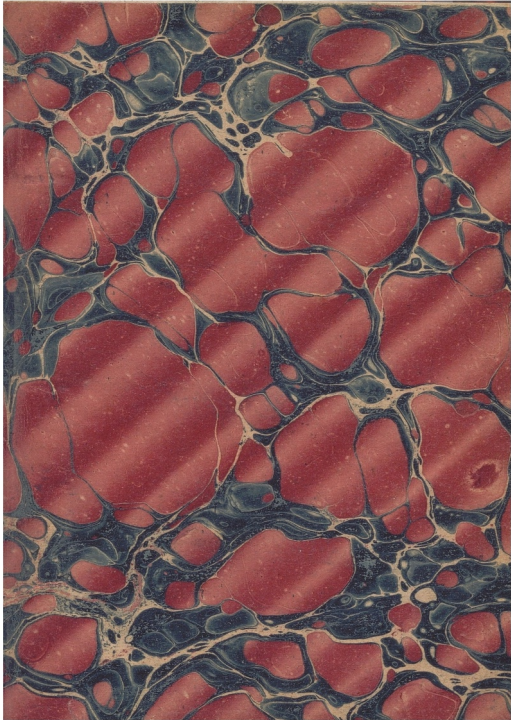
SÓNIDO,
ARMONIA
Y PIANO

BIG
XIX-4
GUI
SON



120

The image shows a close-up of a book cover with a marbled paper design. The background is a deep red color, overlaid with a complex, organic pattern of dark blue and black veins that resemble a stone or biological structure. The pattern consists of irregular, interconnected shapes and lines. In the upper-left corner, there is a small, white, circular sticker with the number '120' printed in red ink. The overall appearance is that of an antique or vintage book binding.





Cop. 850123

BIBLIOTECA
CIENTÍFICA RECREATIVA.

EL SONIDO.

LIBRERIA
SOCIETY RECREATIVA
EL BORDO

GASPAR, EDITORES.

EL SONIDO,

NOCIONES DE ACÚSTICA FÍSICA Y MUSICAL

POR

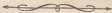
AMADEO GUILLEMIN

TRADUCCION

POR

EDUARDO CAZORLA.

ILUSTRADA CON GRABADOS.



GASPAR, EDITORES

4, PRÍNCIPE, 4,

MADRID.—1881.

Es propiedad de los Editores.

INTRODUCCION.

No hay espíritu un poco activo, inteligencia un poco viva, imaginación algo entusiasta que no experimente un sentimiento de curiosidad y admiración en presencia de los fenómenos de la naturaleza. ¡Qué variedad, qué armonía en ese gran todo que constituye el Universo y que no es menos magestuoso si se le contempla en su conjunto, si se viaja con el pensamiento por las profundidades infinitas del cielo ó si se lo estudia en los detalles más minuciosos de la estructura de los cuerpos que lo componen!

La ciencia nos enseña que la Tierra es un astro, un planeta, que veríamos brillar si estuviésemos lejos de ella en el espacio, como vemos en la noche resplandecer á Júpiter ó Venus; que se mueve con una rapidez vertiginosa alrededor de su eje y en torno del Sol y que sigue en su movimiento las mismas leyes á que están sometidos los demás planetas. ¿Cuáles son esas leyes y cómo de su regular periodicidad resultan los fenómenos de los días y las noches, de las estaciones y los años? La astronomía nos dice también que el Sol es una masa probable-

mente gaseosa en estado incandescente, cuya superficie está sin cesar surcada y perturbada por gigantescos huracanes, por trombas de fuego y lluvias de hidrógeno inflamado; que es un globo enorme que gira sobre sí mismo en veinticinco días y arrastra á la Tierra en su inmenso viaje en derredor de alguna estrella desconocida. Ante tales asertos, que nos parecen extraordinarios cuando los escuchamos por vez primera, nuestra curiosidad, nuestro deseo de saber se estimula y quisiéramos darnos cuenta del cómo y del por qué de esos fenómenos; ansiamos aplicar el ojo á los grandes telescopios que han descornado el velo que ocultaba tales maravillas; examinar la estructura de los planetas y ver si son tierras mas ó menos análogas á la nuestra; y sin ir tan lejos, nos contentaríamos con visitar á la Luna, sus volcanes, sus estensas y áridas llanuras y sus mares secos.

La misma invencible curiosidad nos atrae si se nos habla de las estrellas, esos soles matizados de todos los colores; de las nebulosas, esas asociaciones de millares de soles, esos focos gaseosos en que toman origen los mundos; de los cometas, esas nebulosas errantes de las cuales algunas llegan á pegarse al Sol, cual las mariposas que revolotean por la noche en torno de una bugía.

¡Qué nociones tan interesantes se pueden adquirir consultando la mas antigua de las ciencias, la astronomía! Pero la astronomía no puede decirlo todo si en su auxilio no vienen las otras ciencias y especialmente la física con sus aplicaciones fecundas.

Por otra parte, ¿qué sabríamos sin la física de las leyes y las causas de todos los fenómenos terres-

tres, de los movimientos de la atmósfera y de los mares, de los vientos y de las mareas? ¿Cómo nos explicaríamos los meteoros luminosos, el arco iris, los halos, el espejismo sin el conocimiento positivo de las leyes de la óptica, sin saber cómo se propaga la luz, cómo penetrando en los diversos medios, da origen á miles de matices, de tonos y de colores? El estudio de las leyes del calor es el que nos muestra cómo este agente bienhechor, tan indispensable á la vida como la luz, se difunde por la superficie terrestre y por sus desiguales variaciones da origen á los climas. Por el estudio de la electricidad y del magnetismo, nos esplicamos los fenómenos grandiosos del rayo, del relámpago y del trueno, de las auroras boreales y otros muchos. Por las leyes de la gravedad venimos en conocimiento de los movimientos de los cuerpos celestes, y en la tierra, de una multitud de hechos que nos son familiares, pero que muchas veces no podemos adivinar su causa: los movimientos y el equilibrio de los líquidos y los gases, la ascension de los cuerpos ligeros, las variaciones del barómetro, que oscila mas ó menos segun la presion que haya en nuestra cubierta gaseosa.

Si pasamos del estudio de los fenómenos naturales al de las obras del hombre, observaremos que son casi todas otras tantas aplicaciones de la ciencia. La telegrafia eléctrica, el vapor, las máquinas hidráulicas, los globos, la fotografia, los instrumentos de acústica y de óptica, la brújula y otros mil inventos que han dado á la civilizacion moderna su carácter tan original y variado, todas esas maravillas de la industria y de las artes, están sacadas del conocimiento de las leyes físicas, como

el fruto viene de la flor, como la flor y la planta que la sostiene han salido de la semilla.

Los fenómenos naturales que acabamos de recordar sumariamente, las leyes que los rigen, constituyen la materia de dos ciencias conocidas con los nombres de física y de astronomía. Tales fenómenos y sus leyes, sus aplicaciones á la industria, á las artes y á las otras ciencias, son los que nos proponemos describir y esponer en una serie de monografías de la cual forma parte la presente obra.

Como se vé, no es nuestro ánimo entrar en el estudio de todas las ciencias, puesto que dejamos fuera de nuestro programa todas aquellas que tienen por objeto los seres dotados de vida.

Hasta ahora se han publicado cuatro volúmenes: EL SOL, LA LUNA, LA LUZ Y EL SONIDO (1).

En cada cual de esas monografías, me he propuesto conseguir dos objetos: ser elemental y claro en la esposicion de las verdades científicas y en la descripción de los fenómenos, lo cual se facilita con las ilustraciones del testo; ser lo mas completo posible al menos en lo que es permitido serlo, cuando no se introducen las demostraciones matemáticas y el empleo de las fórmulas. Creemos de este modo ser útiles á dos clases de lectores; á aquellos que no han sido iniciados todavía en los conocimientos científicos, como á los que, habiendo estudiado y aprendido en otro tiempo, necesitan despues de ellos y desean estar al corriente de los nuevos trabajos y de los descubrimientos mas recientes.

Amadeo Guillemin.

(1) La *Biblioteca científica recreativa* ha publicado ya los dos primeros.

EL SONIDO.

CAPITULO PRIMERO.

Produccion y propagacion del sonido.

§ 1.—Los fenómenos del sonido en la naturaleza.

La ausencia de todo sonido, de todo ruido, el silencio absoluto en una palabra, es para nosotros sinónimo de inmovilidad y de muerte. Estamos de tal modo habituados á oír, aunque no sea más que el ruido que hacemos nosotros mismos, que tenemos dificultad en concebir la idea de un mundo completamente silencioso y mudo, como parece serlo la Luna si hemos de dar crédito á los datos de la Astronomía.

Los fenómenos del sonido se manifiestan en la Tierra en todos los instantes de la existencia. En verdad que hay, bajo este respecto, gran diferencia entre nuestras grandes ciudades en que los oídos están perpetuamente atormentados por incesante algazara y el murmullo dulce y confuso que se oye en las llanuras. ¡Qué contraste, también, entre la calma de las regiones alpestres y polares, en que toda vida desaparece, y las rugientes orillas del Oceano! Allí, el silencio sólo es interrumpido por el sordo rodar de las avalanchas, el crujido de los hielos ó el murmullo del viento. El

ruido del trueno, tan prolongado en las llanuras, no existe en las altas montañas: en vez de esa detonacion terrible que ordinariamente caracteriza el estallido del trueno y cuya repercusion multiplica su duracion, se oye un golpe seco, semejante á la explosion de un arma de fuego. En las orillas del mar, por el contrario, nuestros oidos se ensordecen por el estrépito de las olas al chocar contra las costas, lo cual produce ese rumor sordo y uniforme que acompaña como base solemne á las notas mas agudas que el agua produce al romperse sobre la arena y los peñascos.

En las tempestades, ese ruido monotono se convierte en una espantosa discordancia. Escuchad á Michelet describiendo la gran tormenta de Octubre de 1858 en la entrada de la Gironda:

«...Cinco dias y cinco noches, sin trégua, sin aumento ni disminucion en lo horrible. Nada de truenos, nada de combates de nubes, nada de alteracion en el mar. De pronto una grande tinta gris cierra el horizonte en todos sentidos y nos encontramos envueltos en aquel sudario ceniciento que no ocultaba del todo la luz dejando descubrir un mar plumizo, aborrecible y desolador por su monotonía furiosa. Aquel mar no sabia mas que una nota. Ninguna poesía terrorifica hubiera obrado como aquella prosa. Siempre, siempre el mismo tono: ¡Heu! ¡Heu! ¡Heu! ó: ¡Uh! ¡Uh!

«...Aquella gran alarido no tenia mas variante que las voces caprichosas y fantásticas del viento que se cebaba en nosotros. Tal casa le oponia obstáculos y era para él un objeto que vencia de mil maneras diferentes.

Golpeaba á veces como el señor que llama á la puerta; otras, daba sacudidas como una mano fuerte que quisiese arrancar un postigo; tan pronto se escuchaban quejas agudas que se escapaban por la chimenea á modo de imprecaciones porque no se le daba entrada, como amenazas porque no se le abria; percibíanse, en fin, gigantescos esfuerzos y espantosas tentativas encami-

nadas á arrebatarse la techumbre, pero ahogado todo sin embargo, por el gran ¡Heu! ¡Heu! todavía mas inmenso, poderoso y horrible que los ruidos anteriores.» (*El Mar*).

En medio de los campos, en los bosques y selvas, la sensación es muy diferente. Se oye un zumbido vago formado por la reunión de mil sonidos de una diversidad infinita: la yerba agitada por el viento, los insectos que vuelan ó se arrastran, las aves, cuyo canto se pierde en los aires, las ramas de los árboles que se mecen bajo la acción de las brisas suaves ó se encorvan y desgajan por el empuje de los vientos. De todo esto resulta una armonía unas veces alegre, otras grave (1), otras terrible, muy diferente del alboroto ensordecedor que llena las calles populosas de las grandes poblaciones. Las corrientes de agua, ríos, arroyos y torrentes juntan sus notas á este concierto, y en los terrenos accidentados el ruido de las cascadas que se precipitan sobre las rocas y á veces el terrible estentor de los hundimientos que todo lo destruyen y envuelven á su paso.

Más de todos los ruidos naturales, los más continuos y violentos son aquellos que nacen y se propagan en el seno de la atmósfera; arrastadas las masas gaseosas por un movimiento irresistible, que bastan para originarlo simples diferencias de temperatura y de densidad, chocan en su movimiento con todos los obstáculos que les oponen los accidentes del suelo, las montañas, rocas, bosques, árboles aislados, ora silbando, ora rugiendo con furor. Cuando á ello se mezcla la electricidad, todavía es mucho peor; entonces las detonaciones espantosas del rayo hacen callar los demás ruidos. Sólo las explosiones de los volcanes y terremotos rivalizan en poder

(1) Un sabio belga, M. Caudeze, describiendo las luchas en que se empeñan, al ponerse el sol, los venados de todas clases cuando van en busca de su presa, habla del ruido súbito, terrible, indefinible, que, en las regiones ecuatoriales surge de repente en las profundidades de las selvas.

con esa gran voz de la naturaleza. En el momento de la catástrofe que destruyó á Riobamba en febrero de 1797, se oyó una inmensa detonacion por la parte baja de las ciudades de Quito y de Ibarra; pero, circunstancia singular, nada se oyó en el lugar mismo del desastre. El levantamiento de Jorullo en 1759 fue precedido de ruidos subterráneos que duraron dos meses cabales. (*Humboldt.*)

Para acabar este cuadro de los sonidos que se producen naturalmente sobre el suelo y en la atmósfera, justo es mencionar las detonaciones que acompañan á la caída de los meteoros cósmicos, aerolitos y bólidos. Generalmente las explosiones que producen estos fenómenos se oyen á gran altura y las personas que de ellas han sido testigos las comparan á descargas de artillería, al ruido que producen los carruages cuando están muy cargados y rodando por las desigualdades del pavimento, ó bien al ruido de las tormentas.

Pero los fenómenos del sonido que mas nos interesan son aquellos que el hombre y los animales producen por medio de órganos especiales: la voz humana, intérprete indispensable de nuestros pensamientos y sentimientos, los gritos, los cantos de los animales que traducen de un modo mas grosero las variadas impresiones que sienten, sus necesidades, sus goces, sus dolores. El hombre ha creado un arte, el mas potente de todos, la música, para expresar lo que el lenguaje articulado no puede traducir; y para aumentar todavía más los dones de la naturaleza, ha multiplicado, con ayuda de instrumentos variados, los recursos de su propia voz. Los sonidos producidos con este especial objeto tienen propiedades físicas características que los distinguen de los ruidos irregulares, discontinuos, indefinibles que hasta aquí hemos descrito: forman una serie ordenada, regular, aun cuando se haga abstraccion de la composicion que, en una obra musical, los hace suceder en un orden sabio segun un ritmo acentuado y los combina

en acordes armoniosos. Esta serie constituye los sonidos musicales cuyo estudio físico es el principal objeto de la acústica.

Las necesidades del trabajo y de la industria humana han llevado al hombre, es cierto, á producir otros muchos ruidos que no se recomiendan por la melodía ni la armonía, pero que los mas son inseparables de los trabajos que los engendran y participan por decirlo así, de su carácter utilitario. En las manufacturas y en los talleres, en las herrerías, el ruido de los martillos y de las sierras, de las herramientas de todas clases, de las máquinas de vapor, casi nunca se interrumpe ni de dia ni de noche; fórmase un concierto bien poco armonioso, seguramente desagradable para los oídos menos *dilettanti*: ¿mas qué le hemos de hacer? En mi concepto, esa música es de todo punto preferible á la de la fusilería y la del cañon en los campos de batalla, así como creo también que la lucha en el terreno del trabajo y de la ciencia da mejores frutos que las decisiones brutales de la fuerza.

Por variados que parezcan los fenómenos á que acabamos de pasar revista, todos se refieren á un mismo modo de movimiento, al movimiento vibratorio; afectan mas particularmente al órgano del oído produciendo en nosotros la sensación del sonido. En este libro estudiaremos la naturaleza de las vibraciones sonoras, indicaremos qué relaciones existen entre estas y las sensaciones auditivas, procurando formular las leyes que rigen á unas y otras.

§ 2.—El sonido es un fenómeno á la vez exterior é interior.

El sonido es una sensación percibida por el órgano del oído, la oreja.

La producción del sonido supone necesariamente de una parte, un fenómeno exterior, de otra un sujeto

sensible que perciba su impresion. El fenómeno exterior es el cuerpo sonoro en accion, el origen ó la fuente del sonido, lo cual en condiciones y circunstancias particulares, determina fuera de nosotros un movimiento especial; este movimiento, propagándose del cuerpo sonoro al oido, conmueve nuestros nervios y causa la sensacion auditiva. Como es natural, el sonido desaparece desde el momento en que faltan las condiciones de su produccion. No hay sonido si el cuerpo sonoro deja de vibrar, si el nervio auditivo está inactivo ó paralizado; y, por último, no se produce el sonido si no existe un medio material que ponga en comunicacion el oido y el cuerpo conmovido.

Para comprender todo esto basta sólo un instante de reflexion; pero nos servirá de observacion prévia para ponernos al tanto de la necesidad de dividir la *Acústica* ó ciencia del sonido en dos partes distintas: en una se estudia el sonido en los fenómenos exteriores que lo determinan, independientemente de su accion sobre nuestros sentidos, y si en este estudio se hace intervenir la sensacion, solo es como medio de investigacion. Esta primera parte de la *Acústica* recibe el nombre *Acústica física*. En la otra parte, que se llama *Acústica fisiológica*, forman su objeto el estudio de las leyes de las sensaciones auditivas, tales como los sonidos que llegan al oido, las modificaciones que en él produce la conmocion sonora, el papel que juegan las diversas partes de este órgano y, por último, la comparacion de las sensaciones entre si.

Se podrian caracterizar ambas ramas de la *Acústica* diciendo que la *Acústica física* tiene por objeto el *sonido fuera del hombre*, y la *Acústica fisiológica* el *sonido en el hombre*. Haríase manifiesta la misma distincion mediante las dos preguntas siguientes:

¿Qué pasa en la materia de una campana que suena y en el aire que de ella nos separa? ¿Qué pasa en nuestro oido y en nosotros mismos?

Los fenómenos de luz y de calor motivan una distinción semejante. Diferente es el movimiento ondulatorio que emana de un foco incandescente: también es distinto el efecto sensible que ese movimiento produce en nuestros órganos. Afecta el movimiento la retina, la sensación es luz; afecta los nervios repartidos por la superficie epidérmica, la sensación es calor. Además; tales ondas, impotentes para impresionar la retina, porque las vibraciones que las dan origen no son lo suficientemente rápidas, afectan, sin embargo, al sentido del tacto; al contrario, si su rapidez pasa de cierto límite, el ojo ya no las vé, pero su acción toma otra forma y determina en los cuerpos vivos fenómenos químicos. Bajo este punto de vista, el sonido tiene también una evidente analogía con el movimiento ondulatorio del medio etéreo. Veremos, en efecto, que el movimiento que lo produce no causa una sensación auditiva sino dentro de ciertos límites de rapidez ó intensidad. Cuando la agitación sonora es muy lenta es incapaz de excitar el órgano del oído; cuando es demasiado rápida, traspasa en sentido contrario el límite de nuestra impresionabilidad.

Por lo demás, insistiremos después sobre estas consideraciones, que aquí tal vez parecerán un tanto oscuras, y adquirirán el grado conveniente de claridad y evidencia cuando el estudio de los hechos nos haya permitido definir rigurosamente la naturaleza del sonido.

Antes de todo, enumeremos los diversos modos, que la experiencia nos enseña, por los cuales puede producirse el sonido. Después veremos, de qué manera, se propaga este á través de los gases, de los cuerpos sonoros, de los líquidos y aún de los sólidos, hasta nuestro oído.

§ 3.—Diferentes modos de producción del sonido.

La *percusion*, ó el choque de dos cuerpos uno contra otro, es uno de los medios mas frecuentes de producir el sonido. El martillo que golpea contra el yunque, el badajo que hace resonar las campanas ó los timbres, los palillos del tambor, la carraca y otros muchos ejemplos que el lector recordará, son otros tantos casos en que el sonido se produce por el choque de dos cuerpos sólidos. Por estos medios pueden obtenerse muchos y variados ruidos y sonidos, pero ya veremos que esa variedad depende á la vez de la forma y naturaleza del cuerpo sonoro así como del modo de propagarse el ruido hasta nuestro órgano auditivo. En el experimento del martillo de agua (1) el ruido proviene del choque de una masa líquida contra un cuerpo sólido.

El *frotamiento* es otro modo de producir el sonido ó el ruido; por este procedimiento con un arco de violín, cuyas cerdas estén impregnadas de una resina llamada colofonia (pez griega) se hacen resonar las cuerdas tensas; así se producen los sonidos del violín y otros instrumentos semejantes, como tambien se pueden hacer vibrar las campanas de vidrio ó de metal. En este caso el frotamiento es transversal. Pero hay sonidos que tambien se obtienen por un frotamiento longitudinal sobre cuerdas ó varillas metálicas. Cuando se arrastra un objeto por el suelo, como un palo, las piedras, etc., resulta un ruido producido por el frotamiento. Las ruedas de un coche que corre por el pavimento producen un ruido que se debe en gran parte al frotamiento, pero la percusion no es completamente estraña á este fenómeno.

(1) Hé aqui en qué consiste este experimento: en un tubo de vidrio cilíndrico se introduce cierta cantidad de agua y se hace el vacío. Volviendo rápidamente el tubo el agua se precipita en masa sobre el fondo, porque no hay aire que por su resistencia divida el líquido al caer; de aquí un ruido seco como el que produce un martillazo.

Los sonidos que se obtienen al pulsar una cuerda tirante, como en el bandolin, la guitarra ó el arpa, son originados á la vez por la percusion y el frotamiento.

Puestos en contacto por la percusion ó el frotamiento los cuerpos sólidos y líquidos, producen sonidos y ruidos; pero los mismos movimientos en los líquidos, sin intermedio de cuerpo sólido, determinan tambien sonidos; tal es la repercusion que se escucha al caer las gotas de lluvia en la superficie del agua de una vasija ó en la corriente de un rio.

En los gases, el sonido, como lo veremos pronto con mas pormenores, es debido á una série de condensaciones y dilataciones alternativas; estos movimientos pueden ser tambien producidos por la percusion y el frotamiento. Así, el aire silba cuando recibe la impulsión violenta de una varilla ó de un látigo; y el viento produce intensos sonidos cuando sopla contra los árboles, los edificios ó sobre los obstáculos resistentes. En cuanto al ruido del viento que con tanta fuerza penetra por las chimeneas, es debido á un modo de agitacion del mismo que mas tarde estudiaremos cuando se trate de los sonidos producidos por el movimiento de los gases en los tubos. Tal es el sonido de los instrumentos de música que se conocen con el nombre de *instrumentos de viento*; tales son tambien los de la voz humana y los gritos de los animales.

Las detonaciones de los gases, el ruido que acompaña á la chispa eléctrica, las explosiones del rayo, son fenómenos debidos á cambios bruscos de volúmen, á dilataciones y contracciones sucesivas en las masas gaseosas.

Entre los procedimientos mas curiosos de producir el sonido, debemos citar el que resulta del contacto de dos cuerpos sólidos á temperaturas diferentes. El primero que dió á conocer este fenómeno, fue Schwartz, inspector de una fundicion sajona, en 1805. Habiendo colocado sobre un yunque frio un lingote de plata, estrañose

al escuchar sonidos musicales en todo el tiempo que tardó la barra en enfriarse. En 1829, Arturo Tevelyan puso accidentalmente un hierro para soldarlo, sobre un

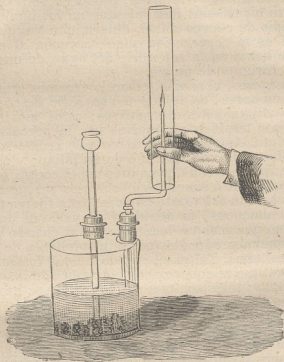


Fig. 1. —Experimento de la armónica química.

pedazo de plomo; casi instantáneamente se escapó del hierro un agudo sonido. En vista de esto se dedicó á estudiar el fenómeno bajo todas las formas é imaginó instrumentos adecuados para hacer evidente esta causa

de producción del sonido. Pronto los describiremos al estudiar las vibraciones sonoras.

El paso de una corriente eléctrica hace resonar una barra de hierro suspendida en medio de ella, estando una de sus estremidades en el centro de una bobina de induccion.

Finalmente, la combustion de los gases en los tubos da tambien origen á la producción de sonidos musicales. Si se quema el chorro de hidrógeno que se desprende del aparato llamado por los químicos *lámpara filosófica* y se introduce la llama en el interior de un tubo de mayor diámetro abierto por ambos extremos, se oye un sonido agudo ó grave segun el diámetro, el espesor y la naturaleza de la sustancia del tubo. Disponiendo convenientemente cierto número de estos aparatos, se obtiene una série de sonidos musicales que forman diferentes acordes: de ahí el nombre de *armónica química* con que se conoce esta especie de instrumento músico. Este hecho ha sido el punto de partida de varios curiosos esperimentos de Schaffgotsch y de Tyndall sobre las llamas cantantes.

De los hechos que preceden resulta la consecuencia de que para que se produzca el sonido es necesario cierto movimiento de las moléculas de los cuerpos, un estremecimiento que el ojo no siempre percibe, pero que es frecuentemente sensible al tacto cuando se aplica la mano ó un dedo sobre el cuerpo sonoro. Como acabamos de ver, son muy variados los medios de provocar esos estremecimientos; la propiedad de los cuerpos que los hace posibles es una: la conocida en física con el nombre de *elasticidad*.

§ 4.—Los cuerpos sonoros.

Los cuerpos susceptibles de emitir sonidos, de *resonar*, para emplear una espresion á la vez familiar y precisa, cuando se les somete á la percusion, al frotam-

miento, etc., son aquellos que están dotados de cierto grado de elasticidad. Los metales, el vidrio, la madera de estructura fibrosa, son, entre los sólidos, los cuerpos que poseen la sonoridad mas pronunciada; pero esta propiedad depende en mucho de la forma y dimensiones de la masa resonante. Un trozo de acero de forma cúbica da un sonido mate, sordo, por efecto de un martillazo; suspendido el acero por uno de sus puntos y aplicando el golpe á cierta distancia del de suspension, el sonido será ya mas intenso; transformado el mismo trozo de acero en aguja cilíndrica un poco larga, producirá sonidos mas intensos por el frotamiento ó el choque. Pero su sonoridad aumentará mucho si toma la forma de un vaso hemisférico, de una campana ó de un timbre. En resumen, la sonoridad está en razon directa de la elasticidad.

Los líquidos y los gases son cuerpos elásticos; tambien hemos visto mas arriba que son susceptibles de emitir sonidos, por lo cual deben ser incluidos entre los cuerpos sonoros; pero nosotros habremos de considerarlos especialmente en la propiedad que poseen de transmitir los sonidos emanados de los sólidos, habiendo desde luego comprobado su aptitud para ser por sí mismos cuerpos sonoros. Los líquidos y los gases son medios transparentes para el sonido, como son transparentes tambien para la luz; mas esto no quiere decir que la transparencia sonora sea debida á la misma causa que la transparencia luminosa.

Los cuerpos no elásticos ó dotados de escasa elasticidad, los cuerpos blandos, resuenan generalmente muy mal. La cera y la arcilla un poco húmeda, se encuentran en este caso. Por la misma razon, como pronto se comprenderá, estos cuerpos son muy malos conductores del sonido, es decir, que lo interceptan ó lo ahogan.

Estas son, por lo que hace al sonido, las analogías de los cuerpos opacos con relacion á la luz.

Las materias finamente divididas, la lana, las plumas,

el algodón, tienen por sí mismas poca ó ninguna sonoridad y transmiten mal el sonido. En esto se funda la práctica de llenar de serrín, virutas, yesones divididos, etc., los huecos de los entabacados con el objeto de amortiguar el sonido de un piso á otro. Las colgaduras de tela, los tapices y las cortinas hacen que una habitación sea menos sonora, mas sorda, porque esos cuerpos no son propios para resonar ó devolver el sonido.

Hé aquí, pues, establecida una segunda consecuencia no menos importante que la del § 5, á saber, que los cuerpos sonoros son los cuerpos elásticos, es decir, aquellos cuyas moléculas, separadas por una acción exterior de su posición de equilibrio, ejecutan un movimiento oscilatorio mas ó menos prolongado antes de volver á su posición primitiva. El sonido, por consiguiente, tiene su origen en un movimiento vibratorio de las moléculas de los cuerpos sólidos, líquidos ó gaseosos.

§ 5.—El sonido no se propaga en el vacío.

Es un hecho conocido de todo el mundo, que el sonido tarda un tiempo apreciable en propagarse del cuerpo sonoro al órgano auditivo. Cuando observamos á distancia una persona que golpea con un martillo, nuestros ojos ven el martillo caer sobre el obstáculo, antes que el oído perciba el ruido de la percusión. Así mismo, la detonación de un fusil ó de un cañon, llega al oído despues que ha brillado ante nosotros la llama producida por la explosión. En los fuegos artificiales se vé la llama del cohete antes de oír el estallido.

Yo recuerdo haber admirado en las costas del Mediterráneo el espectáculo curioso de un buque de guerra que hacia ejercicios de cañon: veía el humo de las descargas de artillería, y despues, sobre las crestas de las olas, los rebotes de las balas que iban á perderse en el mar, mucho antes de oír el estampido del cañonazo.

En todos estos casos, el intervalo comprendido entre la vista del fenómeno y la audición del sonido, indica la diferencia que media entre la velocidad de la luz y la del sonido; pero como la velocidad de la luz comparada con la del sonido, puede ser considerada como infinita (1), el mismo intervalo da sin error sensible el tiempo que el sonido tarda en propagarse de un punto á otro. Está fuera de duda, por la observacion diaria, que el intervalo en cuestion aumenta con la distancia.

De modo que, el sonido se propaga sucesivamente. Pronto veremos con qué velocidad. Mas, ¿cuál es el medio que sirve de vehículo á ese movimiento? ¿Es el suelo? ¿Se comunica por el intermedio de los cuerpos sólidos, de los líquidos ó del aire, ó por todos estos medios á la vez? Hé aquí un experimento que responderá á estas preguntas.

Se coloca debajo de la campana de la máquina neumática un aparato de relojería provisto de un timbre sonoro, cuyo martillo se mantiene inmóvil por la accion de la rueda catalina y del caracol, pero que se puede hacer móvil á voluntad por medio de un tallo. Mientras la campana está llena de aire á la presion ordinaria, se oyen perfectamente los golpes del martillo; más á medida que el aire se enrarece, el sonido disminuye en intensidad y desaparece por completo cuando se ha hecho el vacío. Para el buen éxito del experimento, se ha de colocar el aparato de relojería sobre una almohadilla de algodón en rama, plumón ó cualquier otra sustancia blanda y poco ó nada elástica, á fin de que las piezas metálicas de que se compone no transmitan sus vibraciones á la platina de la máquina neumática, y ésta al aire exterior. Procediendo así, se vé al martillo golpear sobre el timbre, pero no se oye nada. Si en vez del aire

(1) Séneca había entrevisto esta verdad experimental: vemos el relámpago, dice, antes de oír el sonido, porque el sentido de la vista, mas pronto, adelanta en mucho al del oído. (*Quest. natur.*, II, 12). Solamente está en el error al atribuir á nuestros sentidos una propiedad que pertenece á los fenómenos exteriores, á las ondas luminosas y á las ondas sonoras.

que llenaba el recipiente, se introduce un gas, el hidrógeno, el ácido carbónico, oxígeno, vapor de éter, etc., el sonido se oye otra vez.

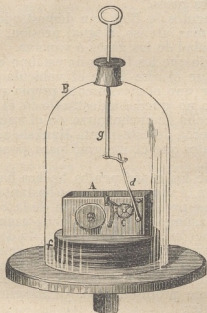


Fig. 2.— Experimento que prueba que el sonido no se propaga en el vacío.

Este mismo experimento puede efectuarse de un modo más sencillo por medio de un globo de vidrio con dos llaves y que puede adaptarse á la máquina neumática. En el interior hay una campanita, suspendida de un hilo sin torsión, que se agita sacudiendo el globo con la mano y se distingue bien su sonido; pero deja de oirse tan luego como aquel se enrarece por medio de la máquina neumática. Echando por el embudo superior al-

gunas gotas de un líquido volátil, éste se reduce á vapor al penetrar en el espacio vacío del globo, sin que el aire pueda mezclarse con él, y entonces se vuelve á oír la campanita, lo cual prueba que los vapores transmiten el sonido como los gases.

Los experimentos de Biot han demostrado que el sonido es tanto mas intenso, á igual presión, cuanto mayor es la densidad de los gases ó vapores.

Hace un siglo que los físicos no estaban convencidos del todo de que el aire fuese el vehículo del sonido: faltaba probar que el movimiento propio para engendrar el sonido no quedaba destruido en el cuerpo sonoro por el hecho de encontrarse en el vacío. Hé aquí lo que dice acerca de este punto Hauksbée, y los nuevos experimentos que él imaginó para poner el hecho fuera de duda.

«Parece que los experimentos hechos hasta aquí sobre el sonido en el vacío, no prueban bastante que la pérdida del mismo proceda solamente de la ausencia del aire; yo creo asimismo que no puede asegurarse esto sin nuevos experimentos. Porque se trata de saber si las partes del cuerpo sonoro, en un medio como el vacío, cambian hasta el punto de no poder recibir ya el movimiento necesario para producir el sonido. Como esta cuestión merece profundizarse, yo imaginé el experimento siguiente:

»Encerré en un recipiente algo resistente y guarnecido por abajo de un círculo de cobre, una campana de regular tamaño y aseguré bien el orificio del recipiente sobre una placa de cobre por medio de un cuero húmedo colocado entre ambos. Así dispuesto, el recipiente estaba lleno de aire común que no podía escapar. En seguida lo puse en la máquina neumática, lo recibí con otro gran recipiente y se estrajo el aire contenido en el espacio que mediaba entre los dos.

»Seguro estaba de que cuando el badajo tocase á la campanilla se produciría un sonido en el recipiente in-

terior, que contenia aire de la misma densidad que el atmosférico, á pesar de estar rodeado por el vacío.

»Hechos los preparativos del esperimento, hice agitar la campanilla; pero el sonido no se comunicó al través del vacío, por mas que yo estaba seguro que se producía interiormente.» Esta vez el esperimento fue decisivo.

§ 6.—Propagacion del sonido en los sólidos, líquidos y gases.

Segun lo que se acaba de ver, el aire y en general todos los gases, son vehículos del sonido aun cuando todos no poseen esa propiedad en el mismo grado. Así, segun los esperimentos de Tyndall, la conductibilidad del gas hidrógeno para el sonido es mucho menor que la del aire, á igual presion, y sin embargo, la velocidad de propagacion es cerca de cuatro veces mayor en el hidrógeno de lo que es en el aire. Hanksbée hizo en el siglo pasado esperimentos sobre la propagacion del sonido en el aire condensado hasta cinco atmósferas, y halló que la intensidad del sonido trasmitido aumentaba gradualmente.

Los sólidos trasmiten por sí mismos el sonido, en grados muy diversos que dependen de su elasticidad. Así, en los esperimentos precedentes, aun en el momento en que está hecho el vacío, acercando el oido, se oye un sonido muy débil, trasmitido al aire circundante por la almohadilla y la platina de la máquina. Lo que demuestra todavía mejor el hecho de esa trasmission por los sólidos, es que el sonido del timbre se debilita muy poco si se pone directamente el aparato sobre la platina de vidrio en que descansa la campana (1).

(1) Los académicos de Florencia que habian hecho esperimentos sobre la propagacion del sonido en el vacío, creyeron que el aire no era necesario para la trasmission. La causa de su error provenia de la dificultad que habia

El agua, y por lo general todos los líquidos, son también vehículos del sonido, y bajo el punto de vista de la intensidad y la velocidad, mejores vehículos que el aire. Un buzo oye debajo del agua los ruidos más insignificantes, por ejemplo, el que producen las chinas al rodar y chocar unas contra otras. Desde luego se preguntaron los físicos que si tal sonido que se oía á pesar de haber interpuesta una masa de agua, tenía á esta por vehículo ó si era la causa el aire disuelto en el líquido que trasmítia al exterior las vibraciones sonoras. El abate Nollet, repitiendo los esperimentos de Hanksbée, tomó la precaucion de purgar de aire el agua á través de la cual se propagaba el sonido y no halló diferencia sensible entre los sonidos producidos por el cuerpo sonoro sumergido en el agua aireada y en el agua privada de aquel gas. La presencia del aire en el agua no es, por consiguiente, necesaria para la propagacion del sonido, pues ni aumenta ni disminuye su intensidad.

No deben confundirse los sonidos que percibimos por intermedio del aire con aquellos que nos transmiten los sólidos, el suelo, por ejemplo, ó cualquier otro cuerpo elástico. Si se aplica el oído á la estremidad de un madero algo largo, se distingue muy bien el ruido que produce la frotacion de un alfiler ó la punta de una pluma en el extremo opuesto. Una persona situada hácia el medio de la viga, pero sin aplicar el oído, no oye una palabra. El tic-tac de un reló suspendido en la estremidad de un largo tubo metálico se oye distintamente en el otro extremo, sin que las personas más cercanas al reló perciban el menor sonido. «Habiendo Hassenfratz bajado á una de las canteras situadas por la

entonces de obtener un vacío suficientemente perfecto y también de que ellos no habían tomado la precaucion de aislar el cuerpo sonoro por medio de cuerpos blandos ó malos conductores del sonido. Un descuido semejante había inducido al P. Kircher á una conclusion diferente, pero no menos falsa. Habiendo atestiguado el hecho de que una campanilla daba también sonidos en el espacio barométrico no admitió que este espacio pudiese realmente estar vacío.

parte baja de París, encargó á uno que golpease con un martillo contra una masa de piedra que forma el muro de una de las galerías subterráneas. Entre tanto, él se alejaba poco á poco del punto en que se golpeaba teniendo cuidado de aplicar el oído á la masa de piedra. No tardó mucho en distinguir dos sonidos, de los cuales, uno era transmitido por la piedra y el otro por el aire. El primero llegaba al oído mucho mas rápidamente á medida que se alejaba el observador, de manera que dejó de ser percibido á la distancia de ciento treinta y cuatro pasos, mientras que el sonido transmitido por el aire se estinguió á la distancia de cuatrocientos pasos.» (Hatiy).

Esperimentos análogos llevados á cabo por medio de largas barras de madera ó de hierro, dieron el mismo resultado en cuanto á la velocidad, pero un efecto inverso relativamente á la intensidad. Citaremos mas adelante el curioso esperimento de Wheatstone repetido por Tyndall, que permite á varios oyentes oír en el segundo piso de una casa, por el intermedio de varillas de abeto, un concierto dado en el piso bajo ó en el sótano. La madera, es, pues, un excelente conductor del sonido.

Al describir Humboldt los ruidos sordos que acompañan casi siempre á los temblores de tierra, cita un hecho que prueba la facilidad con que los cuerpos sólidos transmiten el sonido á grandes distancias. «En Caracas, dice, en las llanuras de Calaboro y en las orillas del Rio-Apure, uno de los afluentes del Orinoco, en una estension de 150,000 kilómetros cuadrados, se oyó una espantosa detonacion, sin esperimentar sacudidas, en el momento en que salia un torrente de lava del volcan San Vicente, situado en las Antillas á una distancia de 4,200 kilómetros. Esto es lo mismo, con relacion á la distancia, como si una erupcion del Vesubio se oyese en el Norte de Francia. En el instante de la gran erupcion del Cotopaxi, en 1744, se oyeron detonaciones

subterráneas en Honda, junto á las orillas del Magdalena, á pesar de que la distancia que media entre ambos puntos es de 810 kilómetros, su diferencia de nivel 5,500 metros y de estar separados por las masas colosales de montañas de Quito, Pasto, Popayan y por innumerables valles y barrancos. Evidentemente, el sonido no fue transmitido por el aire; se propagó por dentro de la tierra á una gran profundidad. El día del terremoto de Nueva-Granada, en Febrero de 1855, se reprodujeron los mismos fenómenos en Popayan, Bogotá, Santa Marta y en Caracas, donde el ruido duró siete horas, sin sacudidas, en Haiti, Jamáica y cerca de Nicaragua.»

En resumen, la trasmision del sonido desde un cuerpo sonoro al oido, puede efectuarse por intermedio de los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos, pero la atmósfera es el vehículo ordinario.

De aquí resulta que el sonido no traspasa los límites de la atmósfera. El estruendo de las explosiones volcánicas no puede propagarse hasta la Luna, y de igual modo, los habitantes de la Tierra no oirían los sonidos que se produjeran en los espacios celestes. Las detonaciones de los aerolitos indican, por consiguiente, que esos cuerpos, en el momento en que se verifican aquellas, se encuentran ya en nuestra atmósfera, lo cual nos da algunos indicios acerca de los límites de la capa gaseosa que envuelve á nuestro planeta. En las altas montañas, el enrarecimiento del aire es causa de gran aminoracion en la intensidad de los sonidos. Según Saussure y todos los exploradores que le han sucedido, un pistoletazo en la cima del Monte-Blanco, hace menos ruido que un petardo pequeño; «he repetido varias veces, dice Tyndall, este experimento; la primera vez con un cañoncito de estaño y mas tarde con pistolas. Lo que me llamó mas la atención fué la ausencia de aquella plenitud y aquella claridad que caracteriza al sonido de un pistoletazo en elevaciones menores; el tiro

producia el efecto de una botella de vino de Champagne y, sin embargo, no por eso dejaba de ser bastante intenso.» Ch. Martins, al describir una tormenta de la cual fue testigo, en aquellas altas regiones, dice que «el trueno no rodaba, era un golpe seco como la detonacion de un arma de fuego.» Gay-Lussac, en su célebre ascension en globo, observó que los sonidos se debilitaban considerablemente á la altura de 7,000 metros á que se elevó.

En resúmen, de todos los hechos que acabamos de citar ¿qué es lo que debemos concluir? Hélo aquí.

El sonido tiene su origen en ciertos movimientos impresos á las masas ó á las moléculas de los cuerpos elásticos; la percusion, el frotamiento, la pulsacion de las cuerdas, la accion del calor y de la electricidad son otros tantos modos de produccion del sonido.

Los cuerpos sonoros son los cuerpos elásticos, que pueden ser sólidos, líquidos ó gaseosos.

Mas no basta que el movimiento que causa el sonido se produzca en los cuerpos sonoros para que el oido normal perciba su sensacion; es preciso que haya entre el origen y nuestro órgano auditivo, una sucesion no interrumpida de cuerpos, una série de medios ponderables.

El aire es el vehículo mas ordinario del sonido, pero los cuerpos sólidos, los líquidos y los diferentes gases son tambien propios para transmitir el movimiento particular que le constituye.

Por último, el sonido no se propaga en el vacío.

CAPITULO II.

La velocidad del sonido.

§ 1. Velocidad del sonido en el aire.

Todos conocen los hechos que prueban que el sonido no se trasmite instantáneamente desde un cuerpo sonoro al oído. En el § 5 del anterior capítulo hemos recordado algunos de esos hechos, para comprobar la existencia de un intervalo apreciable entre el instante en que el ojo vé el movimiento que da origen al sonido y aquel en que el oído percibe su impresión.

¿Se propaga el sonido sucesivamente á través de los medios ponderables? ¿Cuáles son las leyes de ese movimiento y con qué velocidad se propaga el sonido? ¿Esa velocidad es constante, ó bien varía con la distancia del origen? ¿Es ella diferente, según el medio; mayor ó menor en los líquidos ó los sólidos, en el aire ó en los gases, en direcciones variadas, horizontales, oblicuas, verticales, en las montañas que en las llanuras? ¿Cambia en fin, si las condiciones atmosféricas cambian; si la temperatura, la presión del barómetro, la humedad del aire y su densidad sufren alguna variación? ¿La aumentan ó disminuyen los movimientos de transporte del aire, esto es, los vientos?

Véase, pues, cuán compleja es la cuestión; pero los primeros físicos que la han tratado, no la consideraron desde luego, sino bajo su mas simple aspecto. Sólo se

limitaron á medir groseramente la velocidad de propagacion del sonido en el aire, sin tener en cuenta las circunstancias que acabamos de enumerar.

En general, toda medicion de la velocidad del sonido está basada en la diferencia que existe entre la velocidad de la luz y la del sonido; y á decir verdad, hasta estos últimos años no se ha determinado más que dicha diferencia. Vimos en una nota precedente, que Séneca hizo constar el hecho y, en verdad, todo el mundo sabe hoy que no se comete en este caso ningun error apreciable al considerar la velocidad de la luz como infinita.

El procedimiento que se sigue es el siguiente: se mide con la mayor precision posible una distancia, á los extremos de la cual se sitúan los observadores. Uno de ellos produce un sonido, por medio de un procedimiento visible, por la detonacion, por ejemplo, de un arma de fuego, cuya luz, en el momento en que la percibe el segundo observador, indica el instante preciso en que empieza la conmocion sonora. El segundo observador anota el momento de la aparicion de la señal luminosa, valiéndose de un instrumento propio para calcular el tiempo, por ejemplo, un reloj de segundos; despues, aquel en que su oido percibe la primera impresion del sonido: el intervalo indica en segundos y fracciones de segundo, el tiempo que ha trascurrido entre estas dos fases del fenómeno. Es claro que dividiendo la distancia de las estaciones por el número que mida ese intervalo, se tendrá el espacio recorrido por el sonido en un segundo, es decir, su velocidad. Al proceder así, se parte del supuesto de que la velocidad del sonido es constante, lo cual puede demostrarse aproximadamente aparte de la operacion anterior, haciendo variar la distancia de las estaciones extremas ó estableciendo puestos de observacion intermedios.

Antes de describir los esperimentos mas modernos y precisos, vamos á hacer la historia sumaria de las determinaciones antiguas de la velocidad del sonido.

Como se verá, estas determinaciones están muy lejos de concordar unas con otras, lo cual no tiene nada de extraño, si se piensa en la poca precisión de los primeros procedimientos adoptados.

Parece ser que la medición mas antigua, fue debida á los académicos de Florencia, por el año 1660. Hallaron una velocidad de 1,448 pies, es decir, 372^m 90. El padre Mersenne habia obtenido ya indirectamente la velocidad del sonido, basándose en el fenómeno del eco ó reflexion del sonido; obtuvo el número de 972 pies ó sean cerca de 316 metros por segundo.

El primero de estos números era muy alto, el segundo demasiado bajo. Las demás mediciones distaban todavía mas de la verdad (1). Conviene decir que tales resultados apenas pueden inspirarnos confianza y hé aquí el por qué.

En primer lugar, en general, las distancias de las estaciones estremas se conocian imperfectamente. Hé aquí ya una primera causa de error. Otra causa de error, mas grave, consistia en la poca precisión de las mediciones del tiempo.

Así, el padre Mersenne habia reconocido que en un segundo, la voz podia pronunciar siete sílabas distin-

(1) La Enciclopedia, da los números siguientes para la velocidad del sonido en el aire, obtenida por diversos sábios; varios de estos números no están conformes con los que encontramos en otras publicaciones antiguas, diferencia que proviene de que los experimentos hechos por ciertos observadores, fueron múltiples y dieron resultados divergentes: esto es lo que no podemos decir. Hé aquí el pasa e en cuestion, que, por otra parte, no indica de ningun modo, las circunstancias en que se efectuaron las mediciones: «La velocidad del sonido, es diferente segun los varios autores que la determinan. Recorre el espacio de 968 pies en un minuto (errata de imprenta: léase *un segundo*) segun Mr. Isaac Newton; 1,500 segun Mr. Robert; 1,200 segun monsieur Boyle; 1,550 segun el doctor Walker; 1,474 segun Mersenne; 1,142 segun Mr. Flamsted y el doctor Halley; 1,148 segun la Academia de Florencia, y 1,172 pies, segun los antiguos experimentos de la Academia de Ciencias de Paris. Mr. Derham pretende que la causa de esta variacion procede en parte de que no habia una distancia suficiente entre el cuerpo sonoro y el lugar de la observacion y en parte tambien, de que no se habia tenido en cuenta la accion de los vientos.» No citamos estos resultados, sino para mostrar cual era todavía, hace dos siglos, la incertidumbre de los físicos sobre este punto de ciencia.

tas, y que un eco distante 81 toesas, las reflejaba todas exactamente en el segundo siguiente. Cada uno de los sonidos componentes de las siete sílabas, habia, por consiguiente, recorrido en un segundo el doble de la distancia del eco. Por eso, esta es una grosera aproximacion y no una medicion precisa.

Para comparar los resultados obtenidos, seria necesario ademas tener en cuenta el estado termométrico é higrométrico de la atmósfera, como tambien la fuerza, velocidad y direccion del viento. Más lejos se verá cómo estas circunstancias tan variables, influyen en la velocidad de la conmocion sonora; y en los mas antiguos experimentos, los físicos no se preocupaban en modo alguno de esas influencias.

Los primeros experimentos precisos se remontan al año 1758 y son debidos á la antigua Academia de ciencias de Francia. Una comision formada por tres sábios franceses: Lacaille, Cassini y Maraldi, eligió por estaciones de observacion, los puntos siguientes: en Paris, el observatorio y la pirámide de Montmartre; en las cercanías, el molino de Fontenay-aux-Roses y el castillo de Lay, en Montlhéry. Desgraciadamente, el tiempo no fue todavía medido sino en medio segundo proximalmente; la mayor parte de los cañonazos no fueron recíprocos, y por lo tanto la velocidad del viento influa en el fenómeno; por último, la temperatura solo se indicó vagamente. Hé aquí los resultados de los experimentos del 14 y 16 de marzo. El 14, á causa de una fuerte lluvia, el sonido recorrió la distancia de 11,756 toesas que separan á Montlhéry del Observatorio, en 68 segundos, promedio de los dos intervalos de ida y vuelta.

Esto hace 172^{e} , 9 por segundo. El 16, el promedio de dos cañonazos recíprocos entre las mismas estaciones, fue de $68^{\text{e}}43$, y por consecuencia, la velocidad de 172^{e} , 25.

La influencia del viento quedó entonces demostrada.

Si sopla en el mismo sentido en que se propaga el sonido, aumenta su velocidad; cuando va en dirección contraria, la disminuye y esto explica la necesidad de los cañonazos recíprocos. Más adelante veremos lo que dice Arago acerca de este punto. Si el viento sopla en dirección oblicua, la velocidad del sonido aumenta ó disminuye, según el ángulo que su dirección forme con la del viento (1).

Los mismos experimentos demostraron igualmente, que la velocidad del sonido en el aire, es uniforme, es decir, que recorre un espacio doble, triple, ... en un tiempo doble, triple, etc. Este hecho se puso en claro valiéndose de las estaciones intermedias.

En 1809 y 1811, Benzemberg hizo cerca de Dusseldorf varias mediciones de la velocidad del sonido, entre dos estaciones separadas por la distancia de 9,072 metros. Como los cañonazos no fueron recíprocos, la influencia del viento no fue eliminada, pero el tiempo era tranquilo y los observadores estaban provistos de buenos cronómetros.

Los resultados fueron los siguientes: velocidad del sonido á 2° sobre cero $555^m,2$ por segundo; á 28 grados, $550^m,78$.

Siguen despues los experimentos hechos en Madras en 1821, por un astrónomo inglés, Goldingham. Resultados: velocidad del sonido á 27°, $56,547^m,57$. Este número es el promedio de 800 observaciones. Los cañonazos se tiraban de los dos fuertes San Jorge y Santo Tomás, (2) y se oían en una estación distante de aquellos, $4,246^m,5$ y $9,059^m,2$.

(1) El valor de la componente de esta velocidad ó de su proyección sobre la dirección del movimiento del sonido.

(2) En el fuerte de San Jorge, en Madras, se disparaban los cañonazos por la mañana al despuntar el día, y por la noche á las ocho; en el monte Santo Tomás, se disparaban tambien los cañonazos al nacer el día y por la tarde al ponerse el sol. Se construyó un nuevo edificio dispuesto para dominar toda la comarca y sobre él fue donde el autor hizo sus observaciones por la mañana y por la tarde, en el momento en que se disparaba el cañon. (*Bulletin de Ferrussac*).

Llegamos ahora, por orden cronológico, á los experimentos que hizo, á propuesta de Laplace, la Oficina de Longitudes de Francia, en 1822. Componíase la comisión de cuatro miembros de la Oficina, Arago, de Prony, Bouvard y Mathieu, á la cual se agregaron Gay-Lussac y Humboldt.

Eligióse como una de las estaciones á Montlhéry, que también sirvió en 1758. Mas para evitar el paso del sonido á través de la atmósfera de una gran ciudad, en vez de Montmartre ó el Observatorio, se eligió por segunda estación un punto del distrito, Villejuif. Para apreciar el tiempo, se valieron de cronómetros suministrados por Breguet, los cuales acusaban décimas y aun (uno de ellos) $\frac{1}{70}$ de segundo. Arago, de Prony y Mathieu, se situaron en Villejuif; Gay-Lussac, Humboldt y Bouvard en Montlhéry.

En cada una de las estaciones se montaron dos piezas de artillería del mismo calibre, cargadas con cartuchos del mismo peso (1^k y $1^k,5$).

Los experimentos comenzaron el 21 de junio de 1822 á las diez y media de la noche y continuaron en la noche siguiente, á las once, en medio de un cielo sereno y una atmósfera casi tranquila. En cada estación se disparaba un cañonazo de diez en diez minutos á partir de una señal dada, y cada grupo de observadores anotaba el número de segundos transcurridos entre la aparición de la luz y la percepción del sonido.

En Villejuif se oyeron perfectamente todos los cañonazos disparados en Montlhéry, mientras que en esta estación apenas se oyeron los disparados en la otra. Sin embargo, Arago dice que «el poco viento que hacia soplaba de Villejuif á Montlhéry, ó mas exactamente, del N. NO. al S. SO.» Combinando los cañonazos recíprocos oídos de una y otra parte, se demostró que el sonido habia empleado por término medio 54 segundos y 6 décimas en salvar la distancia entre ambas estaciones. La tem-

peratura reinante fué de $15^{\circ}.9$; el higrometro marcaba 72° . Siendo la distancia total $18,612^m,32$, la velocidad del sonido fué por segundo $540^m,88$. Arago evaluó en $4^m,517$ el error probable que pudiera provenir de la incertidumbre de la medición de las distancias y de la apreciación del tiempo.

Se ha visto que para compensar la influencia del viento, se observaron varios cañonazos recíprocos; pero esta reciprocidad no fué siempre rigurosamente simultánea; los cañonazos combinados, estaban separados en Montlhéry y en Villejuif por intervalos de cinco minutos. Ahora bien, dice Arago: «si se observa que el viento es siempre intermitente y que entre dos fuertes bocanadas, hay frecuentemente momentos de una calma completa, se verá que no son demasiado considerables los intervalos de cinco minutos que hemos creído poder combinar como cañonazos correspondientes. Lejos de querer debilitar estas objeciones yo añadiría, si se quiere, que, en ciertos casos los cañonazos de las dos estaciones podrian partir en el mismo segundo, sin que la semi-suma de los dos tiempos de propagacion fuese independiente del viento. Supongamos, en efecto, que el 21 de junio, por ejemplo, hubiese comenzado á soplar en Villejuif una corriente de viento Norte en el momento de salir el tiro de la pieza: el sonido, más rápido que el viento, se habria propagado de esta estacion á Montlhéry como en una atmosfera tranquila, mientras que la detonación que hubiera partido en el mismo segundo de Montlhéry, encontraria á su paso una corriente de viento contrario ó del Norte, antes de llegar á Villejuif y esto retardaria mas ó menos su marcha. Mas ¿qué deducir de aquí sino que es necesariamente indispensable un tiempo tranquilo para llevar á cabo tales experimentos?» Bajo este punto de vista los experimentos de 1822, fueron tan satisfactorios como es posible. Ellos muestran, además, que la velocidad de propagacion del sonido es independiente de la carga

del cañon y por consecuencia de la intensidad del sonido.

En junio de 1825 dos físicos holandeses, Moll y Van Beek, efectuaron en Amersfoort una serie de experimentos con los cuales se propusieron averiguar la influencia del viento, cuya dirección y velocidad indicaban varios y precisos anemómetros. Reducida a cero y en el aire seco, se halló que la velocidad del sonido era de 352^m,05.

De Stampfer y De Myrbach, dos sabios austriacos, hallaron en 1822 el número 352^m,44.

Mencionemos todavía, antes de llegar a los experimentos contemporáneos, los que hicieron Bravais y Martin en 1844 y el número 352^m,37 que hallaron para la velocidad del sonido a la temperatura del hielo fundente y en el aire seco.

§ 2.— Condiciones que influyen en la velocidad del sonido.

La velocidad de propagación del sonido en el aire, puede calcularse por la teoría. Siendo el sonido, como se verá despues, un movimiento vibratorio que se propaga en los medios elásticos, se prueba que su velocidad depende á la vez de la elasticidad y la densidad del medio fluido en que se mueve. Cuando la presión a que está el gas sometido y por consiguiente su elasticidad, permanece la misma, la velocidad del sonido está en razón inversa de la densidad del gas; si, al contrario, la presión varía sin que cambie la densidad, la que varía es la elasticidad, y la velocidad del sonido es tanto mayor cuanto mayor sea dicha elasticidad. A Newton se debe la primera demostración teórica de estos principios: acabamos de enunciarlos sin formularlos rigurosamente (1).

(1) La fórmula de Newton es $V = \sqrt{\frac{g h}{d}}$ en la cual V es la velocidad del sonido, h la presión atmosférica que mide la elasticidad del aire y d la intensidad de la gravedad. Para una presión constante de 0m,76, la densidad d varía

La presión y la densidad varían en el aire atmosférico precisamente en la misma relación, siempre que la temperatura permanezca constante; la velocidad del sonido sólo varía con la temperatura. La experiencia confirma esta previsión de la teoría.

De ahí resulta que para que sean comparables los resultados de los diversos experimentos que han efectuado los físicos sobre la velocidad del sonido en la atmósfera, deben ser referidos á una misma temperatura. También es preciso hacer una corrección relativa al estado higrométrico del aire. Se ha convenido en referir la velocidad de que se trate á la que tendría el sonido en el aire seco y á la temperatura de 0° centígrados ó la del hielo fundente. Recíprocamente, dada la velocidad del sonido en estas circunstancias, se puede averiguar la que tendría á una temperatura más alta ó más baja. La corrección que hay que hacer es de 0^m,626 por cada grado centígrado, cantidad que se añade si la temperatura se eleva, y se resta en el caso contrario.

Discutiendo las condiciones de los diversos experimentos arriba mencionados, M. Le Roux ha calculado el cuadro siguiente de la velocidad del sonido á 0 grados:

1738	Academia de Ciencias.	332 ^m 00
1811	Benzenberg.	332 33
1821	Goldingham.	331 40
1822	Oficina de Longitudes.	330 64
1832	Stampfer y de Myrbach.	332 44
1823	Moll y Van Beek.	332 25
1844	Bravais y Martins.	332 37

Cinco de estos siete experimentos dan con poca diferencia 532 metros para la velocidad del sonido. Los

con la temperatura h y entonces la fórmula se convierte, si se reemplazan g y h por sus valores numéricos, en:

$$v = 279^m \sqrt{1 + 0,00566 t.}$$

Esta fórmula es incompleta: ha sido modificada por Laplace y más adelante diremos el por qué.

dos restantes dan un número algo más bajo. Mas no debe olvidarse que las distancias recorridas fueron muy desiguales, que las temperaturas observadas eran las de los puntos extremos; y que, como ha observado Arago, la influencia del viento no fue evitada como lo hubiera sido valiéndose de cañonazos recíprocos. Por consiguiente, la diferencia de 4^m,80 entre los resultados más divergentes, nada presenta de extraño y se explica por las diferencias probables de las condiciones en que se encontrasen las capas del aire intermedias atravesadas por el sonido en el momento en que se efectuaron los experimentos correspondientes.

En todos los que hemos referido, excepto los de Bravais y Martins, Stampfer y Myrbach, la dirección del sonido era casi horizontal; y por tanto, las velocidades del sonido observadas se refieren únicamente á dicha dirección. Pero propagándose el sonido esféricamente alrededor del centro de conmoción, ¿conserva la misma velocidad en las direcciones verticales que en las que son oblicuas al horizonte? Si así es, la propagación de una agitación sonora entre dos puntos de altitud diferente, debe verificarse en el mismo tiempo ora vaya el sonido de alto abajo, ora marche de abajo arriba. La teoría indica que no debe haber en ello diferencia. De una estación baja á una estación elevada, la presión barométrica ó la elasticidad del aire disminuye; mas su densidad varía en la misma relación. Solamente cambia la temperatura, y se sabe que la velocidad del sonido depende de ella. A medida que las capas de aire son más frías dicha velocidad va decreciendo progresivamente. Un sonido que parte de la estación baja camina, pues, hacia la estación elevada recorriendo espacios cada vez más pequeños en cada uno de los segundos del trayecto. Si sale de la estación elevada sucede lo contrario: el sonido se propaga con velocidades crecientes en el mismo grado que en el caso anterior eran decrecientes. Siendo

así, la duración total del trayecto debe ser la misma en ambos casos.

Para comprobar estas deducciones del razonamiento hicieron De Stampfer y De Myrbach, en 1822, en Salzbourg (Tyrol) los experimentos de los cuales hemos dado ya los resultados. La diferencia de nivel de las estaciones era de 1564 metros; se halló que la velocidad del sonido ascendente era la misma que la del sonido descendente; mas, como estos resultados se obtuvieron en una sola noche de observaciones, dos sabios franceses, A. Bravais y Martins, creyeron deber repetir aquellos experimentos y así lo hicieron en 1844, veintidos años mas tarde que los físicos austriacos. Las estaciones elegidas estaban situadas, una en la cima del Faulhorn en los Alpes bernianos; la otra en el pueblo de Tracht junto á Brienz y sobre las orillas mismas del lago de este nombre. La diferencia de altitud entre ambas estaciones era de 2400 metros y la distancia oblicua recorrida por el sonido, 9650 metros. Los sonidos eran producidos por la detonacion de dos cajas ó cañones cortos de fundicion; los observadores estaban provistos de escelentes contadores y de cronómetros. El sonido empleó por término medio 28,55 segundos en salvar la distancia oblicua de las estaciones. La temperatura media era de $8^{\circ},2$. La velocidad era pues, de $558^m,01$ y suponiendo que la temperatura hubiese decrecido regularmente de una estacion á otra, los observadores formularon del modo siguiente el resultado hallado:

«*Velocidad igual de los sonidos ascendentes y descendentes, á razon de $552^m,4$ en el aire seco á la temperatura del hielo fundente.*»

La influencia de la temperatura en la velocidad del sonido es bien evidente con solo examinar los resultados obtenidos por los diversos experimentadores que han observado á temperaturas comprendidas entre 1° ó 2° grados y 59° centígrados. Esta misma influencia que

la teoría demuestra, ¿se verifica á temperaturas estremas, durante los grandes frios ó los grandes calores? Como ejemplo de velocidades del sonido determinadas á temperaturas notablemente inferiores el hielo fundente, se citan las del teniente Kandalle en la América del Norte, que dieron $515^m,9$ á 40° , y las del capitán Parry en las mismas regiones, quien obtuvo $509^m,2$ á $38^\circ,5$. Reducidas estas velocidades á cero se convierten en $559^m,5$ y $555^m,2$. No habiendo sido recíprocos los cañonazos, la diferencia que se advierte en ambos números puede provenir de la influencia del viento.

§ 3.—Recientes experimentos sobre la velocidad del sonido.

Llegamos ahora á los experimentos mas recientes. M. F. P. Le Roux, despues de una discusion de los resultados precedentes, llegó á la conviccion de que las divergencias en los números que manifiestan la velocidad del sonido á 0° y en el aire libre privado de humedad, procedían principalmente de haber estimado como demasiado baja la temperatura de las capas aéreas realmente recorridas por la onda sonora. De los trabajos meteorológicos contemporáneos de Babinet, Bequerel y Martins y de las observaciones aerostáticas hechas por Glaisher, resulta que la temperatura á diferentes altitudes varia según una ley mas complicada de lo que se pensaba y que durante la noche alcanza, particularmente á cierta distancia, uno ó varios máximos. De aqui el pensamiento, que ese sábio físico ha realizado en parte, de efectuar varios experimentos con los cuales podamos ponernos al abrigo de esas causas de error.

El principio del método experimental de Le Roux es este: colocar á una distancia poco considerable dos membranas elásticas de gutapercha muy delgada, por ejemplo. Una onda sonora que las encuentra sucesivamente y las conmueve, determina la ruptura de una

corriente eléctrica que recorre un aparato de inducción cuya chispa vendrá á dejar su huella sobre un cronoscopio dispuesto al efecto. No habiendo encontrado una calma atmosférica lo suficientemente perfecta para verificar el experimento al aire libre, se limitó á un caso particular reducido á «determinar sin auxilio del oído la velocidad de propagación de una conmoción solitaria en una masa gaseosa privada de humedad, de temperatura exactamente conocida y encerrada en un tubo cilíndrico y cuya estension sea recorrida en una fracción de segundo.»

El tubo empleado por Le Roux era de zinc encorvado sobre sí mismo en dos porciones iguales unidas por un codo circular. El aire estaba desecado y su temperatura sostenida á 0° por hielo fundente contenido en un baño que cubría al tubo por todos lados. La conmoción sonora se producía por el choque único de un martillo de madera, tocando una membrana de cautchuc fuertemente tensa en una de las estremidades del tubo. Después de haber recorrido la conmoción el tubo en toda su longitud, llegaba á poner en movimiento la segunda membrana tensa en la otra estremidad. El origen y fin de la propagación sonora, eran registrándose automáticamente, cómo hemos dicho por medio de la electricidad (1). De una serie de 77 experimentos hechos con la precisión que caracteriza á los trabajos de este sábio físico, y discutidos rigurosamente, resulta que

(1) Indiquemos también cómo Mr. Le Roux anotaba el tiempo y medía la duración de la propagación. El cronoscopio ideado por él era en extremo ingenioso. Dispuso una regla verticalmente en reposo, y luego abandonada libremente á la acción de la gravedad. Esta regla se recubría en una parte conveniente de su superficie de una hoja de plata ó de metal plateado previamente sometida á la acción de los vapores de iodo. Durante el tiempo de la caída de la regla, tenía efecto el choque del martillo sobre la membrana de partida y luego la propagación de la onda y su llegada á la otra membrana situada al extremo del tubo. Las chispas que saltaban en los instantes precisos del origen y fin de la conmoción, dejaban sus huellas en dos puntos de la superficie de la regla. La distancia de estos puntos permitía calcular el intervalo de tiempo que, según la ley de caída de los cuerpos, había transcurrido entre dichos instantes. De este modo se medía la duración del fenómeno.

la velocidad del sonido á 0° en el aire seco es 350 metros 66. Mr. Le Roux cree, que reunidas todas las causas de incertidumbre ó error, no pueden producir una diferencia mayor de 20 centímetros sobre este resultado, número casi idéntico al que arrojaron en 1822 los experimentos de la Oficina de Longitudes.

Mientras que Le Roux se ocupaba en medir la velocidad del sonido en condiciones perfectamente definidas y poniéndose al abrigo de las causas que pudieran influir en aquella, Regnault, procuraba, por el contrario, variar de todos los modos posibles sus experimentos á fin de determinar esas mismas influencias. Démos, segun el resumen del sábio académico, una idea de los principales resultados á que llegó, y así el lector tendrá un análisis completo de los trabajos efectuados en este punto concreto de la ciencia del sonido.

Cuando Newton, Lagrange y Euler buscaron una fórmula que espresase la velocidad de las ondas sonoras, supusieron que el medio fluido vehículo del sonido era un gas *perfecto*, dotado de una elasticidad que no sufría alteracion por los cuerpos ambientes; que los cambios debidos á las variaciones de presion seguian rigurosamente la ley de Mariotte y que las ondas sonoras se propagaban sin que hubiere en ellas trasporte de las masas gaseosas. Se ha visto que el número que dá la velocidad teórica del sonido en esas hipótesis, es notablemente inferior á la velocidad observada (cerca de $\frac{1}{6}$) y se creyó en un principio que la diferencia provenia de las causas de error inherentes á los procedimientos de observacion. Laplace halló la razon de ello. Demostró que las condensaciones sucesivas del aire producian un desprendimiento de calor en el trayecto de las ondas; que la elasticidad en consecuencia se aumentaba (1), y que la velocidad teórica del so-

(1) Tyndall prueba muy bien en su bella odra *El Sonido*, que las dilataciones de que va seguida cada condensacion no compensan, por el enfria-

nido era realmente mas grande que lo que habian encontrado Newton y sus sucesores. De aquí una fórmula mas completa, mas verdadera; pero calculada, en la hipótesis de un gas perfecto.

Ahora bien; esas condiciones de elasticidad perfecta de los gases no existen realmente. Sabido es (Regnault lo habia probado hace algun tiempo) que todos los gases se apartan mas o menos de la ley de Mariotte; lo mismo sucede con las otras condiciones, como así lo han probado los recientes experimentos del mismo sabio. Su fórmula difiere, pues, de la de Newton modificada por Laplace. Faltaba comprobar por experimentos convenientemente efectuados la influencia de cada una de esas infracciones á la antigua hipótesis teórica sobre la velocidad real de las ondas sonoras.

Mr. Regnault se ocupó desde luego del estudio de la propagación del sonido en tubos cilíndricos rectilíneos.

Segun la fórmula de Laplace, la velocidad del sonido es independiente de la intensidad. No se considera lo mismo en la fórmula mas completa dada por Regnault; ella es, por el contrario, tanto mayor, cuanto mayor es la intensidad. Fuera de esto se admitia que en un tubo cilíndrico rectilíneo, la velocidad debia conservarse indefinidamente la misma. Pues bien, los experimentos de Regnault prueban que esto no es así; sino que la intensidad va debilitándose continuamente á medida que el diámetro del tubo es mas pequeño, lo cual atribuye el principalmente á la reacción de las paredes elásticas del tubo (1). En efecto, un tiro de

miento que las acompaña, el efecto de los desprendimientos de calor; que, al contrario, ellas contribuyen de la misma manera á acelerar la velocidad de propagación de las ondas. Para éstos desarrollos teóricos que solamente quisiéramos indicar, remitimos al lector á su obra y á los tratados de acústica matemática. Tenemos haber traspasado ya los límites de una esposicion elemental y completamente experimental.

(1) Mr. Regnault dice á este propósito que en el trayecto de la onda sonora en el interior de la alcantarilla San Miguel, se oia en el exterior un sonido muy fuerte en el momento del paso de la onda en cualquier punto de la línea en que uno se colocase. «Una porcion notable de la fuerza viva, dice, se gasta, pues, en la parte de afuera.»

pitola cargada con un gramo de pólvora, da un sonido que no es ya percibido por el oído cuando llega a recorrer:

1150	metros en un tubo de 108	milímetros de diámetro
3810	— — — — —	300
9340	— — — — —	1100

Esto demuestra a la vez que la intensidad no es constante y que la debilitación del sonido es mas considerable en los tubos de pequeño diámetro. Luego la velocidad del sonido está lejos de ser en ellos la misma. Reducida á cero grados y en el aire seco, esta velocidad varia:

De 530^m,99 á 527^m,52 para caminos recorridos de 566^m,7 á 2,833^m,7 cuando la carga de pólvora era de 5 decigramos.

De 529^m,93 á 526^m,77 por caminos de 1,331^m,95 á 4,053^m,85 siendo la carga de 4 decigramos. Estas velocidades son relativas á la propagacion de la onda sonora en el tubo mas pequeño de 108^m de diámetro. Hé aquí ahora las velocidades igualmente variables en los otros dos tubos, según la longitud de los caminos recorridos:

Tubo de 500	De 552m 57 á 530m 54	para caminos de 1,905m á 5,810m
milímetros.	De 530m 43 á 528m 96	— 7,620m á 15,240m
Tubo de 1,100	De 533m 16 á 531m 24	749m á 5,672m
milímetros.	De 530m 87 á 530m 52	8,508m á 19,851m

Cuanto mas cerca se toman las velocidades del punto de partida, son mayores; pero las cifras que preceden demuestran tambien la influencia de los diámetros de los tubos (1). Regnauld cree que la acción de

(1) Es probable, añade, que la naturaleza de la pared, su pulimento mas ó menos perfecto, ejerza una influencia sobre este fenómeno. Citaré un hecho que da la prueba de ello. En alcantarillas de París en gran sección, se avisa ordinariamente á los obreros por el sonido de la trompeta; pues bien, se ha demostrado que esas señales se propagan incomparablemente á mas distancia en las galerías que cuyas paredes están recubiertas de un cemento bien liso, que en aquellas que están formadas por la obra bruta.

las paredes sobre la propagacion del sonido era ya muy pequeña en los tubos de mayor diámetro 4^m, 40, y que, en este caso, puede considerarse esa influencia como nula, siendo entonces la velocidad, con corta diferencia, la misma que la del sonido en el aire libre. De sus numerosos experimentos saca la conclusion siguiente:

«Que la velocidad media de propagacion en el aire seco y á cero de una onda producida por un tiro de pistola, y contada desde la boca del arma hasta el momento en que se debilita de tal modo que ya no puede afectar las membranas mas sensibles, es de 250^m, 6.»

Como se vé, este número es casi idéntico al obtenido por Mr. Le Roux; permitido será, por consiguiente, considerarlo como exacto, y tanto mas, cuanto que los experimentos hechos por Regnault, por el método de los tiros de cañon reciprocos, le han dado 550^m, 7 para un trayecto total de 2,445 metros. Añadamos á esto, que el sábio fisico ha comprobado directamente la ley segun la cual, la velocidad del sonido es independiente de la presion.

Los experimentos de Regnault han revelado que la velocidad del sonido, al menos en las columnas gaseosas limitadas por cilindros de pequeño diámetro, no es independiente de la intensidad de la onda sonora. Otra cualidad del sonido, su altura, ó sea su mayor ó menor gravedad ó agudez, no parece tener la menor influencia sobre dicha velocidad. Esta es una esperiencia que todo el mundo puede efectuar, escuchando desde lejos una pieza ó un canto musical y mejor todavía, un concierto de instrumentos ó de voces. En tales circunstancias, los sonidos están ligados unos á otros por relaciones rigurosamente constantes: en la melodia por el ritmo y la mesura, en la armonía, por su concomitancia. Pues bien; la esperiencia prueba que ni las melodías ni los acordes sufren alteracion alguna por la audicion á distancia, lo cual sucederia necesariamente si los sonidos se propagasen con una velocidad diferen-

te, según su altura. Por lo demás, Biot, en sus experimentos sobre la velocidad del sonido en la fundición de hierro, que más adelante se consignan, ha comprobado este hecho en una distancia de cerca de un kilómetro. «Para saber, dice, si los sonidos graves ó agudos, fuertes ó débiles, se propagan con igual velocidad, ó si había entre ambos, bajo esta relación, alguna diferencia, hice tocar una flauta en una de las estremidades del tubo. Sabido es que, en general, un canto musical está sujeto á cierta medida que regula muy exactamente el intervalo de los sonidos sucesivos. Por consecuencia, si algunos de los sonidos se hubiesen propagado más rápida ó lentamente que los otros, al llegar á mis oídos, se habrían confundido con los que les precedían ó les seguían en el orden del canto, y este, oído de tal modo, habría parecido completamente alterado. Pero no ocurrió nada de esto; antes bien, aquel era perfectamente regular y conforme á su medida natural; de donde se infiere que todos los sonidos se propagan con igual velocidad. Esta observación había sido ya hecha por los miembros de la Academia de Ciencias; ignoro por qué procedimientos.»

Mr. Regnault ha comprobado también un fenómeno que pasó desapercibido á los físicos que habían medido antes que él la velocidad del sonido. Nos referimos al movimiento de transporte de las capas aéreas, el cual aumenta la velocidad de propagación. A consecuencia de este transporte y de su gran densidad, dice, la onda debe marchar más deprisa, sobre todo en la dirección de la línea del tiro, en las primeras partes del trayecto, que en las siguientes. Pero muy pronto se apaga esta aceleración y se hace insensible cuando la onda atraviesa grandes distancias. Este movimiento de transporte fue observado ya por Biot, pero no en el aire libre, cuando llevó á cabo los experimentos de que hemos hablado más arriba. «En la columna cilíndrica de la cual me serví en mis experimentos, los pistoletazos producidos

en una de las estremidades ocasionaban tambien en la otra una esplosion considerable cuando la conmocion llegaba a ella. El aire era despedido del último tubo con la suficiente fuerza para producir sobre la mano un viento impetuoso, lanzar á mas de medio metro de distancia los cuerpos ligeros que se colocaban en su dirección y para apagar algunas bugías; y todo esto á pesar de que el tiro se descargó dos segundos y medio antes á una distancia de 951 metros.»

La velocidad del sonido en los gases diferentes del aire se calcula teóricamente mediante una ley muy sencilla que no podemos indicar. Tambien se la mide experimentalmente por el método llamado de las vibraciones, sirviéndose para ello de tubos sonoros. Hé aquí algunos resultados obtenidos, siguiendo este último método, por Werthein:

Gases.	Velocidad del sonido á 0°.
Aire.	333m
Acido carbónico.	262
Oxígeno.	317
Hidrógeno.	1,270
Oxido de carbono.	337
Amoniacó.	407

Regnault midió directamente la velocidad del sonido en algunos gases, llenando de ellos dos conductos, uno de 567^m,4 y otro de 70^m,5 de longitud. De este modo halló 1,257 metros para el hidrógeno, velocidad igual á 5,801 veces la del sonido en el aire; 279 metros para el ácido carbónico, 406 metros para el amoniaco.

§ 4.—Medicion de distancias por la velocidad del sonido en el aire.

Tomemos ahora el número 350^m,6 para la velocidad del sonido en el aire libre y seco á 0° y deduzcamos de él los valores aproximados de dicha velocidad á

temperaturas diferentes por encima y bajo cero. Ya se vió en otro lugar que para pasar de un grado á otro por encima y bajo cero, bastaba agregar ó disminuir á la velocidad el número sensiblemente constante $0^m,626$. Hé aquí la tabla que de ello resulta:

VELOCIDADES DEL SONIDO EN EL AIRE LIBRE.

TEMPERATURAS en grados centígrados.	VELOCIDAD por segundo en metros.	TEMPERATURAS en grados centígrados.	VELOCIDAD por segundo en metros.
— 20°	318.10	+ 41°	337.53
— 15°	321.25	42°	338.16
— 14°	321.88	43°	338.79
— 13°	322.41	44°	339.42
— 12°	323.04	45°	340.05
— 11°	323.67	46°	340.68
— 10°	324.30	47°	341.31
— 9°	324.93	48°	341.94
— 8°	325.56	49°	342.57
— 7°	326.19	20°	343.20
— 6°	326.82	21°	343.83
— 5°	327.45	22°	344.46
— 4°	328.08	23°	345.09
— 3°	328.71	24°	345.72
— 2°	329.34	25°	346.35
— 1°	329.97	26°	346.98
0°	330 ^m 60	27°	347.61
+ 1°	331.23	28°	348.24
2°	331.86	29°	348.87
3°	332.49	30°	349.50
4°	333.12	31°	350.13
5°	333.75	32°	350.76
6°	334.38	33°	351.39
7°	335.01	34°	352.02
8°	335.64	35°	352.65
9°	336.27	40°	355.80
10°	336.50	50°	362.10

El conocimiento de estos números puede servir para medir rápidamente, con cierta aproximación, la distancia de dos puntos, siempre que no estorbe á la vista ningun obstáculo en el espacio que entre ellos medie.

Pongamos un ejemplo. Se divisa á lo lejos, en el campo, un cazador que descarga su escopeta. Si se cuenta con un reló de segundos el tiempo que trascurre entre la vista del fuego del arma y la llegada al oído de la detonación, por medio de una simple multiplicación se podrá calcular la distancia que separa al testigo del cazador. Es necesario llevar en el bolsillo un termómetro para medir la temperatura. En rigor, también sería menester que el cazador mismo estuviese provisto de un termómetro; preferible á esto sería todavía que éste pudiese observar y oír un tiro descargado por el primer observador. A falta de estos medios se hace un cálculo aproximado. Los viajeros, los marinos, los soldados en campaña, pueden sacar útilmente partido de esta manera espedita de medir las distancias. Hé aquí segun Mr. Radean (*Acústica*) algunos pormenores acerca del empleo que ha hecho de este método nuestro sábio compatriota Mr. d'Abbadie en su larga estancia en Etiopía: «En la isla de Mocawa, durante el Ramadan ó mes de medio ayuno de los musulmanes, todas las tardes á la caída del sol, se tira un cañonazo que anuncia la suspensión del ayuno. De tal hecho se aprovechó Mr. Antonio d'Abbadie para observar el tiempo que pasaba entre el fogonazo y la llegada del sonido á la ribera opuesta. Tomó por estación lo alto de una colina cerca del pueblo de Omkullu, sobre tierra firme y allí oía el cañonazo del fuerte Mudir. El sonido llegó á él 18 segundos despues de ver el fuego que acompaña á la detonación; la distancia era por consiguiente, 6,440 metros (1).» Otra vez Mr. d'Abbadie

(1) Esto supone una temperatura de 45° centígrados: la velocidad del sonido es entonces de 357m,7 por segundo. Falta saber si se corrigió la influencia del viento.

midió por el mismo procedimiento la distancia de la ciudad de Adoua al monte Saloda.

Hé aquí los detalles que Mr. d'Abdadie comunica, con fecha 15 de agosto de 1844, acerca de esta aplicación de la física á la geodesia.

«Hoy hemos hecho varios esperimentos para medir por la velocidad del sonido la distancia de la cima del monte Saloda cerca de esta ciudad (Adoua), hasta el techo de la casa de Ayta Tasfa, en la parroquia de Maihané Alam, donde reside actualmente el prefecto de la mision católica de Etiopía. Mi hermano, situado sobre la cumbre del monte y junto á la cresta de un peñasco saliente, empleaba un fusil y yo tiraba con una espingarda. Lienzos blancos estendidos servian de señales. Yo empleé el cronómetro contador y mi hermano el cronómetro G., cuyas pulsaciones contaba.

»Nuestros tiros se oian muy bien; los de mi hermano eran distintos, pero muy débiles. Es de notar que mientras el viento marchaba oblicuamente hácia el monte, mi hermano percibia no obstante, el sonido más lentamente que yo. Inmediatamente despues de los seis tiros de fusil, observamos los termómetros.»

El resultado fue que la distancia que se buscaba era igual á 5 kilómetros.

No vacilamos en recomendar este método tan rápido y cómodo de medir las distancias á los oficiales y sargentos de nuestro ejército. Aun sin termómetro, ni reloj de segundos, con un poco de hábito se pueden contar los segundos y determinar la temperatura con bastante aproximacion. La luz que sale de la boca de un arma de fuego se ve mal en un dia claro; mas en un tiempo nublado el fognazo puede hacerse visible; y á falta de esto puede observarse la humareda que produce la descarga. Veamos un ejemplo: una batería enemiga tira un cañonazo y se cuentan, entre el fognazo y la detonacion, 45 minutos próximamente; el oficial que observa supone una temperatura de 42°. La dis-

tancia se averigua multiplicando 538^m por 15, es decir, que es igual á 5,070 metros. Supongamos ahora que la temperatura marcada por el termómetro fuera realmente 10° y que un reloj de segundos hubiese dado 14^s, 5; la distancia es, pues, en realidad 536^m × 14, 5 ó 4,885 metros: El error es de 185 metros, cerca de $\frac{1}{20}$ de la distancia verdadera, inexactitud que no es

muy considerable en este caso. Como se ve, la parte de error de mas cuantía es la que pueda provenir de la evaluacion del tiempo. Pero un reloj de segundos y un termómetro de bolsillo, no son objetos tan raros que no se pueda á veces emplear este método con esperanza de obtener buen resultado.

Aplicando este mismo procedimiento se puede medir la distancia á que se halla de nosotros una nube tempestuosa, de la cual vemos salir relámpagos seguidos de truenos. En efecto, el instante en que se ve el surco luminoso ó estalla la gigantesca chispa, es tambien el mismo en que se produce la detonacion en la nube. Contando el número de segundos trascurridos entre el relámpago y el ruido del trueno, y multiplicando este número por la velocidad del sonido (340^m á 550 para temperaturas comprendidas entre 15° y 50°), se tiene la distancia del ojo á la nube tempestuosa. Cuando el rayo cae á poca distancia del espectador, el trueno sucede casi instantáneamente al relámpago; pero si el espectador es herido por aquel, no tiene tiempo de distinguir el uno del otro. De esto se deduce que el *relámpago visto* no es peligroso y que las personas tímidas pueden tener confianza cuando vean la chispa y esperar tranquilamente el trueno. Esto no quiere decir que puedan confiar lo mismo en los truenos que vengan despues.

*Por término medio, se deben contar de 2 á 5 segundos por cada kilómetro de distancia, 28 á 29 segundos por 1 miriámetro, ó 2 leguas y media.

De la diferencia que existe entre las velocidades de

la luz, del sonido y de los proyectiles, resultan consecuencias singulares. Así, el soldado herido por una bala de cañon, puede ver el fuego que sale de la boca del arma; pero no oye la detonacion, porque la velocidad del sonido es menor que la que lleva la bala; con todo, cuando es herido á una gran distancia, la resistencia del aire va disminuyendo cada vez mas la velocidad del proyectil y esto hace que algunas veces pueda ver la luz y despues oir el ruido de la detonacion antes de ser alcanzado.

«Si varios soldados dispuestos formando un círculo, dice Tyndall, disparan sus fusiles al mismo tiempo, para una persona colocada en el centro del círculo, todas las detonaciones sólo formarán una. Pero si los soldados están en fila, un observador situado en la misma línea, mas allá de una de las estremidades de la fila, oirá, en vez de un sonido único, un redoble prolongado. La descarga del rayo en los diversos puntos de una nube de gran estension, suele de este modo producir el tableteo prolongado del trueno. Una larga fila de soldados que caminen con la música al frente, no pueden marchar cadenciosamente porque las notas musicales no llegan simultáneamente al oido de los soldados que van delante y detrás.» (*El Sonido*).

§ 5. — Velocidad del sonido en los líquidos.

Se ha visto que el sonido se propaga en el agua y en general en los líquidos lo mismo que en el aire; pero en este caso la velocidad de propagacion es mayor. Laplace encontró su valor por medio de la teoría, valor que depende á la vez de la densidad del líquido y de su compresibilidad. Segun él, la velocidad del sonido en el agua de lluvia debe ser $4\frac{1}{2}$ veces, y en el agua del mar 4 veces $\frac{7}{10}$ tan grande como la del sonido en el aire.

Los primeros experimentos sobre esta cuestion los hizo Beudant en Marsella por un procedimiento completamente semejante al que ha servido para medir la velocidad del sonido en el aire. Formaban las estaciones extremas dos lanchas del puerto, cuya distancia se sabia. Una campana sumergida cerca de una de ellas, que se golpeaba al dar una señal visible, producía el sonido, que un buzo escuchaba en la otra estacion. Beudant halló 4,500 metros de velocidad de propagacion en un segundo, número que no difiere mucho del que daría la fórmula teórica de Laplace.

Tócanos ahora hablar de los experimentos que dos sábios franceses, Colladon y Sturm, hicieron en 1827 en el lago del Ginebra. Hé aquí cómo procedieron.

Los observadores se apostaron sobre dos barcas, la una amarrada en Thonon, la otra en la ribera opuesta del lago. El sonido era producido por el choque de un martillo sobre una campana sumergida en el agua, y en la otra estacion, una trompetilla acústica de largo pabellon, recibía, también en el agua, sobre una hoja metálica tensa en su abertura, el sonido propagado por la masa líquida. El observador que tenía aplicado su oído á la trompetilla, estaba provisto de un cronómetro ó contador que acusaba con precision los segundos y las fracciones de segundo. Era advertido del instante preciso de la percusion de la campana, por la luz que producía la inflamacion de cierta cantidad de pólvora, cuya inflamacion se llevaba á efecto bajando una mecha atada al martillo en forma de palanca.

La distancia de las estaciones, que era de 45,487 metros, la recorrió el sonido en 9 segundos, $\frac{1}{4}$, lo que da 4,455 metros para la velocidad del sonido en el agua á la temperatura de 8 grados. A esta misma temperatura hemos hallado 355^m, 64 para la velocidad del sonido en el aire libre. La esperiencia prueba también que el sonido se propaga 4 veces y media mas velozmente en el agua dulce que en el aire.

En ambos experimentos, las ondas sonoras se propagaban en una masa líquida indefinida. Wertheim ha demostrado que el sonido debía propagarse con menos velocidad en una columna ó en un hilillo cilíndrico, siendo la primera velocidad igual á la segunda multiplicada por el número 1,255. Varios experimentos muy delicados, efectuados por un método que no podemos describir aquí, le han dado los resultados siguientes:

Velocidad del sonido.

	Temper.	En un hilillo líquido.	En una masa ilimitada.
Agua del Sena. . .	15°	1173m	1437m
—	30°	1251	1528
—	60°	1408	1725
Agua del mar. . .	20°	1187	1454
Alcohol ordinario			
de 36°	20°	1050	1286
Eter sulfúrico. . .	0°	946	1159

En un mismo líquido, como en el aire, la velocidad del sonido aumenta con la temperatura.

§ 6.—Velocidad del sonido en los sólidos.

La velocidad del sonido, que es mayor en los líquidos que en el aire y los demás gases, es todavía mas considerable en los medios sólidos. Creemos que las primeras tentativas para determinar esta última, fueron hechas por Hassenfratz. Hé aquí lo que sobre el particular dice Haüy en su *Tratado de Física*.

«Habiendo Hassenfratz descendido á una de las canteras situadas por la parte baja de París, encargó á uno que golpease con un martillo contra una masa de piedra que forma el muro de una de las galerías subterráneas. Mientras tanto, él se alejaba poco á poco del

punto que sufría los golpes del martillo, teniendo cuidado de aplicar el oído á la masa de piedra. No tardó mucho en distinguir dos sonidos, uno de los cuales era transmitido por la piedra y el otro por el aire. El primero llegaba al órgano auditivo con mucha mayor rapidez á medida que se alejaba el observador, de tal suerte, que dejó de ser percibido á la distancia de 154 pasos, en tanto que el sonido transmitido por el aire se apagó á la distancia de 400 pasos.

»Cuerpos de naturaleza diversa tales como barreras de madera y series de barras de hierro dispuestas en una estension mas ó menos considerable, han dado resultados análogos, con la diferencia de que el sonido propagado por la madera recorria un intervalo mayor que el sonido transmitido por el aire, antes de llegar al término en que llegaba á ser nulo para el oído, lo cual era el efecto inverso del que presentaba la comparación del aire seco con la piedra. El mismo físico ha observado además, que no solamente la trasmision del sonido á través de los cuerpos sólidos es en general mas rápida que la que se efectúa por el intermedio del aire, sino que emplea un tiempo inapreciable, al menos relativamente á las distancias á que se han limitado estos experimentos y de las cuales la mas grande fue de 210 pasos.»

Biot hizo experimentos análogos, pero en estension mas considerable y por medios mas precisos. Utilizó la larga columna de tubos de hierro fundido destinados á conducir las aguas del Sena desde Marly al acueducto de Luciennes: 576 tubos formaban así una estension total de 951^m, 2. Hé aquí cómo este sábio ha descrito él mismo su experimento: «Se adaptó á uno de los orificios de esta cañería un anillo de hierro del mismo diámetro con un timbre en su centro y un martillo que se le podia dejar caer á voluntad. Al golpear el martillo sobre el timbre daba tambien contra el tubo, con el cual estaba en comunicacion por el contacto del anillo

de hierro. De modo que colocándose en la otra estremidad de la cañería, se deberían oír dos sonidos, uno transmitido por el metal del tubo, y el otro por el aire. Así fue, en efecto; ambos se oían distintamente aplicando el oído contra los tubos, y aún sin aplicarlo. El primer sonido, mas rápido, era transmitido por el cuerpo de los tubos; el segundo por el aire. Dando martillazos sobre el último tubo se producía también esta transmisión habiéndose observado cuidadosamente con cronómetros de medios segundos el intervalo de los dos sonidos transmitidos. He encontrado por estos experimentos que el sonido se transmitía 10 veces y media mas velozmente por el aire.» En efecto, hubo un intervalo de $2^s,55$ entre los dos sonidos transmitidos, siendo la velocidad del sonido en el aire $340^m,05$. Pero es preciso notar, que estando el conducto formado de muchos tubos unidos por rodajas de materias diferentes, este número no puede dar exactamente la velocidad del sonido en la fundición.

La velocidad del sonido en los sólidos puede calcularse directamente por consideraciones teóricas como la velocidad en los líquidos, ora sea buscando el coeficiente de elasticidad del cuerpo, ora por el método llamado de las vibraciones. Laplace encontró por el primer método que la velocidad del sonido en el latón era 10 veces y media mayor que la velocidad en el aire. Chaldni calculó dicha velocidad en diversos metales, en el vidrio y en gran número de especies de madera. Después, Wertheim determinó este valor en gran número de cuerpos sólidos. Mas adelante damos una tabla de algunos de los resultados obtenidos por este medio.

Mas también se han hecho algunas mediciones directamente. Así midieron en 1851 Wertheim y Breguet la velocidad del sonido en los alambres telegráficos del ferro-carril de Versalles (línea recta). El sonido recorrió en $1^s,2$ el espacio de $4,067^m,2$, que corres-

ponde á una velocidad de 3,485 metros por segundo. Esta velocidad escasamente es más que 10 veces la velocidad del sonido en el aire; lo que no sucede con el procedimiento de Chaldni, que indicaba una velocidad 16 veces mayor, y el método de las vibraciones, que hubiese dado 4,654, indicaría 14 veces más. Se ignora la causa de estas anomalías.

Terminemos por el cuadro de algunos números tomados de Chaldni y Wertheim, que dan las velocidades del sonido en varios cuerpos, tomada la del aire por unidad: las tres últimas columnas espresan dicha velocidad en metros á diversas temperaturas (1). La temperatura ejerce, pues, tambien una influencia sobre la velocidad del sonido en los metales; pero á la inversa de lo que pasa en los líquidos y los gases, el aumento de calor disminuye la velocidad, salvó en el hierro entre 20° y 100°. Esto consiste en que el calor disminuye en general la elasticidad de los metales, mientras que aumenta aquella en los líquidos y los gases. La escepcion del hierro procede probablemente de una estructura molecular especial, lo cual parece probar el hecho de que los hierros de distintas procedencias, los alambres de hierro ó de acero, el acero fundido, no se conducen de la misma manera bajo este punto de vista.

La elasticidad varía en las maderas segun la direccion de las fibras leñosas ó de las capas; es mucho mayor en el sentido de las fibras que en la direccion perpendicular, y en este último, es mas grande en un direccion transversal á las capas que segun las capas mismas. Lo mismo sucede con la velocidad del sonido, como lo demuestra nuestro cuadro. A Wertheim se deben los delicados experimentos que han revelado estos hechos.

(1) Los números de las dos primeras columnas son las velocidades espresadas de este modo; las otras columnas dan los valores de estas velocidades en metros.

Velocidad del sonido en diversos cuerpos sólidos.

	Segun CHALDNI	Segun WERTHEIM.	á 20°	á 100°	á 200°
Plomo.	»	4.0	1230m	1200m	»
Oro.	»	6.4	1740	1720	1735m
Estaño.	7.5	7.5	2550	»	»
Plata.	9.0	8.0	2710	2640	2480
Platino.	»	8.5	2690	2570	2460
Cobre.	»	11.2	3560	3290	2950
Zinc.	»	11.0	3740	»	»
Hierro.	16.6	15.4	5130	5300	4720
Acero fun- fundido.	16.6	15.0	4990	4925	4790
Alambre de hierro.	»	15.5	4920	5100	»
Alambre de acero.	»	15.0	4880	5000	»

Velocidad del sonido en diferentes maderas.

	Segun las fibras.	Trasversal á las capas.	Segun las capas.
Abeto.	4640m	1335m	784m
Haya.	3340	1840	1415
Roble.	3860	1535	1290
Alamo.	4280	1400	1050

Velocidad del sonido en algunos otros sólidos.

Cristal.	16 ó 5440m
Vidrio de tubos.	12 ó 4080

En resumen, se vé que de todas las sustancias conocidas que pueden servir de vehículos al sonido, aque-

llas en que se propaga con mayor rapidez son: el hidrógeno entre los gases, el agua del mar en los líquidos naturales, el hierro entre los metales, el vidrio y la madera de abeto entre los sólidos. Si se adoptase el número de Chaldni que considera la velocidad del sonido en este último cuerpo como 48 veces mayor que la del sonido en el aire, tal cuerpo sería el que lo propagase con mas rapidez. Segun nuestros cuadros, el hierro es el que ocupa el primer rango entre los sólidos, considerados bajo este punto de vista.

CAPITULO III.

Reflexion y refraccion sonoras.

§ 1.—Ecos y resonancias.—Eco sencillo y eco múltiple: explicacion de estos fenómenos.—Leyes de la reflexion del sonido; demostracion experimental.—Fenómenos de reflexion en la superficie de las bóvedas elípticas.—Esperimentos que prueban la refraccion de los rayos sonoros.

Sabemos que la luz y el calor se propagan á la vez directamente por radiacion, é indirectamente por re-nexion. Cuando la propagacion se efectúa en medios cuya constitucion molecular y densidad difieren, la direccion de las ondas luminosas y caloríficas sufre una desviacion particular conocida por los fisicos con el nombre de refraccion.

Los mismos fenómenos de reflexion y refraccion se verifican en el sonido, como en el calor y la luz, y siguen con corta diferencia las mismas leyes.

Que el sonido se refleja cuando, propagándose en el aire ú otro medio cualquiera, encuentra un obstáculo, es un fenómeno que todo el mundo puede comprobar por observaciones familiares. Los ecos y las resonancias son, en efecto, fenómenos debidos á la reflexion del sonido. Cuando uno se encuentra en una habitacion cuyas dimensiones son suficientemente grandes y cuyas paredes no están guarnecidas de objetos que ahoguen el sonido, la voz se refuerza en ella y el ruido de los pasos ó el que resulta del choque de los cuerpos sonoros, re-

tumba con gran intensidad. En una sala todavía mas espaciosa, las palabras parecen duplicadas, lo cual las hace muchas veces confusas y difíciles de percibir claramente. Estos refuerzos de los sonidos, motivados por la reflexion sobre las paredes, es lo que recibe el nombre de *resonancia*.

Si la distancia del observador á la pared reflectora es mas de 20 metros, aquel percibe distintamente por segunda vez cada una de las sílabas que pronuncie. Este es el fenómeno del *eco sencillo*. Cuando cada sílaba es repetida dos ó muchas veces, resulta el *eco múltiple*.

Veámos las razones físicas de estos fenómenos.

Por breve que sea la duracion de un sonido, la sensacion que provoca en el oido del oyente persiste cierto tiempo, $\frac{1}{10}$ de segundo próximamente.

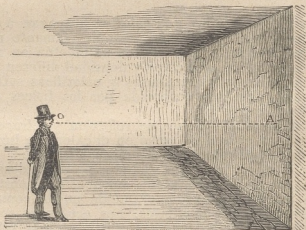


Fig. 5.—Reflexion del sonido; eco ó resonancia.

En este tiempo el sonido recorre, sobre poco mas ó menos, 34 metros; de suerte que si la distancia AO del

observador al muro que refleja el sonido es de menos de 17 metros, la sílaba que aquel ha pronunciado tiene tiempo de ir y volver á su oído antes que la sensación se haya enteramente agotado. El sonido reflejado se mezcla, por lo tanto, con el que él percibe directamente; y como emanan á la vez de puntos desigualmente distantes una multitud de reflexiones parciales, resultará un confuso murmullo, que es lo que acabamos de llamar una resonancia. La misma explicación se atribuye evidentemente al caso de dos ó mas personas que ocupan la misma sala y hablan, sea aisladamente, ó juntos; la confusión que resulte será tanto mayor cuanto más rápidamente hablen los interlocutores.

Si la distancia OA es mayor que 17 metros, cuando el sonido de la sílaba pronunciada vuelva al oído por reflexión, la sensación ha terminado y se oye una repetición mas ó menos débil del sonido directo. Cuanto mayor sea la distancia, más considerable será el número de sílabas ó sonidos distintos repetidos. Por ejemplo: supongamos que esa distancia sea 180 metros, y que, en un segundo, el observador pronuncia cuatro sílabas, la palabra *respondedme*. Para ir á la superficie reflejante y volver, el sonido emplea poco mas de un segundo; la sensación directa pasa y el oído escucha por segunda vez y distintamente la palabra *respondedme*. El eco sencillo es en este caso *polisílabo*.

El eco múltiple tiene efecto entre superficies reflejantes paralelas, suficientemente separadas. En este caso, el sonido reflejado por una de ellas va á reflejarse por segunda vez sobre la otra, y así sucesivamente. Claro está que, á causa de estas reflexiones sucesivas, los sonidos van cada vez perdiendo fuerza. Los edificios, los peñascos, las masas de árboles, las nubes mismas producen el fenómeno del eco.

§. 2. — Ecos notables.

Entre los ecos mas notables, se cita el eco múltiple del castillo de Simonetta, en Italia, que repite hasta cuarenta veces la palabra pronunciada entre las dos alas paralelas del edificio.

En el parque de Woodstock, en Inglaterra, habia un eco, que, segun el doctor Plott, repetia directamente diez y siete sílabas por el dia y veinte sílabas por la noche. La misma particularidad era aun mas pronunciada en el eco de Ormesson, pueblo del valle de Montmorency; este eco, segun Mersenne, repetia por la noche hasta catorce sílabas, mientras que por el dia solo daba siete. La esplicacion de estos hechos nos parece difícil, si atribuimos su causa á la influencia de la calma de la noche sobre la intensidad del sonido, puesto que se trata de ecos sencillos polisílabos, es cierto, pero no múltiples. ¿No vendrá la verdadera causa de que la temperatura mas baja de la noche disminuye la intensidad del sonido, lo cual equivale á un aumento en la distancia de la superficie reflectante? En todo caso, lo mas que esto puede hacer es contribuir á ello. «Existe un eco notable cerca de Rosneath, bella casa de campo en Escocia, al Oeste de un lago de agua salada, que se pierde en el rio Clyde, á 17 millas por bajo de Glasgow; este lago está circundado de colinas, algunas de las cuales son áridos peñascos, y otras están cubiertas de bosque. Un hábil trompeta, situado en un montículo que el agua dejaba al descubierto, vuelto al N., tocó una pieza musical y se detuvo; al momento el aire recogió un eco, y lo repitió fiel y distintamente, pero dando un tono mas bajo que la trompeta; habiendo cesado este eco, otro repitió lo mismo en tono mas bajo y con igual exactitud; al segundo siguió un tercero, tan fiel como los anteriores, pero dando un tono mas bajo todavía; despues no se oyó nada. Se ha repetido mu-

chas veces el mismo experimento, y siempre ha dado el mismo satisfactorio resultado.» (*Suplemento á la Enciclopedia.*)

Las reflexiones múltiples se esplican perfectamente, como hemos dicho mas arriba, así como la debilitacion de la intensidad del sonido que es su consecuencia. En cuanto al cambio de tono, esta es una singularidad cuya esplicacion es mas difícil. Al enumerar d'Alembert las condiciones para que se produzcan los ecos, indica en estos términos la solucion de la cuestion: «Por último, se podrian disponer los cuerpos que formen *eco* de manera que uno solo haga oír varios *ecos* que difieran tanto *con relacion al grado del tono*, como con relacion á la intensidad ó fuerza del sonido: para ello no se necesitaria más que los ecos volvieran por cuerpos capaces de hacer oír, por ejemplo, la tercia, la quinta y la octava de una nota que se hubiese tocado en un instrumento.»

El ilustre géometra no dá mas esplicaciones, y á nosotros toca preguntarnos si esta última condicion puede ser aplicada á voluntad. En todo caso, la descripcion del fenómeno observado en Rosneath, no parece dar lugar á duda. Acaso la disminucion del tono no fuese mas que una ilusion, debida á la debilitacion de la intensidad.

En el *Curso de física* de Mr. Bontet de Mouvel, encontramos este hecho curioso que todos los que visiten el Pantheon pueden comprobar. «Basta que el guardian dé un golpe seco sobre los faldones de su levita, para que, en una de las cuevas del monumento, bajo sus bóvedas retumbantes, se produzca un ruido casi igual al de un cañonazo.» Este es allí un fenómeno de resonancia y de concentracion del sonido.

En las obras antiguas y modernas se citan muchos ecos múltiples, cuyos efectos mas ó menos sorprendentes, habria que justificar, pero que todos se esplican sin dificultad por las reflexiones sucesivas del sonido. Tal se cuenta del eco que existia en la tumba de Metella,

mujer de Craso, y que repetía ocho veces un verso entero de la *Eneida*. Addison hace mención de un eco que repetía cincuenta y seis veces la detonación de un pistoletazo. El eco de Verdun producido por dos grandes torres distantes entre sí 52 metros, repetía doce ó trece veces la misma palabra. La gran pirámide de Egipto contiene en su interior varias salas subterráneas precedidas de largos pasillos, cuyo eco repite el sonido diez veces. «Las vibraciones, dice Mr. Tomard, repercutidas golpe tras golpe, recorren todos estos canales de pulimentada superficie, tocan todas las paredes y llegan lentamente hasta la salida exterior debilitadas y semejantes al tableteo del trueno cuando empieza á alejarse. En el interior, el ruido decrece regularmente y su estension gradual, en medio del profundo silencio que reina en estos lugares, no llama menos la atención y el interés del observador.» Finalmente, Barthius habla de un eco situado cerca de Coblenz en las márgenes del Rhin (entre Coblenz y Bingen, dice Radean, allí donde se juntan las aguas del Nahe con las del Rhin), y que repetía diez y siete veces la misma sílaba: se presentaba el fenómeno particular de que uno no oía á la persona que hablaba, mientras que las repeticiones ocasionadas por el eco formaban sonidos muy distintos y con variaciones admirables: unas veces parecía que el eco se acercaba, otras que se alejaba; en algunos casos se oía muy distintamente el sonido, en otros ya no era perceptible; unos no oían mas que una sola voz; otros oían muchas; el eco estaba á la derecha para unos, á la izquierda para otros. Análogas particularidades se observaron en un eco que describen las Memorias de la Academia de Ciencias del año de 1692, y que estaba situado en Genetay á dos leguas de Rouen cerca de la abadía de San Jorge. Este eco se producía en un patio semi-circular rodeado de muros de igual forma. D' Alembert da en la *Enciclopedia* una esplicacion muy sencilla de los diversos fenómenos

descritos; dice, que todos se deducen de las leyes de la reflexion, de la forma circular del recinto y de las posiciones respectivas ocupadas en medio del patio por la persona que emitia los sonidos y las de sus oyentes.

Habitando hace una quincena de años, en las orillas del mar en la playa de Hyères, tuve ocasion de escuchar uno de los ecos mas admirables de que jamás he sido testigo. Durante toda una mañana, las detonaciones de artillería procedentes de un buque anclado en la rada, se repercutian sobre los flancos de las montañas de la costa en ecos prolongados que me hicieron creer al principio en la presencia de una escuadra; se hubiese dicho que se oian los redobles continuados del trueno. Una sola descarga parecia durar así cerca de un minuto.

Las nubes reflejan el sonido lo mismo que los edificios, las rocas, las piedras y los árboles. El tableteo del trueno es debido probablemente á las reflexiones del sonido desde el suelo á las nubes y recíprocamente. La detonacion propiamente dicha, que acompaña á la descarga eléctrica de los nubarrones, es en efecto un fenómeno instantáneo como la chispa misma; la duracion de la detonacion es muy breve, aunque debe superar á la del relámpago. Podemos asegurarnos de ello, observando que un trueno parece tanto mas súbito y breve cuanto mas rápidamente sucede al relámpago, es decir, que estalla á menos distancia del observador. En este caso, los tableteos que le siguen y que parecen cada vez mas débiles, son evidentemente ecos.

A pesar de esta circunstancia, es preciso tener en cuenta que el relámpago tiene una estension bastante considerable que se puede evaluar algunas veces en centenares de metros y aun en uno ó dos kilómetros, que afecta contornos sinuosos y que sus diversas partes están á distancias notablemente diferentes del observador. Si se admite que la detonacion se produce en todo lo largo del surco luminoso, y por decirlo así, en el

mismo instante de un extremo á otro, es evidente que el sonido llegará sucesivamente al oído del observador con intensidades muy diferentes. El sonido, pues, parece durar cinco ó seis segundos, trascurridos los cuales, se suceden los sonidos motivados por la reflexion sobre las nubes ó el suelo, es decir, por el eco; y esto es lo que constituye el tableteo del trueno.

Al numerar D' Alembert los cuerpos susceptibles de reflejar el sonido y de formar el eco, cita los *nubarrones*, y añade: «De ahí vienen esos truenos terribles que retumban y cuyos ecos repetidos repercuten en el aire.»

Arago, al final de su reseña de la velocidad del sonido, menciona el hecho de que todos los cañonazos que se dispararon en Montlhéry, fueron acompañados de un rodamiento semejante al del trueno, y que duraba de veinte á veinticinco segundos. Nada parecido se verificó en Villejuif. Tan sólo cuatro veces, en menos de un segundo de intervalo, se oyeron en este último punto dos cañonazos distintos del cañon de Montlhéry. En fin, «en dos circunstancias fue acompañado el estampido del cañon de un tableteo prolongado, cuyos fenómenos solo se manifestaron en el momento de la aparicion de algunas nubes; en un cielo completamente sereno, el ruido era único é instantáneo. ¿No podremos deducir de esto, que las detonaciones múltiples del cañon de Montlhéry resultaban en Villejuif de ecos formados en las nubes y sacar de lo mismo un argumento favorable á la esplicacion que han dado algunos físicos del tableteo del trueno?»

§ 3.—Leyes de la reflexion del sonido.

La reflexion del sonido sigue leyes muy sencillas, cuyo enunciado vamos á dar. Se demuestra rigurosamente que tales leyes son una consecuencia natural del

movimiento vibratorio que constituye el sonido; pero tambien se comprueban experimentalmente con abstraccion de toda hipótesis.

Se llama rayo sonoro, la línea recta que parte del centro de conmocion; cuando en su camino encuentra una superficie reflectante, se denomina rayo *incidente*; y rayo *reflejado*, á la línea que sigue el sonido al retroceder desde dicha superficie al medio de donde emana. Los dos ángulos que los rayos incidente y reflejado forman con la perpendicular ó normal al punto de incidencia, son los ángulos de incidencia y reflexion. Comprendidas bien estas definiciones, hé aquí cómo se enuncian las dos leyes de la reflexion del sonido:

Primera ley: Los dos rayos sonoros, el de incidencia y el de reflexion, se hallan situados en un mismo plano perpendicular á la superficie reflejante.

Segunda ley: El ángulo de incidencia y el ángulo de reflexion, son iguales entre sí.

Es muy sencilla la demostracion experimental de ambas leyes.

Se colocan uno enfrente de otro de modo que coincidan sus ejes, dos espejos metálicos de forma parabólica, es decir, engendrada por la revolucion sobre su eje de la curva llamada *parábola* (fig. 4). Tal curva posee cerca de su parte mas saliente un foco que goza de la propiedad de que todas las líneas, que salgan de él y lleguen á diferentes puntos de la parábola, se reflejan en la direccion de las paralelas al eje. En una palabra, los rayos que salen del foco y los paralelos al eje, forman ángulos iguales con las normales á la parábola en los puntos M. Recíprocamente, si llegan á la parábola varias líneas paralelas al eje, irán á reflejarse al foco.

Ahora bien, si se coloca un reló de bolsillo en el foco de uno de los espejos parabólicos, las ondas sonoras engendradas por el tic-tac del movimiento, marcharán paralelamente al eje é irán á reflejarse, despues de

chocar con la superficie cóncava del segundo espejo, al foco de éste. El observador provisto de un tubo á fin de no interceptar las ondas, oirá fácilmente las pulsaciones del reloj.

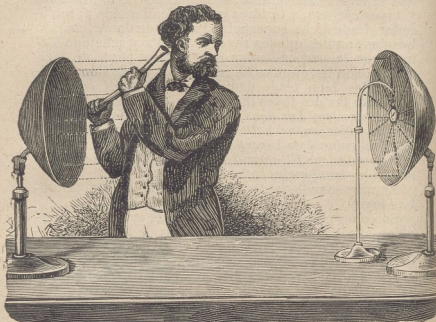


Fig. 4.—Demostracion experimental de las leyes de la reflexion del sonido.

Excepcion hecha del foco, el sonido no se oye en ningun sitio, ni aún colocándose en medio de los espejos y á corta distancia del reloj.

La curva llamada *elipse* posee dos focos, y los rayos que salen del uno van á reflejarse en el otro. Las salas cuya bóveda es de forma elíptica, deben, por consi-

guiente, presentar el mismo fenómeno que el sistema de los espejos parabólicos; y así en efecto, lo confirma la experiencia. El Museo de Antigüedades del Louvre, posee una sala de este género, en la cual, dos personas situadas hacia las dos estremidades opuestas pueden conversar en voz baja sin temor á la indiscrecion de los que se hallen entre ambas.

La reflexion del sonido se utiliza en muchos instrumentos que tendremos ocasion de describir al hablar de las aplicaciones de la física á las ciencias y artes.

§ 4.—Refraccion del sonido

Como vimos en otro lugar, el sonido se propaga por intermedio de todos los cuerpos elásticos, pero en cada uno de ellos con velocidades diferentes que en cierta medida dependen de su densidad. Cuando el sonido pasa de un medio á otro, cambia de velocidad, de donde resulta una desviacion del rayo sonoro. Si la velocidad es menor en el segundo medio que en el primero, el rayo se acerca á la normal á la superficie de separacion de ambos medios. Como la luz experimenta una desviacion semejante, que se ha comprobado por la experiencia mucho antes de encontrar su explicacion teórica, y el fenómeno es conocido desde hace tiempo con el nombre de refraccion, se ha dado á la desviacion de los rayos sonoros el nombre de *refraccion del sonido*. Hé aquí de qué manera Sondhaus ha puesto fuera de duda la existencia de dicha variacion.

Construyó lentes gaseosas llenando de ácido carbónico varias cubiertas membranosas de forma esférica ó lenticular. Si las cubiertas son de papel ó de tripa, no es apreciable la refraccion del sonido, pero con las de colodion el experimento alcanza un éxito completo. Ahora bien, la velocidad del sonido es menor en el ácido carbónico que en el aire. Los rayos sonoros que,

llegando á la superficie esférica convexa de la lente, se refractan, pasando á través del gas y salen por la superficie opuesta, deben ir á converger en un punto único ó foco. Y en efecto, si se coloca un reloj de bolsillo, por ejemplo, en la direccion del eje de la lente, se reconoce que existe en la prolongacion del eje, por el otro lado, un punto en que el tic-tac del reloj se oye distintamente y mejor que en ningun otro sitio. Las ondas sonoras, pues, al salir de la lente, convergen hácia el eje, lo cual demuestra que varian de direccion, ó lo que es lo mismo, se refractan.

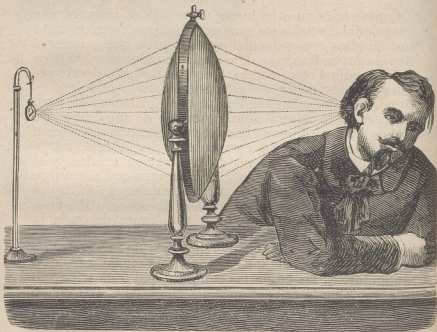


Fig. 5.—Refraccion de las ondas sonoras. Lente de Sondhaus.

Una lente bicóncava, llena de hidrógeno, demostraría igualmente el fenómeno de la *refracción* del sonido. Se vió, en efecto, que la velocidad del sonido en el hidrógeno es mayor que en el aire; las superficies cóncavas de separación de ambos medios, producirían por consiguiente el mismo efecto sobre la dirección de los rayos sonoros y los desviarían de igual suerte que la lente convexa llena de gas ácido carbónico.

CAPITULO IV.

Propiedades distintivas de los sonidos.

§ 1. — Carácterés propios de los diferentes sonidos.

Cuando dos ó muchos sonidos hieren simultáneamente nuestro oído ó se suceden con intervalos bastante aproximados para que podamos compararlos unos con otros, encontramos en ellos diferencias ó semejanzas que se pueden referir á tres propiedades particulares, la *intensidad*, la *altura* y el *timbre*.

Un sonido puede ser mas ó menos fuerte, mas ó menos intenso, es decir, conmueve el órgano del oído con mayor ó menor energía. Unas veces, la impresion es tan débil, que exige de nosotros una atencion especial para percibirla; otras es tan fuerte, que nos causa una sensacion dolorosa; las descargas de artilleria ocasionan con frecuencia una lesion en los órganos lo suficientemente grave para determinar una sordera por mas ó menos tiempo. Entre estos dos estremos de la intensidad de los sonidos se encuentran todos los grados posibles de sensacion auditiva.

Pero dos sonidos de igual intensidad no son por eso idénticos. El uno puede ser más *alto*, más *agudo* que el otro, ó si se quiere, este último nos parece más *bajo* ó más *grave*. El grado de agudez ó gravedad de un sonido es lo que se llama su *altura*. En música, la altura de los sonidos que se emplean y que componen por su sucesion ó simultaneidad la melodía y la armonía, está

sometida á reglas especiales, cuyos principios daremos mas adelante. Todos los sonidos no son susceptibles, de semejante comparacion que permite asignar la altura de ellos, y de ahí la distincion entre el *ruido* y el *sonido musical*, reservando la primera de estas denominaciones para los sonidos cuya altura no puede ser apreciada por un oido ejercitado, y la segunda, para todo sonido regular y continuo cuya altura puede ser medida, y que forma un grado cualquiera en la série indefinida de los sonidos empleados en música.

Cuando dos sonidos son á un tiempo de la misma intensidad y altura, pueden diferir todavía bajo otro punto de vista; cada cual puede tener un *timbre* particular. La definicion rigurosa del timbre exigiria que se conociese su causa; más lejos veremos hasta qué punto es posible esa definicion. Mientras tanto, daremos una idea de él con ejemplos. Una flauta, un violin, un oboe y una trompeta que ejecutan la misma frase musical, y por consecuencia nos dan los mismos sonidos con la misma intensidad y la misma altura, producen, sin embargo, en el oido una impresion bien diferente. Los sonidos de la trompeta son mas llenos, más sonoros; los de la flauta más dulces, los del violin y los del oboe más mordientes y gangosos, por cuya razon, se dice de ellos que difieren por el timbre. El timbre es el que diferencia en gran parte las voces (1) y nos da á conocer, sin verlas, á las personas que hablan. ¿En qué se distinguen unas de otras las diferentes vocales, simples ó compuestas, y los diptongos? Pues solamente en que el timbre varía de una á otra.

Sentadas estas definiciones, vamos á tratar del estudio físico de estas tres cualidades de los sonidos: intensidad, altura y timbre.

(1) Hay otras causas que distinguen las voces de personas diferentes; hay mil maneras propias á cada uno de nosotros, de acentuar las largas y las breves, de marcar el ritmo, sin contar esos ligeros matices en la altura de los sonidos que forman, áun en la prosa hablada, una especie de melodía.

§ 2. — Intensidad de los sonidos.

Es evidente que la producción de un sonido exige el concurso de tres elementos: una fuente sonora, esto es, la vibración de un cuerpo, que es el cuerpo sonoro propiamente dicho; un medio susceptible de transmitir estas vibraciones, y, por último, el órgano del oído que las percibe.

De aquí resultan tres clases de influencia, de las cuales depende la intensidad del sonido. El volumen, la forma del cuerpo sonoro y la naturaleza de la materia de que está compuesto, el modo de ponerle en vibración, la energía del movimiento que reciben sus moléculas, son otras tantas circunstancias que varían la amplitud de las vibraciones del cuerpo, y por consecuencia, lo que se puede llamar *la intensidad intrínseca* del sonido. Tal es el primer modo de influencia.

Más la naturaleza del medio que transmite el sonido, su densidad, su temperatura, su estado de quietud ó agitación, su extensión, es decir, la distancia del oído al foco sonoro, son también otras tantas circunstancias de las cuales depende dicha intensidad. Aquí no se trata más que de la intensidad intrínseca.

Otro tanto decimos de la mayor ó menor sensibilidad del oído, esto es, del órgano que recibe las ondas sonoras en aquel que percibe el sonido. El oído puede estar más ó menos ejercitado. Sabido es que los salvajes perciben los ruidos lejanos más débiles. La sensibilidad del órgano auditivo puede obedecer, además, á circunstancias particulares y con especialidad al concurso de una multitud de ruidos simultáneos que el oído se acostumbra á oír y al fin ya no distingue, sino que, por decirlo así, embotan la facultad de la audición.

Pasemos revista á todas estas causas modificadoras

de la intensidad de los sonidos, en el orden en que las hemos enumerado.

La amplitud de las vibraciones comunica al sonido más ó menos intensidad y de ello podemos convencernos por muchos experimentos familiares. Cuando se tocan las cuerdas de un violín ó de otro instrumento análogo, el sonido va apagándose poco á poco á medida que el movimiento de vaiven de la cuerda es menos pronunciado. Cuanto mas enérgico es el frotamiento del arco, más marcadas son las oscilaciones y mayor es la intensidad del sonido, y como su altura musical no es modificada (1), hay que admitir por lo tanto que cada oscilacion de la cuerda se verifica con mayor rapidez, siendo mas considerable el camino recorrido en un tiempo igual, cuanto más grande es la amplitud.

Cuando un cuerpo elástico produce un sonido, todas las moléculas de que está compuesto no son igualmente separadas de sus posiciones de equilibrio. Pronto veremos que hay algunas que quedan en reposo. Un timbre, por ejemplo, cuya superficie es golpeada por un martillo, sufre en cada uno de los anillos circulares que le componen, una deformacion que le obliga á aceptar formas elípticas opuestas y alternadas. Los anillos de la base tienden á ejecutar vibraciones mas lentas y de mayor amplitud que los anillos próximos á la cúspide. Pero la solidaridad de los anillos determina una compensacion entre dichas amplitudes y velocidades diferentes, resultando de aquí, para el sonido producido, una altura y una intensidad medias que dependen de las dimensiones y de la naturaleza del metal de que está formado el timbre. Hay en esto una evidente analogía con las oscilaciones del péndulo compuesto, que como es sabido, su duracion es un término medio entre la duracion de las oscilaciones de una serie de péndulos simples de diferente longitud.

(1) Más adelante veremos que la altura está en relacion directa con el número de vibraciones efectuadas en un mismo tiempo, por ejemplo, un segundo.

En lo que acabamos de decir, no se trata más que de la intensidad intrínseca del sonido, la cual depende solamente de la amplitud de las vibraciones efectuadas por las moléculas del cuerpo sonoro. Mas como el sonido se trasmite á nuestro oído por intermedio del aire, la intensidad parecerá tanto mayor cuanto el volumen del aire conmovido á la vez sea mas considerable, y, por consiguiente, que las dimensiones del cuerpo sonoro sean mayores. Una cuerda tensa sobre una tabla estrecha da un sonido menos fuerte que tendiéndola sobre una caja resonante como en los instrumentos de música, el violín, la guitarra, etc. Todo el mundo sabe que si se hace vibrar un diapason, primero en el aire y apoyándolo despues sobre una mesa ó cualquier otro cuerpo elástico, el sonido primitivo adquiere por esta estension de volumen del cuerpo vibrante una intensidad mucho mas enérgica.

La intensidad de un mismo sonido percibido por el oído á diferentes distancias, decrece en razon inversa del cuadrado de la distancia. Así, á 10 metros, la intensidad es cuatro veces mayor que á 20 metros, nueve veces más que á 30 metros, etc., con tal que sean idénticas las circunstancias de la propagacion y los cuerpos reflejantes vecinos no concurren á reforzar el sonido. De donde resulta que si en dos estaciones diferentes se producen dos sonidos de los cuales el uno sea cuádruple del otro en intensidad, el observador que se sitúe en el tercio de la línea que los separa, creará oír por el lado del mas débil dos sonidos de la misma fuerza. De un modo general, si el observador se coloca en la direccion de la línea que une los dos puntos de donde emanan dos sonidos, en un punto en que sus intensidades le parezcan iguales, dichas intensidades serán, en realidad, proporcionales á los cuadrados de las distancias del punto intermedio á los dos cuerpos sonoros. Hé aquí la razon de esta ley. Las ondas sonoras, al propagarse esféricamente alrededor del centro de

conmoción, ponen en movimiento capas esféricas sucesivas cuyo volumen está en razón de la superficie y crecen desde entonces como los cuadrados de sus distancias al centro. Puesto que las masas de las capas agitadas son cada vez mayores, el movimiento que se les ha comunicado disminuye por la misma fuerza en la misma proporción.

En las columnas ó tubos cilindricos, los cortes sucesivos son iguales: la intensidad de los sonidos debiera, por lo tanto, ser la misma cualquiera que fuese la distancia. Pero los recientes esperimentos de Regdault prueban que en realidad hay una disminucion de intensidad que crece con la distancia y que proviene en gran parte de la reaccion de las paredes del tubo que limitan la columna de aire. Esto, no obstante, á cortas distancias la debilitacion del sonido es poco pronunciada. En los esperimentos que hizo Biot para determinar la intensidad del sonido en los cuerpos sólidos, demostró el hecho de que los sonidos transmitidos por el aire en los tubos de los acueductos de París, no era sensiblemente debilitada á una distancia de cerca de un kilómetro.

«La voz mas baja, dice Biot, se oia á esta distancia de tal modo que se distinguian perfectamente las palabras y se podia seguir una conversacion. Quise determinar el tono á que la voz dejaba de ser sensible, pero no pude conseguirlo. Las palabras dichas en tono tan bajo como cuando uno habla al oido, eran recibidas y apreciadas; de suerte que para no ser oidos no hubiera habido absolutamente mas que un medio; el de no hablar nada.» Digamos de paso que para efectuar con éxito esperimentos de este género es necesario elegir los instantes de la noche en que hace mas calma y tranquilidad. El mismo Biot recomendaba, por ejemplo, entre la una y las dos de la madrugada. «Durante el dia mil ruidos confusos agitan el aire exterior, hacen resonar los tubos é impiden distinguir, ó lo que es lo

mismo, destruyen las débiles conmociones producidas por una voz baja en la estremidad de la columna de aire. Ocurre tambien en estas circunstancias que los ruidos mas fuertes no se oyen muchas veces.»

Esta propiedad de los canales cilindricos esplica ciertos efectos de acústica que ofrecen las salas ó las bóvedas de diversos monumentos. Las aristas de las bóvedas ó de los muros forman huecos por los cuales se propaga el sonido con gran facilidad y sin perder nada de su intensidad primitiva. En París se ven dos salas de esta clase: una de forma cuadrada y abovedada que existe en el Conservatorio de Artes y Oficios; la otra de forma exagonal en el Observatorio de París. En ambas, al reunirse los ángulos por la bóveda forman varios huecos eminentemente adecuados para conducir el sonido sin debilitarlo. Por eso dos personas pueden conversar en voz baja sin que las que están situadas entre ellas perciban nada de su conversacion. En la iglesia de San Pablo de Lóndres, la cúpula presenta una disposicion análoga; tambien se citan la galería de Gloucester, la iglesia catedral de Girgenti en Sicilia y la famosa gruta de Siracusa conocida hoy con el nombre de *Grotta della favella* y en la antigüedad con el de *Oreja de Denys* (1).

En las antiguas Latomías ó canteras de Siracusa, el tirano mandó disponer, se dice, una comunicacion secreta entre su palacio y las cavernas en que tenia apriionadas sus victimas, sacando partido de la disposicion particular de la gruta para espiar sus menores palabras.

(1) En España puede citarse la saja de los secretos en la Alhambra de Granada.

§ 3.—Variaciones en la intensidad del sonido con la altitud, el día y la noche.

La intensidad del sonido percibido varía según la densidad del medio que lo propague, ó por mejor decir, del medio en que toma origen. Ya vimos este fenómeno en el experimento del timbre debajo la campana de la máquina neumática; el sonido de aquélse debilitaba conforme se hacia el vacío. Lo contrario hubiera sucedido, como lo ha comprobado Hauksbée, si en vez de hacer el vacío se comprimiese el aire en el recipiente donde está el cuerpo sonoro. Las personas que se elevan á las altas regiones de la atmósfera, sea á las montañas ó bien en globo, observan todas una debilitacion del sonido que tiene por causa la disminucion de densidad del aire atmosférico. Ya hemos citado la observacion de Sausure y las de Tyndall acerca de la escasa intensidad de la detonacion de una pistola, en lo alto del Monte-Blanco. «En los experimentos que se efectuaron en Quito para medir la velocidad del sonido entre dos estaciones elevadas 5,000^m y 4,000^m sobre el mar, el ruido de una pieza de artillería de á nueve, á una distancia de 20,500^m no produjo tanto efecto como el de una pieza de ocho centímetros á una distancia de 31,500^m en las llanuras de las cercanías de París.» (Daguin).

Hé aquí otros curiosos hechos sacados de las relaciones de diversos aereonautas y que prueban que si los sonidos se producen muy debilitados en los medios enrarecidos de las altas regiones, se propagan difícilmente á las capas inferiores más densas: al contrario, los sonidos producidos en estas últimas se oyen sin dificultad en las alturas. El camino recorrido es, sin embargo, el mismo en ambos casos y las densidades de las capas que atraviesan las ondas sonoras son también las mismas, pero en sentido inverso. Así, la intensidad del sonido, en lo concerniente á la densidad del

medio, depende sobre todo de la del medio en que inmediatamente se halla sumergido el cuerpo sonoro. Y esto se explica. A igualdad de amplitud de las vibraciones del cuerpo, la masa aerea agitada en el punto de partida es mas grande en un medio denso que en un medio enrarecido.

En su primera ascension (1862) el célebre aereonauta inglés Glaisher, llegó á una altura de 5,500 metros: «Allí, dice, el silencio es absoluto, semejante al que reinaria sobre el abismo cuando la tierra fue separada de las aguas. De repente oí una armonía subterránea. No era un eco de la voz de los ángeles; era una música humana que penetraba hasta aquellas regiones en que el aire ya menos denso, parece que solo desea vibrar.» En una segunda ascension el mismo observador oyó el ruido del trueno; el globo, sin embargo, se cernia en un cielo de una oscuridad absoluta, á 5,000 metros de altura. El rayo retumbaba bien lejos, á sus pies, en el seno de nubes 5,000 metros mas bajas. En otra ocasion llegó á oídos del viajero el silbido de las locomotoras, á alturas de 5,000 y hasta de 7,000 metros. Desde lo alto, las voces humanas se oyen perfectamente, mientras que los aereonautas se entienden con dificultad aun en alturas poco considerables. «Mientras que entendemos, dice Flammarion, una voz que nos habla á 500 metros por bajo de nosotros, no se oyen claramente nuestras palabras desde el momento en que hablamos á mas de 400 metros.»

Las ondas sonoras se transmiten por el agua con mas intensidad que en el aire, aunque el cuerpo sonoro vibre con la misma energía en uno y otro medio. En los cuerpos sólidos de forma cilíndrica ó prismática el sonido se propaga sin debilitarse tanto como en el aire ó los gases. Todo el mundo conoce el experimento que consiste en aplicar el oído á la estremidad de una larga viga de madera y se oyen claramente los ruidos mas pequeños como el que produce el rozamiento de un alfiler. Los salva-

jesponen el oído en tierra para oír los sonidos lejanos que el aire sería incapaz de transmitir á la misma distancia.

Un hecho generalmente conocido y de fácil observación es que el sonido se oye mejor durante la noche que en el día. Pero los físicos no están de acuerdo en la razón de ese aumento. Acerca de este punto, M. Daguin dice en un *Tratado de física* lo siguiente :

«Es un hecho perfectamente comprobado que los sonidos se oyen á mayor distancia durante la noche que durante el día; por esta razón ciertos ecos no existen sino después de ponerse el sol. M. Humboldt ha observado, por ejemplo, que el ruido de las cataratas del Orinoco, que se oye á más de una legua, es casi tres veces más fuerte en la noche que en el día (1).»

Este hecho había sido observado por los indios y los misioneros de Atures. Cuando uno se encuentra sobre una colina que domina á una gran ciudad, se reconoce fácilmente que el ruido lejano de los coches se distingue mucho mejor durante la noche, que durante el día. Humboldt ha observado además, que el aumento de intensidad es menos sensible sobre las planicies elevadas que en las llanuras bajas; y sobre el mar menor que en los continentes.

«El aumento de intensidad del sonido en la noche era conocido de los antiguos. Aristóteles hizo de ello mención en sus problemas y Plutarco en sus diálogos. Se ha querido encontrar la explicación de él en los mil confusos ruidos que obran durante el día, y que no existen en la noche. Mas esta explicación no podía aplicarse á las selvas del Orinoco en las cuales una multitud de animales y de insectos nocturnos

(1) Hé aquí las palabras de Humboldt: «En los cinco días que pasamos en la cercanía de la catarata, observamos con sorpresa que el ruido de la caída de agua era tres veces más intenso por la noche que por el día. En Europa se observan las mismas singularidades en todas las caídas de agua. ¿Cuál puede ser su causa en un desierto en que nada interrumpe el silencio de la naturaleza? Hay que buscarla probablemente en la corriente de aire caliente ascendente que cesa durante la noche cuando la superficie de la tierra se ha enfriado.» (*Cuadros de la Naturaleza*, I.)

llenar el aire con sus gritos y sus zumbidos (?). Humboldt ha encontrado la verdadera explicación, observando que, en la noche, el aire es apacible y homogéneo, lo cual favorece la propagación del sonido; en tanto que, durante el día, aquel se agita y compone de partes de desigual densidad á causa de la acción del sol que calienta el suelo de diferente manera según la naturaleza y el estado de su superficie. Resulta de esto que el aire en contacto con ella adquiere temperaturas diversas y que las partes más dilatadas se elevan y se mezclan imperfectamente con las que son menos calientes, por lo cual, el aire próximo á la superficie de la tierra es poco homogéneo. Esto supuesto, un rayo sonoro experimenta una reflexión parcial cuando pasa de una masa de aire á otra de diferente densidad; de suerte que la porción que pasa de una á otra pierde parte de su intensidad. Esta explicación la había dado ya Aristóteles quien atribuía á la tranquilidad de la noche la mayor intensidad de sonido, como asimismo Plutarco que yendo más lejos, veía la causa de la debilitación del sonido durante el día en el *movimiento tembloroso* del aire ó en la acción del sol. Explicó también el por qué sobre el mar, el cambio de intensidad del sonido, del día á la noche, es menos sensible que sobre la tierra, puesto que la temperatura de la superficie del agua es más uniforme que la del suelo.»

De modo que Humboldt atribuye el crecimiento de intensidad del sonido durante la noche á la homogeneidad de las capas de aire, y á su calma relativa, que permitirían á las ondas sonoras propagarse, sin perder nada de su amplitud por la reflexión. La razón de esta diferencia es otra á juicio de Nicholson; según éste consiste enteramente en el hecho de que como durante el día impresionan á la vez el oído una multitud de ruidos, cada uno de ellos debe distinguirse con menos facilidad. «El silencio de la noche, dice, pone en reposo nuestros órganos y los hace más sensibles á las

débiles impresiones; el silencio exalta el oído como la oscuridad excita la vista. » No nos parece dudoso que el concurso de estas diversas causas obre de manera que la intensidad de los sonidos y por consiguiente su alcance, sea mayor durante la noche que en el día. Más adelante se verán interesantes experimentos debidos á Tyndall los cuales muestran que la cuestión está todavía lejos de quedar completamente dilucidada.

Segun las observaciones de Bravais y Martins la distancia á que llega un sonido depende también de la temperatura del aire; dicha distancia es mas grande durante los frios del invierno, en las regiones heladas del polo ó de las altas montañas. Por consiguiente, á la homogeneidad del aire mejor que á su densidad, se debe atribuir aquí la causa de este hecho, puesto que sobre las montañas la densidad del aire es menor que en las llanuras. A mayor abundamiento, la sensibilidad del oído se halla evidentemente exaltada; en las regiones polares, como sobre las altas montañas y en las capas elevadas del aire á que han llegado los globos, un silencio casi absoluto reina constantemente, y la audición de un sonido único no es contrariada por los mil ruidos confusos de las regiones habitadas. Estos ruidos innumerables deben obrar sobre nuestro oído del mismo modo que obra, durante el día, la luz difusa del aire, la cual nos impide ver las estrellas que tan fácilmente se distinguen en la oscuridad.

La intensidad del sonido transmitido depende ciertamente del estado de reposo ó agitación del aire. En un tiempo tranquilo es cuando se oye distintamente á la mayor distancia; el viento quita fuerza al sonido aun cuando venga del punto en que resuena el cuerpo sonoro. Así lo atestiguó Derham en Porto Ferajo (Isla de Elba) donde el cañon de Livurnia se oía mejor en un tiempo tranquilo que cuando el viento soplabá, lo mismo cuando su dirección era la de Livurnia á Porto. El viento, pues, debilita el sonido. Por otra parte, dismi-

nuye su alcance tanto mas, cuanto mas opuesta es la direccion en que sopla. El minimum de su influencia está cuando su direccion forma ángulo recto con el movimiento de las ondas sonoras. Por último, su debilitacion es mas marcada en los sonidos poco intensos que en los fuertes. Tal vez esa influencia del viento sobre el alcance de los sonidos no sea debida enteramente á la agitacion de las moléculas del aire; nos inclinamos á creer que el ruido inherente al viento influya algo en el fenómeno. Desde el momento en que sopla un poco fuerte, resulta como una base continua que debe hacer menos viva la sensibilidad del oido. La direccion de las vibraciones, es decir, la posicion que ocupa el observador con relacion al punto de donde parte el sonido, posee tambien sobre la intensidad del mismo gran influencia. Si cuando se escucha un cuerno de caza el que lo toca vuelve el pabéllon de su instrumento en varias direcciones, la intensidad del sonido varía de tal modo que parece ora que se acerca, ora que se aleja del lugar donde se encuentra el observador: generalmente, todo obstáculo que se interponga y sobre todo si es un cuerpo cuya masa trasmita mal las vibraciones, impide que el sonido se propague; fórmase detrás de él como una sombra sonora que altera considerablemente la intensidad del sonido.

Las circunstancias susceptibles de modificar la intensidad de un sonido son por lo tanto, muy variadas; de donde resulta que es difícil determinar la mayor distancia á que puede llegar. Es probable que los ejemplos notables que citan los físicos de sonidos que se han oido á distancias considerables, fuera el suelo mejor que el aire el que servia de vehículo á las vibraciones sonoras. Anteriormente hemos citado lo que dice Humboldt á propósito de las detonaciones producidas por los terremotos ó las erupciones volcánicas, cuyas detonaciones se han propagado á distancias de 800 á 1,200 kilómetros.

Chladni refiere muchos hechos que prueban que el estampido del cañon se propaga á distancias frecuentemente muy grandes. En el sitio de Génova se le oía á una distancia de 90 millas de Italia; en el sitio de Mannheim en 1793 en la otra estremidad de la Suabia, en Nordlingen y en Wallerstein; en la hatalla de Jena, entre Wittenberg y Treuenbrietzen. «Yo mismo oí, dice, los cañonazos en Wittenberg á una distancia de 47 millas de Alemania (426 kilómetros) y los oí menos por el aire que por las conmociones de los cuerpos sólidos, valiéndome para ello del medio de apoyar la cabeza contra un muro.»

En el *Compte rendu* de la sesión de la Academia de Ciencias del 10 de enero de 1840, se leía la comunicacion siguiente:

«M. Arago da conforme á una carta de M. Hacqueville, varios datos concernientes á las *distancias á las cuales se propaga el sonido*. El cañoneo que precedió á la toma de París, á principios de 1814, se oyó durante quince horas en toda la comarca que se estiende de Liseux á Alençon y en todos los valles circunvecinos (170 á 180 kilómetros á vista de pájaro). M. Elie de Beaumont añade en apoyo de la comunicacion de Hacqueville, que el bombardeo del 30 de marzo de 1814 fue oido muy claramente en la Casa Capitular de Canon situada entre Lissieux y Caen, cerca de 176 kilómetros de París en linea recta.»

¿Fué por el aire, ó el suelo por donde se trasmitió el sonido en tales circunstancias que no son sin duda escepcionales? La verdad es que el sonido se propaga frecuentemente por el aire á una gran distancia. Testigo de ello son las esplosiones del trueno y sobre todo las dotonaciones de los bólidos que estallan algunas veces á alturas enormes. Chladni cita meteoros cuya esplosion no fue oida sino 40 minutos despues de la vista del globo luminoso, lo cual supone una altura por lo menos de 200 kilómetros. El bólido observado en el

Mediodía de Francia el 14 de mayo de 1864, presentó la misma particularidad y los observadores notaron como cuatro minutos entre la aparición del fenómeno y el ruido de la detonación. «Para que una explosión, dice á este propósito M. Daubrèe, producida en capas de aire tan enrarecido, haya ocasionado en la superficie de la tierra un ruido de semejante intensidad, es preciso admitir que su violencia en las altas regiones exceda á todo cuanto nosotros conocemos.» La duración de la detonación de ciertos bólidos es un fenómeno igualmente notable; hay en esto probablemente un efecto de repercusión del sonido sobre las capas de desigual densidad del aire, análogo al tableteo del trueno en los huracanes.

§ 4. — Del alcance de los sonidos.

El límite á que un oído de mediana sensibilidad cesa de oír un sonido es lo que se llama su *alcance*. El razonamiento y la esperiencia están conformes en admitir que este límite depende desde luego de la intensidad intrínseca de la conmoción sonora, así como de las demás circunstancias que modifican la intensidad del sonido á lo largo del trayecto que sigue para llegar hasta el oído. Así, el alcance de un sonido debe variar con la naturaleza del medio en que se propague, con la densidad de este medio, su temperatura, el estado de calma ó agitación del aire, probablemente también con la cantidad de vapor de agua que contenga; en una palabra con la mayor ó menor homogeneidad de sus capas sucesivas. Acabamos de pasar revista á cierto número de hechos que manifiestan la realidad de estos diversos géneros de influencia. Bueno es entrar con respecto á esta materia en algunos pormenores, toda vez que la cuestión, tiene bajo el punto de vista práctico, cierta importancia especialmente en lo que concierne á la eficacia de las señales sonoras que se emplean en la ma-

rina, en los ferro-carriles, etc., cuando las brumas atmosféricas no permiten el empleo de las señales luminosas.

Ante todo, no olvidemos una distincion esencial. Consistiendo el sonido en la impresion que produce sobre el órgano del oido la sucesion de las vibraciones ó de las ondas aéreas, puede suceder, y sucede en efecto, que la impresion cese antes que el movimiento vibratorio, causa de aquella, se haya extinguido por completo. En sus experimentos sobre la velocidad del sonido Regnault ha puesto en claro perfectamente esta distincion. «Cuando la onda, dice, no tiene bastante intensidad ó *se ha modificado lo suficiente* para no producir ya sobre nuestro oido la sensacion del sonido, ella es todavía capaz, aun despues de un trayecto muy prolongado, de marcar su llegada sobre nuestras membranas.» Este sábio físico ha demostrado que un tiro de pistola cargada con un gramo de pólvora, da un sonido que deja de ser percibido por el oido despues de los trayectos.

11,50	metros	en un tubo de 408 ^{mm}	de diámetro.
3,840	—	—	— 300 —
9,540	—	—	— 4,110 —

El alcance del sonido es sensiblemente proporcional al diámetro del tubo ó la columna de aire que propague el sonido. Mas esta onda, que á las distancias citadas arriba no da ya sonido perceptible, camina constantemente y no se estingue por completo sino á las distancias siguientes:

4,056	metros	en el conducto de 408 ^{mm}
11,430	—	— — 300
19,851	—	— — 4,100

El alcance del sonido perceptible y el límite de las ondas silenciosas serian mucho menores en el aire libre que en un espacio limitado, porque en el aire libre

la amplitud de las vibraciones y de consiguiente la intensidad del sonido, disminuye rápidamente; teóricamente ya hemos dicho que esta disminución es proporcional al cuadrado de las distancias. Se creería que en una columna cilíndrica la intensidad permanece constante, lo cual hubiese dado al alcance un valor infinito; pero los experimentos de Regnault, como ya hemos repetido, prueban que no sucede así; las ondas son poco á poco debilitadas y despues estinguidas por la influencia de las paredes de los tubos. Véase, pues, que para las ondas sonoras propiamente dichas es bastante débil el alcance ó límite de percepción.

§ 5.—Sobre la transparencia y la opacidad acústicas de la atmósfera.

Llegamos á los experimentos de Tyndall acerca del alcance de las ondas sonoras. Son interesantes porque en muchos puntos están en contradicción con las ideas generalmente admitidas por los físicos acerca de este particular. Hasta aquí un tiempo claro y sereno, como antes hemos visto, habia sido considerado como favorable á la propagación del sonido; se habia igualmente creído que el alcance era mas considerable cuando el viento soplaba en la dirección del movimiento de las ondas, con tal que se considerase una brisa ligera. Pues bien, vamos á ver que los hechos desmienten tal opinión.

El sábio físico inglés habia sido encargado por la corporación de Trinity House (1) «de determinar la distancia á que podían ser oídas las señales ordinarias de bruma, tales como el porta-voz, trompetas marinas, silbatos de vapor y cañonazos, y averiguar las causas de las variaciones á esa distancia, dependientes de cambios en las condiciones atmosféricas. Dispuestas

(1) Tomamos estos detalles de la reseña de una conferencia de Tyndall, publicada por el *Boletín de la Asociación Científica de Francia* (tomo XIII, página 582).

convenientemente las señales en lo alto de los tajos del South Foreland en los alrededores de Douvres, Tyndall, á bordo de un vapor que el gobierno habia puesto á su disposicion, se alejaba ó se acercaba á la costa hasta que los sonidos fueran perceptibles al oido. Desde el principio fue impresionado por variaciones singulares y en apariencia inesplicables, que no tardaron en presentarse... En efecto, el 25 de Junio, siendo favorable la direccion del viento, el sonido de la trompeta marina, así como el ruido de la explosion de una pieza de á 48 tirada en la costa por encima de Douvres, se oia distintamente en el mar, á una distancia de $5 \frac{1}{2}$ millas inglesas, ó sea en números redondos 8,750 metros. El dia siguiente 26, estos mismos efectos eran perceptibles á 17 kilómetros de la costa, á pesar de reinar un viento directamente contrario. El 2 de Julio sobrevino de pronto en la atmósfera una opacidad acústica verdaderamente extraordinaria; la distancia de la costa á que era perceptible el estampido del cañon, no era ya más que de 6,750 metros sin causa meteorológica aparente. El 5 de Julio, en un tiempo sereno y muy calido, el mar estaba perfectamente tranquilo, y fue preciso acercarse 5,500 metros á la costa para que el ruido del cañon de 48 llegase á ser perceptible. El observador distinguia bien el humo de la explosion, pero sin oir el mas leve ruido. Parece, pues, demostrado que una atmósfera clara y serena no es de ningun modo favorable á la propagacion del sonido, y que la conformidad entre la transparencia óptica y la transparencia acústica de la atmósfera, comprobada por el doctor Derham en las *Transacciones filosóficas* de 1708 y generalmente admitida desde entonces, no descansa en ningun fundamento.»

Antes de ir mas lejos y referir la explicacion que propone Tyndall para estas aparentes anomalías, debemos decir que los hechos observados por él no son

enteramente nuevos. Arago, en su reseña de las experiencias hechas en 1822 en Villejuif y en Montlhéry, atestiguó una diferencia singular entre la intensidad del sonido en cada estacion: « El tiempo estaba sereno, dice, y casi completamente en calma; el poco viento que hacia soplaba de Villejuif á Montlhéry, ó mas exactamente del N. NO. al S. SO. En Villejuif, nosotros oimos perfectamente, MM. de Prony, Mathieu y yo, todos los cañonazos de Montlhéry; al dia siguiente supimos tambien, no sin sorprendernos, que el ruido del cañon de nuestra estacion apenas se habia trasmitido hasta la otra.» De doce cañonazos sólo se oyeron siete en Montlhéry. El dia subsiguiente hubo un resultado todavía mas extraño: no se oyó mas que un cañonazo, de doce que se dispararon. Arago no pretendió explicarse estas singularidades, «no teniendo, dice, que ofrecer más que conjeturas desprovistas de pruebas.»

El hecho que acabamos de citar es tanto mas curioso, por cuanto allí se trataba de sonidos casi simultáneos que se propagaban en el mismo medio, en condiciones metereológicas que se pueden considerar como idénticas. Así, un mismo medio aéreo, que en un sentido goza de la propiedad que Tyndall llama *transparencia* acústica, se presenta opaco para el sonido en el sentido opuesto.

Martin y Bravais, al medir la velocidad del sonido entre la cumbre del Faulhorn y el lago de Brienz, reconocieron tambien que el sonido llegaba debilitado á la estacion inferior, mas en este caso la causa de la diferencia podia y debia ser atribuida á la gran diferencia de altitud; es decir, á la menor densidad del aire en el punto en que se producía el sonido. En Montlhéry sucedió más bien lo contrario, puesto que las ondas sonoras emanadas de Villejuif, se propagaban subiendo hasta treinta y tantos metros hácia la estacion opuesta.

La explicacion propuesta por Tyndall, no es otra que la de Humboldt: la falta de homogeneidad de las capas

de aire, á través de las cuales se propagan las ondas sonoras. El 3 de Julio, en los momentos del experimento citado mas arriba, el tiempo estaba en calma y cálido. «Los rayos de un sol ardiente, al caer sobre el mar, debian necesariamente causar una copiosa evaporacion. El vapor así formado no debia, segun el sabio inglés, mezclarse con el aire hasta el punto de formar un todo homogéneo; los espacios desigualmente saturados de aquel medio, estaban desde aquel momento separados por superficies favorables á la produccion de ecos parciales por reflexion. De ahí una debilitacion en las ondas y una disminucion en el alcance del sonido. Un hecho observado el mismo dia le pareció confirmar la verdad de esta explicacion: se presentó una nube tan espesa que cubrió el sol; y la evaporacion, siendo entonces menor, permitió á la mezcla de aire y de vapor ya formada, hacerse mas homogénea; al cabo de algunos minutos, el alcance del sonido se elevó de 5,500 á 5,750 metros, y se aumentó hasta la tarde, á medida que el sol se acercaba al horizonte; á la puesta del astro, el cañon se oia á una distancia de 12 kilómetros y medio.»

El efecto de un fuerte aguacero fue análogo al de la interposicion de la nube. «En la mañana del 8 de octubre la explosion de la pieza de á 18 era apenas perceptible á la distancia de 8,750 metros de la costa inglesa. Despues del medio dia sobrevino una fuerte lluvia acompañada de granizo. Desde aquel momento el sonido se fue reforzando gradualmente, y al alejarse cada vez mas de la costa, se pudo oir distintamente á la distancia de 12 kilómetros. En este caso, la caida del agua habia detenido la evaporacion del mar y devuelto á la atmósfera su homogeneidad.»

Las nieblas, las brumas espesas ¿son obstáculos á la propagacion del sonido? ¿Disminuyen su alcance? Hasta aquí, así se creia. Varios experimentos, debidos al mismo sabio, parece que están en contradiccion con tal

dictámen. En efecto, durante los tres días, 10, 11 y 12 de Diciembre, estando Lóndres sumergida en una niebla de espesor escepcional, el estampido del cañon fue perceptible á una distancia mucho mas grande que en los tiempos claros que precedieron á aquellos días brumosos, ó que siguieron á la desaparicion completa de la niebla. Así, como lo hace notar Tyndall, la misma causa que disminuye la trasparencia óptica de las capas de aire, aumenta su trasparencia acústica.

Un ingeniero, jefe de puentes y calzadas, Mr. Felipe Breton, admite la esplicacion de Humboldt y de Tyndall, pero á juicio suyo otra causa puede producir una brusca interrupcion de las señales sonoras. En una atmósfera perfectamente homogénea, pero cuyas capas estén á temperaturas diferentes, variando de una manera continua, varias ondas sonoras procedentes de una señal sonora mas ó menos alta, van á rasar con el horizonte, llano ó superficie marítima á cierta distancia. Allí se vuelven á elevar bruscamente, dejando mas allá un espacio, en el cual no penetran, y que este sábio llama la *sombra de silencio*. Para percibir los sonidos en este espacio, seria preciso elevarse verticalmente á alturas crecientes con la distancia. Según eso, puede haber ocurrido que el buque en que se encontraba Tyndall en sus esperimentos hubiese penetrado en dicho espacio, y que este sábio haya atribuido á una carencia de homogeneidad del aire lo que era el efecto de una ley geométrica, de la propagación de las ondas. «Por ejemplo, dice Mr. Breton, si al alejarse de los instrumentos de las señales, dejó bruscamente de oirse el sonido en vez de observarse una debilitacion gradual y continua, esto consiste en que en el instante de la cesacion brusca de la audicion, el observador, atravesando la superficie de la sombra acústica, entró bruscamente en la sombra de silencio. La prontitud de la estincion aparente debió ser tanto mas clara, cuanto mas completa era la trasparencia acústica del aire.

De cualquier manera que sea, las diversas teorías propuestas para explicar las anomalías que la observación ya ha reconocido en el alcance verdadero de las señales sonoras, reclaman evidentemente nuevos estudios y una observación detenida de los hechos. La importancia práctica de la cuestión atraerá, por otra parte, la atención de los físicos.

CAPITULO V.

Las vibraciones sonoras.

§ 1. — Vibraciones de los sólidos, líquidos y gases.

Tócanos ahora estudiar el sonido en sí mismo y probar por la esperiencia las verdades que al final de nuestro capítulo primero habíamos ya entrevisto. Recordemos brevemente su enunciado.

El sonido es un movimiento vibratorio.

Los cuerpos sonoros son cuerpos elásticos, cuyas moléculas, bajo la accion de la percusion, del frotamiento ú otro medio cualquiera, ejecutan una série de movimientos de vaivén alrededor de su posicion de equilibrio. Estas vibraciones se comunican en seguida en todas direcciones á los medios circundantes, gaseosos, líquidos ó sólidos y se propagan hasta el órgano del oido. En este órgano, el movimiento vibratorio obra sobre los nervios especiales de él y determina en el cerebro, si la velocidad y la amplitud de las vibraciones son suficientes, la sensacion del sonido.

Por medio de esperimentos muy sencillos podemos evidenciar la existencia de las vibraciones sonoras.

Desde luego las vibraciones son frecuentemente perceptibles al tacto. Si con una varilla de madera ó metal se dan golpes á las ramas de unas pinzas colgadas, se oye un ruido, y al aplicar los dedos se siente un temblor, muy fácil de distinguir del movimiento de oscila-

lacion visible. Lo mismo acontece si se hace resonar una campana, un timbre ó un instrumento de música de volumen suficiente; y asimismo, cuando se aplican los dedos á la tabla de armonía de un piano, en el momento en que lo tocan. Un tambor ó un clarín que pasan por delante de las ventanas de una casa, hacen temblar los cristales; y la detonacion de un cañon á grande distancia produce un efecto semejante. Si el cañon se descargase muy cerca, rompería los cristales; pero en el caso anterior, el efecto producido por la agitacion sonora se complica por el movimiento de transporte y el vacío causado en el aire por la explosion.

Las vibraciones sonoras son visibles en las cuerdas y las varillas metálicas. Si se toma una cuerda de violin, se la tiende por sus dos estremidades sobre una superficie de color oscuro—en los instrumentos de cuerda se cumple esta condicion—y se provoca en ella un sonido con un arco ó con otro medio, se ve que la cuerda se ensancha desde las estremidades al centro, y presenta en este último punto una hinchazon aparente, debida al movimiento rápido de vaivén que ejecuta. La cuerda se vé á un tiempo, por decirlo así, en sus posiciones extremas y medias, merced á la persistencia de las impresiones luminosas sobre la retina.

Consideremos en vez de una cuerda una varilla ó tallo metálico flexible, fija por uno de sus extremos. Separándola de su posicion de equilibrio, se la vé ejecutar una série de oscilaciones cuya amplitud va cada vez disminuyendo y acaba por anularse. Mientras duran las vibraciones de la varilla se oye un sonido que se debilita y se apaga con el movimiento mismo.

Las ramas de un diapason que resuena oscilan visiblemente de tal modo, que el ojo no distingue claramente sus contornos: el efecto de las vibraciones es el mismo que en el caso de una cuerda sonora, y la vision confusa que de ello resulta procede tambien de la duracion de la sensacion luminosa. El ojo ve á un tiempo

cada rama en todas las posiciones que ocupan á uno y otro lado de su posición de equilibrio.

Cuando se frota en sus bordes una campana ó un timbre metálico por medio de un arco de violín, produce sonidos muy enérgicos. Pues bien; es muy fácil atestiguar la existencia de las vibraciones que les dan origen. Para ello se pone una varilla metálica con la punta afilada, sin tocarla, en el borde de la campana, la cual, al vibrar, se pone en contacto con aquella y resultan golpes secos y repetidos muy fáciles de distinguir del sonido mismo. La esfera de un péndulo pone de manifiesto el mismo fenómeno, pues es despedida con fuerza y oscila durante todo el tiempo que dura el sonido.

De igual modo, una bolita metálica situada en el interior de un timbre, salta cuando resuena este último y acusa de este modo la existencia de las vibraciones que animan á las moléculas del cuerpo sonoro.

Además de las vibraciones que son perpendiculares á las cuerdas y que por eso se llaman *vibraciones trasversales*, tales como las que acabamos de citar, las cuerdas, las varillas metálicas de vidrio ú otras sustancias elásticas, ejecutan también *vibraciones longitudinales* que pueden hacerse sensibles por medios semejantes á los que se acaban de describir. Tomemos, por ejemplo, una espiga de hierro ó un tubo de vidrio, una de cuyas estremidades esté fija y frotémoslos en el sentido de la longitud con un pedazo de tela espolvoreada con colofonia. Se produce un sonido. Si previamente se ha aplicado á la estremidad libre de la espiga una bolita de modo que forme con ella como un péndulo, se verá entonces á ésta animarse y oscilar en todo el tiempo que dura el sonido; su movimiento será en este caso longitudinal como las vibraciones que lo producen.

El instrumento de Trevelyan que ya hemos citado y por cuyo medio se obtienen sonidos por el contacto

de dos cuerpos sólidos á temperaturas desiguales, permite tambien hacer sensible á la vista la existencia de las vibraciones sonoras. Colocando atravesada sobre el apoyo metálico una barra terminada por dos bolas, el peso de esta barra hace las vibraciones mas lentas y se las sigue con la vista en el balanceo alternativo que ejecutan la varilla y las bolas. Tyndall ha ideado un medio ingeniosísimo de poner tales vibraciones en claro. Para ello fija en el centro del apoyo metálico un disco pequeño de plata pulimentada, sobre el cual proyecta un haz de luz eléctrica. La luz reflejada sobre este pequeño espejo va á caer sobre una pantalla, y al punto que el hierro caliente se encuentra en contacto con la masa fria de plomo, se ve el reflejo de la luz oscilar sobre la pantalla.

Estudiando los efectos del calor se puede probar que la causa de las oscilaciones del apoyo, en el instrumento de Trevelyan, está en las dilataciones alternadas del plomo en los puntos de contacto del hierro caliente; cuya dilatacion brusca da efecto á la formacion de puntos salientes que hacen oscilar el apoyo, de donde resulta una série de choquécitos lo suficientemente multiplicados para producir, á causa de las vibraciones en el aire, un sonido que de este modo llega á nuestro órgano auditivo.

Al describir los procedimientos que se emplean para medir el numero de vibraciones, veremos otras pruebas de la existencia de estos movimientos moleculares. Por otra parte, ya hemos dicho que por lo comun, cuando un cuerpo sólido produce un sonido, el movimiento vibratorio se hace patente por el estremecimiento que la mano experimenta al palpar el cuerpo.

Hasta aquí tan sólo hemos considerado, para hacerlas patentes, las vibraciones de los cuerpos sólidos. Pero tambien pueden hacerse igualmente sensibles, aquellas que la produccion ó trasmision del sonido determina en las masas líquidas y en los gases. Un vaso

lleno de agua hasta la mitad, vibra como la campana, cuando se frotan sus bordes con un dedo mojado ó bien con un arco de violin. Además del sonido se ven sobre la superficie del líquido una multitud de estrias que se dividen en cuatro, algunas veces en seis grupos principales y dichas estrias son tanto mas espesas cuanto mas agudo es el sonido. Si se fuerza la intensidad del sonido, se hace tan viva la amplitud de las oscilaciones que el agua salta de cada grupo en menuda lluvia.

Por último, si se adapta á un fuelle acústico un tubo sonoro, se pueden hacer constar las vibraciones de la columna de aire interior del siguiente modo: se suspende dentro del tubo con un hilo un marco recubierto por una membrana tensa. Cuando el tubo resuena, los granos de arena de que la membrana estaba previamente recubierta, saltan en la superficie, con lo cual se prueba la existencia de las vibraciones de la columna gaseosa transmitidas á la membrana misma y á los granos ligeros que la cubrían. Hemos visto que las vibraciones transmitidas por el aire poseen algunas veces gran energía, como lo prueba el estremecimiento de los cristales y aún su fractura cuando cerca de ellos se verifica un ruido algo fuerte como el que produce el estampido de un cañon.

Hé aquí, pues, un hecho fundamental perfectamente demostrado por la esperiencia. El sonido resulta de los movimientos vibratorios que ejecutan los cuerpos elásticos, sólidos, líquidos ó gaseosos, vibraciones que se transmiten al órgano del oido por intermedio de diversos medios que separan á este último del cuerpo sonoro. Se comprende ahora bien por qué el sonido no se propaga en el vacío. El timbre herido por el martillo debajo del recipiente de la máquina neumática, vibra también cuando está hecho el vacío, pero sus vibraciones no se transmiten ya, ó al menos, sólo se transmiten imperfectamente por intermedio de la almohadilla en que descan-

sa el aparato y de la débil cantidad de aire que queda siempre en el vacío más perfecto que se pueda realizar.

§ 2.—La altura de los sonidos está en razón del número de vibraciones sonoras.

Hemos visto que los sonidos se distinguen unos de otros por varios caractéres, los cuales hemos definido al principio del capítulo precedente.

El más importante de esos caractéres, tanto bajo el punto de vista físico como bajo el punto de vista musical, es la *altura ó tono*, es decir, el grado de agudez ó gravedad del sonido. Todo el mundo distingue los sonidos agudos de los sonidos graves, sea cualquiera, el cuerpo sonoro que los produzca. Dos sonidos de la misma altura se dice que están al *unísono*. En general, los oídos ménos ejercitados reconocen el unísono y saben decir cuál es el más alto de dos sonidos próximos á aquel. Estudiemos ahora la causa física de estas diferencias ó semejanzas.

La altura de un sonido depende únicamente del número más ó menos grande de vibraciones que ejecuten á la vez el cuerpo sonoro y los medios por los cuales se propague el sonido. Cuanto más agudo es éste, más considerable es dicho número; cuanto menor es el número de vibraciones, más grave es el sonido producido. Veamos qué experimentos han conducido á los físicos á demostrar tan importante ley, y de qué modo han procedido para contar esos movimientos que el ojo y los demás sentidos solo llegan á apreciar de una manera harto confusa.

La *rueda dentada*, imaginada por Savart, permite contar el número de vibraciones que corresponde á un sonido dado. En este aparato el sonido se produce por el choque de un naipe contra los dientes de una rueda á la cual se le imprime movimiento por medio de un manubrio. Cuando la velocidad de la rueda es poca

sólo se oye una serie de ruidos aislados, cuya reunion, hablando en propiedad, no produce un sonido, siendo por esta razon su altura inapreciable. Pero á medida que aumenta la velocidad, las vibraciones mul-

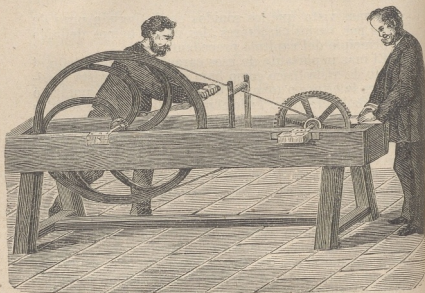


Fig. 6.—Rueda dentada de Savart.

tiplicadas del naípe trasmitidas al aire, producen un sonido continuo tanto más agudo cuanto más considerable es la velocidad. Un contador que acompaña á la rueda, nos da el número de vueltas de aquella en un segundo. Multiplicando este número por el de los dientes arroja la mitad del número total de vibraciones, porque es evidente que la carta primeramente se dobla, y des-

pues vuelve á su primera posición y da dos vibraciones sencillas por cada diente que pasa.

Savart obtenia con una rueda de 600 dientes hasta 40 vueltas por segundo y por consiguiente 48,000 vibraciones sencillas en este mismo tiempo; lo que corresponde, como se verá mas tarde, á un sonido de una agudez ó elevacion estrema.

La *sirena*, cuya invencion se debe á un fisico francés, Cagniard-Latour, sirve tambien para medir y aún con mas precision que la rueda de Savart, las vibraciones de un sonido dado.

En este aparato el sonido es producido por la corriente de aire del secreto de un fuelle que pasa por una série de agujeros distribuidos á igual distancia en las circunferencias de dos platinas metálicas, una de las cuales está fija y la otra móvil. Cuando los agujeros se corresponden, la corriente de aire pasa, y su fuerza de impulsión obrando sobre los canales oblicuos que forman los agujeros, determina el movimiento de la platina superior. Por este mismo movimiento la coincidencia de los orificios cesa, despues se restablece, cesa de nuevo y esto determina una série de vibraciones cada vez más rápidas en el medio en que está sumergido el instrumento. Si hay veinte agujeros, veinte son las vibraciones por cada vuelta de la platina, de suerte que contando el número de vueltas que se efectuan para un sonido dado en un segundo, se puede calcular fácilmente el número total de vibraciones. El eje de la platina móvil engrana por medio de un tornillo sin fin, con una rueda dentada, cuyo número de dientes es igual al de las divisiones de un marco esterior. Cuando la rueda avanza un diente, la aguja marca una division, de modo que el número de divisiones recorridas por la aguja marca el de las vueltas y entonces, por una simple multiplicacion da el de las vibraciones sonoras. Al fin de cada vuelta, un estilete hace andar un diente de una segunda rueda, de modo que si

la primera rueda tiene 100 dientes, la aguja del segundo cuadrante indica los centenares de vueltas.

El contador está dispuesto de manera, que solo marcha á voluntad, esto es, cuando la velocidad alcanzada produce el sonido que se buscaba. La dificultad está en conservar la constancia de la velocidad, á fin de tener un sonido de una altura invariable durante cierto tiempo.

La sirena funciona tambien en el agua y en este caso el líquido, saliendo por los orificios bajo la presion de una columna de agua muy elevada, es el que determina las vibraciones. El sonido que en esta disposicion se obtiene, prueba que los líquidos entran directamente en vibracion como los gases, sin que el sonido les sea comunicado por las vibraciones de un sólido. El nombre de sirena lo debe precisamente á la propiedad de producir sonidos ó cantar en el agua como las encantadoras de la fábula.

La sirena de Seebeck, está construida de un modo completamente diferente; pero el principio es el mismo, es decir, que el sonido es producido por el paso del aire á través de los orificios de un disco. El disco se pone en movimiento por un mecanismo de relojería y la velocidad de su rotacion se averigua tambien por medio de un contador.

Recientemente se han ideado procedimientos gráficos para medir con exactitud el número de vibraciones sonoras. La idea primera de ellos se debe á Savart.

Un diapason ó una varilla metálica con punta muy fina, traza al vibrar líneas onduladas sobre la superficie de un cilindro que gira y está recubierto de negro de humo. El número de sinuosidades marcadas de este modo indica el de las vibraciones. Este método se emplea especialmente cuando se trata de comparar dos sonidos entre sí, con relacion á su altura.

Por ejemplo, puede fijarse sobre un diapason el estilete que traza las líneas sinuosas y sobre un segundo diapason la lámina recubierta de negro de humo en la que se verifica el trazado de esas líneas. Haciendo vibrar

simultáneamente los dos diapasones, la línea sinuosa que se obtenga será evidentemente el resultado de la

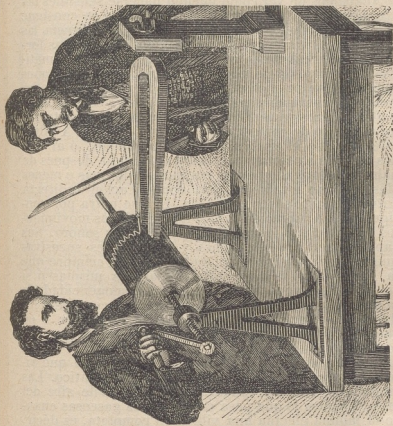


Fig. 7.—Estudio gráfico y registro de las vibraciones sonoras.

combinación de dos movimientos vibratorios paralelos si los dos diapasones vibran en el mismo sentido, rectangulares si están colocados formando ángulo recto.

§ 3.—Las ondas sonoras aéreas.

Acabamos de ver cómo pueden hacerse sensibles las vibraciones de los cuerpos sonoros; cómo se consigue contar su número y demostrar por la experiencia las leyes de sus variaciones en los sólidos de diversas formas, en las columnas gaseosas, cilíndricas ó prismáticas. Pero cuando un cuerpo resuena, las vibraciones que ejecutan sus moléculas no llegan á nuestro oído causando la sensación correspondiente, sino á condición de agitar progresivamente la masa de aire interpuesta entre el centro de conmoción y nuestros órganos. A faltar este vehículo el sonido ya no es percibido, ó al menos no llega á nosotros, sino muy debilitado, después de haberse propagado por los cuerpos sólidos mas ó menos elásticos que establecen una comunicación indirecta entre el cuerpo sonoro y el oído. El aire entra por consiguiente en vibración bajo el impulso de los movimientos que efectúan las moléculas del cuerpo sonoro. Sus capas sufren condensaciones y dilataciones sucesivas que se propagan con velocidad constante, siempre que la densidad y la temperatura sean las mismas ó si se quiere, cuando sea perfecta la homogeneidad de la mezcla gaseosa. Vamos á intentar el hacer comprender cómo se suceden las ondas sonoras en el aire ó en cualquier otro gas y cómo ha podido medirse su extensión.

Supongamos que la lámina de un diapason que vibra se coloca en presencia de un tubo prismático. Las vibraciones van á propagarse á la columna de aire del tubo. Veamos lo que pasa en las capas gaseosas cuando la lámina efectúa una vibración completa, es decir, cuando pasa de su posición a'' para ir á a' y volver en seguida á a'' pasando cada vez por su posición media a (fig. 8). Este movimiento de vaiven es análogo al del péndulo; de suerte que la velocidad de la lá-

mina es alternativamente creciente y decreciente conforme se aproxime ó se aleje de la posición a .

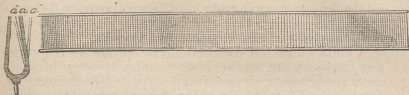


Fig. 8.—Condensaciones y dilataciones que constituyen la onda sonora aérea.

Durante el movimiento de a'' á a' , las capas de aire del tubo, recibiendo las impulsiones de la lámina, experimentarán condensaciones sucesivas y desiguales que se transmitirán de una á otra sin que por esto haya transporte de moléculas. Estas condensaciones al principio crecientes alcanzarán un máximo á partir del cual disminuirán hasta que la lámina vibrante haya alcanzado la posición a' .

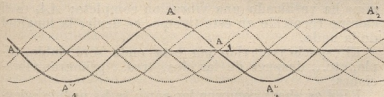


Fig. 9.—Representación gráfica de las fases de una onda sonora.

A su vez de a' á a'' las mismas secciones gaseosas vuelven á su densidad normal, se dilatan al contrario

en virtud de su elasticidad, para llenar el vacío que ha dejado delante de la columna de aire la segunda escursión de la lámina. La misma propagación de las dilataciones en las capas gaseosas cada una de las cuales oscilará de este modo á cada lado de una posición de equilibrio, transmiten á la capa siguiente los movimientos sucesivos de que ella misma está animada.

A cada vibración completa de la lámina corresponde por consiguiente una serie de condensaciones: la *semi-onda condensada*; después una serie de dilataciones: la *semi-onda dilatada*. Su unión forma una onda sonora completa que camina por toda la extensión del tubo y que, como se ve, es producida por una vibración doble de la lámina elástica.

Para representar el estado de la columna de aire en toda la extensión de una onda sonora, se ha convenido en figurar los diversos grados de condensación por perpendiculares situadas por encima de la dirección de la onda, y por perpendiculares trazadas debajo de esta dirección, las dilataciones que siguen (fig. 9); estas líneas tienen una longitud nula cuando la densidad es la densidad normal; su longitud máxima corresponde á las condensaciones y á las dilataciones la mínima. La curva $AA''_1 A'_1 A_1$ representa entonces el estado de las capas sucesivas del tubo en el momento en que la lámina ha verificado una vibración completa; AA_1 es el camino recorrido en este tiempo, es decir, la longitud de la onda.

El espacio recorrido por esta onda será doble, triple, etc... después de las dos, tres... primeras vibraciones.

Fácil es ahora comprender cómo se ha podido calcular la longitud de la onda de un sonido de altura dada. Supongamos un sonido que ejecute 450 vibraciones por segundo. A la temperatura de 15° —si tal es en este momento la temperatura del aire—siendo la velocidad de propagación 340 en el mismo intervalo, es claro que

en el momento en que el sonido llegue á esta distancia, se han producido en el aire tantas ondas sonoras sucesivas como vibraciones completas del centro de emision, es decir, 450. Cada una de ellas tiene, pues, de longitud $\frac{1}{450}$ del espacio recorrido, ó lo que es lo mismo, 340 metros; la longitud de la onda es en este caso 0 metros 755 milímetros.

Si pasamos del caso en que las ondas se propagan en una columna prismática, á aquel en el cual la propagacion se verifica en todos sentidos alrededor de un punto, las condensaciones y dilataciones sucesivas de las capas de aire se distribuirán á distancias iguales del centro de emanacion. Las ondas serán esféricas, sin que cambie su velocidad de propagacion, ni su longitud.

Para darse cuenta del hecho en virtud del cual las ondas sonoras se propagan sin que haya transporte de moléculas, se compara ordinariamente las ondas sonoras al movimiento de una cuerda á la que se imprime una brusca sacudida. Las ondulaciones recorren la cuerda de una punta á otra; si está atacada por una de ellas la onda vuelve sobre sí misma.

En uno y otro caso el movimiento se trasmite sin que haya cambio real en la distancia de las moléculas al punto de donde parte la impulsión. De igual modo, si se arroja una piedra al agua, la agitacion producida en la masa líquida se propaga formando una série de ondas concéntricas que se debilitan á medida que crece la distancia, pero sin que las moléculas de agua sean realmente arrastradas, como es fácil comprobarlo observando la posicion fija que conservan los cuerpos pequeños que flotan en la superficie. Pero en ambos ejemplos, por otra parte bien propios para dar una idea de la propagacion de las ondas sonoras, hay una diferencia esencial que no debe olvidarse. Las condensaciones y dilataciones del aire debidas á las vibraciones de los

cuerpos sonoros, se efectúan en el mismo sentido del movimiento de propagación: se forman paralelamente á la dirección de cada rayo sonoro, mientras que, las ondulaciones de la cuerda, ó las de la superficie del agua, se efectúan en un sentido perpendicular al movimiento de propagación. Sabido es que tal es precisamente el caso de las ondas que caminan en el medio denominado éter, que tienen por origen las vibraciones de los manantiales luminosos (1).

§ 4. — Superposición de las ondas sonoras.

Por lo que se acaba de decir, se explica perfectamente la trasmisión de un sonido único que el aire, por decirlo así, transporta hasta nuestro oído. Pero si el aire es el vehículo de las vibraciones sonoras, ¿cómo es que las propaga sin alterar las de varios sonidos simultáneos?

Asistimos á un concierto. Numerosos instrumentos emiten á cada instante sonidos que difieren por la intensidad, el tono y el timbre. Los centros de emisión están diversamente distribuidos en la sala. ¿Cómo la masa de aire que encierran las paredes puede transmitir á la vez tantas vibraciones, sin que haya completa cacofonía? O mejor todavía: estamos en una mañana de primavera. La lluvia cae fina y abundante, y las gotitas al tocar el suelo forman una multitud de pequeños ruidos que llegan distintamente al oído; los cantos de las aves que á la llegada de la primavera se despiertan en todas partes, se elevan en el aire y parecen atravesar la ligera bruma que enturbia el horizonte. Por encima de todos esos trinos y gorjeos sobresalen el canto del gallo, los ladridos de los perros, el traqueteo y el ruido consiguiente de los carros que ruedan, el tañido de las

(1) Véase el capítulo IX (p. 141) de nuestra obra *La luz y los colores*.

campanas, las mil voces humanas que pululan de acá para allá; todos esos cantos, gritos, palabras y ruidos resuenan á la vez, sin que de ello resulte para el oído ninguna confusión. Todos esos sonidos múltiples, cuya simultaneidad sería discordante si se produjesen en un pequeño recinto, se estienden por la vasta estension de aire que corona la llanura, fundiéndose de este modo en una dulce armonía.

Aquí se presenta también la misma cuestión: ¿Cómo el aire puede transmitir á la vez, y distintamente, tantas ondulaciones emanadas de centros diferentes, tantas vibraciones que en modo alguno son isócronas? ¿Cómo la intensidad, la altura y el timbre de cada sonido pueden coexistir sin alteración en ese medio elástico y movable?

Es este un problema, cuyos datos parecen tan complejos que escapan al análisis. Sin embargo, la teoría da cumplida demostración de estos fenómenos, cuya explicación parece tan difícil al principio; y varios sencillos experimentos justifican sus conclusiones. Dos sábios geómetras del último siglo, Daniel Bernouilli y Euler, demostraron el principio de la *coexistencia de los pequeños movimientos de las pequeñas oscilaciones* en un mismo medio.

Arrojad ahora en el agua, en sitios próximos, dos ó muchas piedras, y vereis los círculos concéntricos, producidos por cada una de ellas, entrecruzarse sin destruirse, sobre todo si su amplitud no es demasiado grande.

Si en una vasija de forma elíptica y llena de mercurio se arroja una gota del mismo líquido en uno de los focos de la elipse, se forman ondas circulares concéntricas á dicho foco y despues ondas reflejadas las cuales van á concurrir al segundo foco de la curva. Las cosas pasan evidentemente de igual modo que si hubiesen caído á un tiempo dos gotas en cada foco.

Este ingenioso experimento demuestra, por lo tanto,

de una parte la coexistencia de las ondas simultáneas, y de otra la ley de su reflexion. Haciendo la restriccion de que hemos hablado mas arriba, acerca de la direccion de las ondas sonoras, él da una idea muy exacta de la reflexion de los sonidos y de su propagacion simultánea en el aire.

§ 5.—Distinciones entre los sonidos musicales y los ruidos.

Se da generalmente el nombre de *sonidos musicales*, á los que son susceptibles de ser comparados entre sí, con relacion á su *altura*. Se reserva la denominacion de *ruidos* para las sensaciones auditivas, cuyo grado de agudez ó gravedad no puede apreciar el oido. Esta distincion, que todo el mundo hace fácilmente, ¿puede ser definida científicamente, ó tan sólo reconoce por causa la imperfeccion, la carencia de sensibilidad ó esperiencia del órgano del oido? ¿Hay, en una palabra, diferencia especifica entre un ruido y un sonido musical?

Empecemos por dar algunos ejemplos de ambos modos de sensacion.

Para todos, el choque de dos piedras una contra otra, y en general el de dos cuerpos sólidos poco elásticos ó de forma irregular, el efecto de la marcha de los carruajes por los empedrados de las calles, el chasquido del látigo, las detonaciones de las materias esplosivas, el rumor de las olas, los gemidos del viento en los bosques, etc., son ruidos. A primera vista, parece imposible asignar el tono, la altura musical de estas especies de sonidos. Lo contrario sucede naturalmente con los sonidos que dan los instrumentos de música, puesto que la construccion de éstos, tratándose de instrumentos de cuerda, tubos ó de viento, tiene precisamente por objeto la produccion de sonidos comparables bajo el punto de vista

de su altura. Las diferencias de timbre ó de intensidad en nada alteran esta cualidad esencial, que le ha dado nombre.

No sabemos todavía en qué consiste el ruido; pero se acaba de ver que la altura musical de un sonido no depende más que de un solo elemento, de la rapidez de la vibración que anima á las moléculas del cuerpo sonoro, y que éste transmite regular y periódicamente al oído. Conocido el número de estas vibraciones isócronas, la altura del sonido está determinada. Hemos visto que la sensibilidad del oído es limitada y que por esta razón no conseguimos comparar y percibir los sonidos musicales, si el número de vibraciones sencillas no está comprendido entre 52 y 75,000; mas esta cuestión de sensibilidad no altera en nada la naturaleza de la vibración del cuerpo sonoro.

Cuando se oye solo un sonido musical, la sensación auditiva es constantemente semejante á sí misma; la intensidad y el timbre pueden variar, es cierto, pero persiste el número de vibraciones y su sincronismo. Esto es lo que dice Helmholtz en su *Teoría fisiológica de la música*. «Una sensación musical aparece al oído como un sonido perfectamente tranquilo, uniforme é invariable; mientras dura, no se puede distinguir ninguna variación en sus partes constitutivas:» salvo la excepción, que este sábio se olvida de hacer, bajo el punto de vista del timbre y de la intensidad.

La combinación de dos ó varios sonidos musicales da también la sensación de un sonido musical, sensación mas ó menos agradable, según la relación de las alturas de los sonidos componentes. Puede haber disonancia, sin que por eso el oído deje de sentir que hay combate entre sonidos comparables entre sí, con respecto de la altura. Con todo, en este caso la combinación de los sonidos discordantes produce una impresión que se aproxima á la sensación del ruido, y tanto más, cuanto más corta sea la duración de cada sonido elemental.

Cuando se tocan á un tiempo brusca y rápidamente todas las teclas de un piano ó se las recorre con prontitud de un extremo á otro, la cacofonía que resulta se parece mucho á lo que llamamos un ruido. Lo mismo sucedería con un violín si se resbalase con mucha rapidez un dedo de un extremo á otro de la cuerda tocada por el arco; compréndese perfectamente que también el ruido especial que resulta está formado de sonidos musicales y sin embargo, el oído es impresionado, al subir y bajar, de un modo análogo al del viento que zumba ó murmura. La transición del sonido parece por consiguiente producirse de un modo insensible, de lo cual podría ya concluirse que ciertos ruidos son mezclas de sonidos musicales combinados irregularmente fuera de las leyes de la armonía. La causa física del ruido procedería en este caso de la coexistencia en el aire de un número mayor ó menor de vibraciones, cada una de las cuales puede ser periódica, sincrónica, pero cuyos periodos no tienen entre sí ninguna relación sencilla.

Otra causa de la sensación del ruido, ó si se quiere, de la dificultad que siente el oído de apreciar la altura del sonido parece que es la gran brevedad de la conmoción sonora. El ruido de un martillazo sobre la piedra ó la madera, el choque de dos piedras, el chasquido de un látigo, la detonación de un arma de fuego, están al parecer en este caso. En los cursos de física se hacen diversos esperimentos que prueban muy bien que la imposibilidad de apreciar la altura musical de estos sonidos sólo es relativa; lo que ocurre es que la duración de su impresión sobre el oído es muy corta; pero si se hace que se sucedan sin interrupción diversos ruidos de este género, la imposibilidad desaparece. Por ejemplo, tenemos siete pedazos de madera de forma y dimensiones convenientes; si se les arroja separadamente al suelo, el oído no percibe más que ruidos cuya altura no sabe apreciar; pero arrojándolos

sucesivamente en el orden del mayor al menor, se reconoce la *gama* de los sonidos tal como se la emplea en música. El primero, el tercero y el quinto, proyectados de igual manera, producen muy claramente el *acorde perfecto*. Un experimento análogo se hace con tres tubos cilindricos provistos cada uno de un émbolo que entra á frotacion. Elevando bruscamente el piston de uno de los tubos, el oido no percibe más que un ruido; si los pistones se elevan rápidamente unos despues de otros, del mayor al menor cilindro, el oido percibe tres sonidos que forman tambien el acorde perfecto, si se calculó convenientemente la longitud relativa de los tubos.

Cuando se inclina una garrafa casi llena de agua, como para verter el líquido, penetran sucesivamente en el interior de la vasija burbujas de aire y la introduccion de cada una no produce más que un ruido. Procurando que se sucedan rápidamente, se prueba que dichos sonidos pasan del grave al agudo, siendo entonces comparables con respecto á la altura. Hé aquí otros ejemplos que sacamos de la *Física* de M. Daguin. «Si se hace ruido con los dedos dejando caer bruscamente el del medio entre la base del pulgar y apoyando el anular contra esta base, puede reconocerse sobre poco mas ó menos la quinta, á condicion de que se levante y se baje sucesivamente el dedo pequeño de manera que se acorte y se alargue la columna de aire encerrada entre los dedos. Si se forman sobre una mesa dos burbujas de jabon hemisféricas infladas con una mezcla de gas hidrógeno y oxígeno y cuyos diámetros estén entre sí como 1 : 2, se reconocerá el intervalo de octava cuando se inflama una despues de otra.» No hay duda de que el oido, ejercitándose frecuentemente, llega en muchos casos á apreciar la altura de los sonidos que se consideran como simples ruidos y á incluir estos ruidos en el número de los sonidos musicales.

Savart intentó determinar el limite de brevedad de

los sonidos en lo concerniente á la posibilidad de apreciar su altura y dedujo de sus experimentos, hechos por medio de la rueda dentada, que es posible dar la altura de un sonido cuya duracion no exceda de cinco milésimas de segundo.

Parece, pues, que el ruido difiere del sonido musical, bien porque es producido por una mezcla de sonidos discordantes, ó porque la duracion del sacudimiento sonoro es demasiado breve para que el oido aprecie la altura del sonido simple y aislado que le constituye. Acabamos de citar varios hechos que justifican cada una de estas hipótesis. Hé aqui otros hechos que vienen todavía en apoyo de la primera.

A nuestro célebre acústico Savart se deben los experimentos que van á seguir. Para analizar los ruidos, para separar unos de otros los sonidos confusos de que él suponía estaban formados estos ruidos, se alejaba á distancias variables de una superficie sobre la cual iban á reflejarse los sonidos, por ejemplo, un muro vertical. De este modo reconoció que dominan los sonidos agudos si el oido se acerca á la superficie reflejante y que se perciben los sonidos mas graves á medida que el oido se aparta. El ruido de las olas del mar, el causado al arrugarse un papel que tenia en la mano, analizados de este modo, le revelaron que estaban formados por una multitud de sonidos que, separados, eran comparables entre sí bajo el punto de vista de la altura ó tono.

Al hablar de la teoría del timbre veremos de qué modo se pueden analizar los sonidos compuestos por medio de un aparato muy sencillo al cual se da el nombre de *resonador*.

En resumen, se vé que el sonido musical está caracterizado por la uniformidad, la regularidad y la constancia de las vibraciones periódicas é isócronas del cuerpo sonoro y por consecuencia, de las ondas aéreas que transmiten estas vibraciones al oido. Por el contra-

rio, un ruido es producido, ya por una mezcla de sonidos discordantes y confusos, ya por una gran brevedad en la duración de un sonido único cuya brevedad no permite al oído apreciar su altura. Varios sonidos musicales combinados de modo que agraden al oído, es decir, con arreglo á las leyes de la armonía, no forman un ruido; pero nada se parecería más al ruido que la mezcla de los sonidos musicales resultantes de todos los instrumentos musicales de una orquesta que tocasen á la vez en todos los tonos sin ritmo, sin armonía y sin medida. Todas las vibraciones coexistentes de este modo en el aire, contrariándose de todas las maneras posibles, producirían la más horrible cacofonía.

§ 6.—Piedras musicales; fenómeno del Gebel-Nagus; estatua de Menon.

El sonido que da un cuerpo sonoro en vibración se acerca tanto más á ser un sonido musical cuanto más simétrica sea su forma, y la elasticidad de la materia que lo constituya sea mayor y más homogénea.

El modo de producir las vibraciones parece que también influye algo en el fenómeno. Así es que una piedra arrojada sobre el suelo no da ordinariamente más que un ruido; proyectada con una honda gira rápidamente sobre sí misma y el zumbido que de ello resulta es entonces un sonido cuya altura puede ser apreciada; lo mismo sucedería si al proyectarla sobre un suelo duro, resistente y por tanto dotado de cierta elasticidad, se tiene cuidado de lanzarla de manera que se le imprima una rotación rápida sobre sí misma. Haciéndola rebotar sobre una capa de hielo en un estanque, se oye una serie de sonidos que poseen todo el carácter de los sonidos musicales.

Varias piedras convenientemente suspendidas y puestas en movimiento para que choquen, producen en

ocasiones sonidos musicales. Hé aquí algunos hechos relativos á esta propiedad singular que tomamos de la revista científica *La Naturaleza* (1).

«M. Ricard Nelson escribe al periódico inglés la *Naturaleza* una interesante carta en la que se habla de ciertas piedras musicales que se encuentran muy frecuentemente en las inmediaciones de Kendale, ciudad próxima á Lancaster, en el Vestmoreland. Paseándome por los alrededores de Kendale, dice este observador, á través de los montes y los peñascos, se me ha ocurrido algunas veces la idea de recoge ciertos guijarros que aquí se les llama «piedras musicales.» Son generalmente planas, desgastadas por el tiempo y ofrecen formas particulares; cuando se las golpea con un pedazo de hierro ú otra piedra, dan un sonido musical bien diferente del ruido sordo que produciría un guijarro ordinario. Los sonidos que con tales piedras se obtienen son por lo general bastante análogos; pero conozco personas que poseen ocho de estas piedras que golpeadas sucesivamente producen una octava muy clara y distinta. «Recordamos, añade la Revista francesa, haber visto en París, en una fiesta pública, á un físico que al aire libre tocaba piezas musicales hiriendo con una espiga de hierro gruesos cantos de sílex colgados con hilos de seda. Los sonidos que obtenía eran límpidos y puros. Hay que agregar á esto, que las piedras silíceas tenían formas muy irregulares. Estas especies de armonías nada tienen de misteriosas; la sonoridad de estas piedras era debida ciertamente á la homogeneidad y á la elasticidad de la especie mineral que las constituye. Hé aquí un hecho que nos esplicamos ménos, lo cual procederá tal vez de la falta de claridad en la descripción: «Un músico distinguido, M. A. Elwart, ha

(1) El director de esta interesante revista, Gaston Tissander, es el intrépido compañero de los dos mártires de su abnegacion por la ciencia, Bivel y Crocé-Spinelli, muertos el 15 de abril de 1875 en una memorable ascension aerostática.

tenido la idea de tocar con la palma de la mano la taza de la fuente que hay en el patio de honor del Instituto, y ha reconocido que dicha taza dá un sonido musical que corresponde con estrema precision al *acorde perfecto mayor* de fa natural.» Que un sonido esté al unisono con el que los músicos denominan *fa* no tiene nada de particular; pero que por sí solo forme un acorde perfecto es lo que nos parece estravagante y lo que el redactor de la *Naturaleza* no explica.

La misma Revista cita otro hecho muy curioso observado por el capitán Palmer en las faldas del Gebel-Nagus, colina arenosa cerca del Sinaí. «La estension de la pendiente arenosa se eleva á 60 metros de altura. La arena parece diferenciarse poco de la del desierto inmediato; sus granos, bastante gruesos, son restos de cuarzo, de la misma naturaleza que los peñascos de los alrededores, friables, con la fractura amarilla y están calentados por el sol. Esta arena es tan homogénea que basta el paso de un hombre, de una bestia de carga ó del viento, para provocar sobre dicha pendiente, inclinada próximamente 25° , el principio de un arrastre. El exceso de calor combinado con la lluvia determinan algunas veces tambien una separacion de la corteza superficial de las partículas arenosas. Cuando el movimiento de la arena adquiere cierta importancia, se forman pequeñas ondulaciones de siete ú ocho centímetros de altura que se podrian comparar con alguna exactitud al aceite ó á un liquido espeso que se deslizase sobre el hielo formando curvas y festones variados. En aquel momento se oye un ruido singular, débil al principio, y que va aumentando con la rapidez de progresion de la arena hasta que, alcanzando su máximum de intensidad, llega á ser perceptible á distancia. Tan singular ruido dura mientras la arena resbala por la pendiente.

«Este sonido es muy difícil de describir; no es ni

metálico ni vibratorio (1); parecería mejor á las notas mas agudas de un arpa eólica ó mas bien al rechinar producido por un tapon que se frotase con fuerza sobre un vidrio mojado; ó tambien, al ruido del aire despedido rápidamente de un frasco vacío; unas veces produce en el oído del viajero el efecto de un trueno lejano, otras el de los sonidos graves del violonchelo. Palmer habia observado que las capas superficiales eran mas aptas para la sonoridad que las capas subyacentes. La arena, á la temperatura de unos 40° centígrados, es tan movible, que la misma sequedad hace que se deslice; si el movimiento de la arena se produce cuando hay un poco de humedad en su superficie, el ruido es insensible.»

En suma, aquí vemos un fenómeno de acústica análogo al de la rueda dentada de Savart, es decir, una multitud de choques sucesivos en el primer caso, á la vez simultáneos y sucesivos en el segundo, que determinan la producción de un sonido musical. El choque es mas claro, los granos mas elásticos cuando la arena está seca. Esto se concibe; pero lo que el observador no dice, y hubiera sido curioso saber, es si el sonido variaba de altura como variaba de intensidad, á medida que el desprendimiento de la arena se efectuaba con mas rapidez.

Una antigua tradicion afirma que el salir el sol, cuando los primeros rayos del astro llegaban á herir la estatua colosal de Menon en la Tebas de Egipto, emanaban de la boca divina del príncipe sonidos armoniosos, fenómeno que parecia milagroso á las muchedumbres. Todavía quedan restos de la estatua, pero ignoramos si aún están dotados de tan singular propiedad. Nada habria de imposible en que el fenómeno fuera real pues se acaba de ver que ciertas piedras poseen una sonoridad

(1) No comprendemos bien lo que entiende el narrador por las expresiones «ni metálico ni vibratorio», siendo así que todo sonido es necesariamente vibratorio.

bastante pronunciada y por lo mismo se las llama *pedras musicales*; por otra parte, se concibe que la desigual elevacion de temperatura de las diversas partes de la mole de granito determinase á la salida del sol dilataciones parciales que fueran causa de movimientos moleculares semejantes á los del instrumento de Trevellan. Asi es que ciertas pastas de fundicion, calentadas muy desigualmente en sus diversas partes, dan por momentos sonidos muy distintos. Se ha emitido tambien la opinion de que el aire contenido en las hendiduras de la piedra, calentado por los rayos solares, podria entrar en vibracion, reproduciendo de este modo el fenómeno de las llamas cantantes. Pero antes de disertar sobre la causa probable del hecho, sería mas importanté estar seguros de su realidad.

CAPITULO VI.

Las vibraciones sonoras.

§. 1. — Vibraciones pendulares.

El sonido es debido á un movimiento vibratorio de los cuerpos ó de los medios elásticos. Los experimentos que hemos descrito han puesto este hecho fuera de duda.

Ahora vamos á estudiar de una manera mas íntima la naturaleza de este movimiento, las formas que afecta segun el medio en que se verifica, bien sea sólido, líquido ó una masa gaseosa. Este estudio es objeto de una rama de la ciencia muy elevada, delicadísima y difícil, razon por la cual nos ceñiremos á dar una idea de los hechos de esperiencia y de los principios sobre los cuales descansan.

Consideremos en primer término el movimiento vibratorio en los cuerpos sólidos elásticos.

Sea una varilla ú hoja de metal fija por uno de sus extremos. Separándola de su posicion de equilibrio, lo cual se hace cambiando en línea curva la línea recta que antes formaba y abandonándola despues á sí misma, verifica una série de oscilaciones que darán por resultado la produccion de un sonido, cuya altura é intensidad dependerán del número de oscilaciones y de

su amplitud. ¿Cómo se ejecutan estas oscilaciones ó vibraciones?

En el momento en que la mano que ha separado la varilla de su posición de equilibrio abandona á ésta, la velocidad de uno cualquiera de sus puntos, de su estremidad, por ejemplo, es nula: en seguida esta velocidad va aumentando hasta que la varilla vuelve á su punto de partida: en éste, su velocidad es máxima y por lo tanto suficiente para hacer que la varilla pase de dicha posición; sólo que, la fuerza de elasticidad, ejerciéndose entonces en sentido opuesto, tiende á disminuirse la velocidad. Así lo hace en efecto, hasta que llega á ser nula, lo cual sucede cuando la varilla se ha separado hácia la izquierda una cantidad precisamente igual á la que al principio habia sido separada hácia la derecha. Adquiere ahora un movimiento en sentido contrario, pero esta segunda escursión será en todo simétrica á la primera, de suerte que la varilla volverá á su posición de equilibrio, se desviará hácia la derecha y así sucesivamente. De donde se deduce que si no hubiese ninguna resistencia, ninguna causa

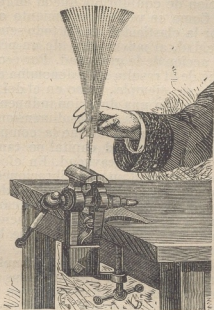


Fig. 10.—Vibraciones pendulares.

de perturbacion, el movimiento oscilatorio seguiria siendo siempre el mismo. Mas el frotamiento y la resistencia del aire disminuyen á cada paso la amplitud de la oscilacion que acaba por hacerse nula, y entonces la varilla ó la hoja elástica recobra su primitiva posicion de equilibrio y queda en reposo.

Como se vé, el movimiento oscilatorio engendrado por la elasticidad, es en todo semejante, salvo en la velocidad, al movimiento de un péndulo que oscila bajo la accion de la gravedad. Por eso la forma de vibracion que de él resulta se la denomina *vibracion pendular* (1). En este ejemplo, como en el del péndulo, las oscilaciones tienen una duracion independiente de la amplitud, pero que varia con las dimensiones, la forma de la varilla y la sustancia que la compone. Este isocronismo es una propiedad capital no tan solo en acústica sino tambien en la gravedad. En efecto, se ha visto que el número constante de vibraciones ejecutadas en un segundo por un cuerpo sonoro, determina la *altura* del sonido producido. Si por una causa ú otra el isocronismo cesa, el número de vibraciones, disminuye ó aumenta y entonces el sonido se hace mas agudo ó mas grave.

Hemos tomado aquí un ejemplo particular, el de una varilla rígida fija por una de sus estremidades, y hemos supuesto que desenvolviamos su elasticidad, al obrar sobre uno de sus puntos, por flexion. Pero sea cualquiera el modo de accion, la forma del cuerpo sólido y la índole de su elasticidad, permanece esencialmente la misma la naturaleza del movimiento vibratorio. Si hubiésemos

(1) Se llama *oscilacion ó vibracion*, ora el periodo de movimiento comprendido entre la posicion de equilibrio y la primera vuelta á esta posicion, ora el periodo doble comprendido entre dos vueltas consecutivas de la varilla á la misma fase del movimiento. En Francia se distinguen ambos periodos dando al primero el nombre de *vibracion sencilla*, al segundo el de *vibracion doble*, lo cual está conforme con el uso adoptado para los movimientos del péndulo. Los alemanes llaman vibracion á lo que nosotros denominamos vibracion doble. De aquí resulta que los números de vibraciones son para ellos la mitad menores que los nuestros.

considerado una cuerda tensa en vez de un cuerpo elástico de suyo, hubiéramos tenido un cuerpo dotado de elasticidad por tension; pero haciendo vibrar á dicha cuerda por flexion, pulsándola ó imprimiéndola un choque, ó bien frotándola con un arco, cada uno de sus puntos no describirá la misma especie de movimiento; sus vibraciones serán siempre análogas á las del péndulo. Por último, en vez de mover al cuerpo elástico perpendicularmente á su longitud, lo que produce vibraciones *transversales*, se le podría imprimir un movimiento en la direccion de esa longitud. Así, una varilla metálica, frotada de arriba abajo con el dedo mojado ó con un pedazo de tela espolvoreada con colofonia, experimenta entonces en su longitud contracciones y dilataciones periódicas que ocasionan un sonido. En este caso las vibraciones son *longitudinales*. Pero el movimiento elemental de cada una de las moléculas es siempre descomponible en las mismas fases que más arriba hemos analizado: es siempre un movimiento análogo al del péndulo; las vibraciones son siempre pendulares.

Una campana ó un timbre, una membrana tensa, una placa sonora, etc., en una palabra, un sólido elástico susceptible de emitir sonidos por percusion, frotamiento, etc., vibra siempre de la misma manera: sólo que, mientras que ciertas partes del cuerpo vibran, otras permanecen en reposo; hay regiones en que el movimiento vibratorio tiene una amplitud máxima, otras en que dicho movimiento es nulo; es decir, que el cuerpo sonoro se divide en *vientres* y *nodos* que varían segun las circunstancias. Las leyes de estas vibraciones son más ó menos complicadas; pero cada molécula considerada aisladamente sigue siempre la misma ley constante de oscilaciones isócronas.

Como despues de todo, los sonidos producidos por los cuerpos sólidos vibrantes no son perceptibles ínterin sus vibraciones no se comuniquen al oído por un

medio fluido, líquido ó gaseoso, y como, la esperiencia nos lo enseña, las cualidades del sonido dependen del número ó de la amplitud de las vibraciones del origen, se puede ya admitir, por analogía, que las vibraciones de los medios elásticos, tales como el aire, el agua, etc., son idénticas á las vibraciones de los sólidos. Hemos visto, en efecto, que el movimiento que constituye las ondas aéreas, movimiento que consiste en condensaciones y dilataciones sucesivas, es análogo al que antes hemos estudiado.

Sabido es que en el agua los sonidos se propagan como en el aire, con la diferencia en la velocidad de propagación. Para un mismo sonido las ondas sonoras líquidas tienen mayor estension, pero su forma es la misma: nada hay que alterar en la esplicacion dada para las ondas aéreas.

Fáltanos exponer de qué modo pasan las cosas cuando el sonido, en lugar de propagarse simplemente en los líquidos y gases, como sucede en el caso en que el cuerpo sonoro es un sólido elástico; toma origen en el fluido mismo. Pero comencemos por exponer los fenómenos.

Recordaremos sólo aquellos que se manifiestan en los tubos sonoros, puesto que despues hemos de describirlos mas ámpliamente. En estos, una columna gaseosa, aérea, de longitud determinada, contenida en las paredes de un tubo sólido, entra en vibracion y produce sonidos, cuando se hace penetrar por su embocadura una rápida corriente de aire. Para poner en vibracion la columna de aire, se procede de dos maneras diferentes. Unas veces, la luz del tubo está provista de una lámina elástica, delgada y flexible (*lengüeta*, batiante ó libre) que entra en vibracion por la influencia de la corriente de aire; de aquí, una corriente periódica del mismo que engendra el sonido; otras veces, la luz del tubo está labrada en bisel y divide la corriente gaseosa que pasa por ella, produciéndose de este modo

compresiones y dilataciones alternadas, vibraciones que se comunican á la columna de aire del tubo y á su vez la hacen vibrar. La vibracion de los labios en los instrumentos de música que, como la trompeta, son tubos terminados por una embocadura hemisférica ó cónica, conmueve la columna de aire y la hace vibrar al unísono. Los tubos vibran tambien de igual modo y producen sonidos cuando se los sumerje en el agua y entra por su luz una corriente líquida.

En todos los fenómenos en que los sonidos son producidos por las vibraciones de masas fluidas, hay un hecho comun y es, la salida por un orificio de una vena líquida ó gaseosa. Seria, pues, interesante estudiar la manera cómo se producen las vibraciones, cuando se reduce el hecho á su forma mas sencilla. Esto es lo que ha hecho Savart en una série de esperimentos sobre la salida de las venas líquidas que se escapan por un orificio practicado en pared delgada, bajo la influencia de una presión mas ó menos grande. Nuestro célebre compatriota llegó así á hacer constar numerosos y curiosísimos fenómenos que arrojan mucha luz sobre la cuestion, antes tan misteriosa, de la generacion de los movimientos vibratorios en el seno de los líquidos y los gases. Para dar una idea de estas investigaciones, lo mejor que podemos hacer es citar el resumen hecho por Mr. Maurat en una conferencia que este físico dió en 1869 ante la *Sociedad de amigos de las ciencias*.

«Comencemos, dice, por recordar cuál es, segun Savart, la constitucion de una vena líquida vertical corriendo por un orificio practicado en pared delgada. La parte mas cercana al orificio es límpida y trasparente; parece (al menos cuando no se la examina con precauciones particulares) inmóvil como una varilla de cristal. A continuacion de ella se vé una segunda parte turbia que presenta hinchazones y estrangulaciones alternativas, cuya posicion permanece con poca variacion constante, por más que sean producidas por porciones

de líquido que se renuevan continuamente. Este aspecto de la vena está fielmente reproducido por la figura 11 (primer dibujo de la izquierda.)

»Hagamos constar desde luego que la segunda parte de la vena debe su apariencia á su discontinuidad. Está formada, en efecto, por gotas separadas que dejan entre sí intervalos considerables relativamente á su diámetro. Para convencerse de ello, puede pasarse el dedo á través de la parte turbia y sucede muchas veces que el dedo no se moja. Púedese también, despues de haber coloreado fuertemente el líquido con una disolución de añil, poner verticalmente por detrás de la vena un hilo suficientemente iluminado y estará oculto en la primera parte que es continua, pero se verá fácilmente á través de la segunda. El experimento es todavía mas concluyente si se emplea un líquido absolutamente opaco como el mercurio. Finalmente, basta seguir con los ojos el movimiento de las gotas, mirando la vena de alto abajo, para percibir las claramente distin-

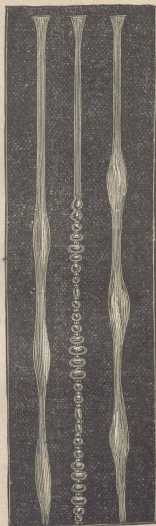


Fig. 11.—Constitucion de una vena ó chorro líquido.

tas (segundo dibujo de la figura). ¿Cuál puede ser la causa de este notable fenómeno?

»Mr. Maurat recuerda aquí los experimentos de Plateau sobre las formas de equilibrio de las masas líquidas cuando están sometidas únicamente á las acciones mútuas de las moléculas. Estas formas son la esfera, el cilindro y el plano. En un cilindro, el equilibrio es inestable desde el momento en que la altura excede el triple del diámetro; entonces la forma cilíndrica se destruye y el cilindro se resuelve en grandes esferas separadas por esferillas de dimensiones mucho mas pequeñas.

»Ahora bien, continúa, una vena no es otra cosa que un cilindro líquido, moviéndose en la dirección de su eje. La desigualdad en la velocidad de sus diferentes partes, que tiende sin cesar á disminuir su diámetro, puede modificar mucho el fenómeno; pero no puede evidentemente cambiar la naturaleza del mismo, porque, para moléculas poco separadas, esa desigualdad es insignificante. La vena líquida debe, pues, á partir de una pequeña distancia del orificio, comenzar á sufrir la misma transformación que el cilindro de Plateau; solamente la rapidez del movimiento es la que nos oculta las hinchazones y estrangulaciones que en ella se producen y cuya existencia atestiguó Savart. La parte turbia no empieza sino en el momento en que se establece la discontinuidad, es decir, cuando la transformación es completa. Según eso, puesto que su duración es proporcional al diámetro, y, por otra parte, la velocidad de salida es á su vez proporcional á la raíz cuadrada de la carga, la longitud de la parte límpida de una vena deberá ser también proporcional á estas dos cantidades, que es lo que resulta en efecto de las mediciones de Savart.»

Así, la apariencia que presenta á la vista el chorro ó salida de una vena líquida se explica por la formación de gotitas, unas relativamente mas gruesas que otras.

«Hablemos primero de las gotas gruesas. Sus diferentes moléculas no están animadas exactamente de la misma velocidad, pues pertenecen á puntos de la vena desigualmente distantes del orificio. El efecto de estas diferencias de velocidad es evidentemente el de formarlas, y como tienden siempre á volver al estado esférico, ejecutarán vibraciones que les darán, ya la apariencia de elipsoides alargados en el sentido vertical, ya por el contrario, elipsoides aplanados en el mismo sentido. En consecuencia, la vena presentará, en su parte enturbada, hinchazones correspondientes á las gotas que estén en el primer caso, estrangulaciones correspondientes á aquellas que estén en el segundo; y siendo las vibraciones sensiblemente isócronas, las distancias de un vientre al que le sigue deberán crecer como los espacios que un cuerpo pesado recorre en los segundos sucesivos de su caída, ó lo que es lo mismo, como la serie de los números impares (1).

»Busquemos ahora cuál debe ser el efecto sobre el medio ambiente, de la vena constituida tal como la acabamos de explicar. La sucesion regular de las gotas en un punto determinado comunica necesariamente al aire impulsiones periódicas iguales, capaces de producir un sonido si son lo suficientemente rápidas. Esto es en efecto lo que la experiencia confirma en la mayoría de los casos. Es cierto que el sonido es ordinariamente muy débil y que para oirlo es menester aproximar muy de cerca el oído á la vena; pero puede obtenerse mas intenso. Para ello se elegirá un orificio

(1) Si las gotas no son visibles al ojo, esto consiste en que la persistencia de las impresiones luminosas sobre la retina hace que cada gota aparezca á la vez en todas las posiciones sucesivas y bajo todas las formas que afecte. Este efecto desaparece cuando el ojo mira verticalmente siguiendo el movimiento del líquido; entonces la imagen de la gota móvil queda fija en el mismo punto de la retina; la gota parece en reposo y aislada como ella es en realidad. Haciendo el experimento en la oscuridad é iluminando despues la vena por medio de una chispa eléctrica, la duracion en extremo corta de la iluminacion hace ver la columna líquida bajo su forma verdadera, de igual modo que un relámpago muestra inmóviles los rayos de una rueda animada del movimiento más veloz.

circular bastante ancho á fin de que las gotas sean mas gruesas; se hará salir el líquido lo mas verticalmente posible y á una presión suficiente para que las impulsiones sean mas fuertes; por último, convendría atenuar todo lo posible el ruido de la caída en el recipiente inferior. Obtiénese entonces un sonido musical y desde que toma origen se observa un cambio notable en la vena, cuya parte límpida se acorta y cuyos nudos y vientres se hacen más pronunciados (tercer dibujo de la figura 11). Obsérvese el mismo cambio, y esto es digno de ser notado, cuando se produce un sonido de la misma altura cerca de la vena líquida.

»Como se vé, la salida de los líquidos va acompañada de movimientos vibratorios que pueden ser lo bastante rápidos é intensos para producir sonidos. Los experimentos de Masson prueban, que fenómenos absolutamente semejantes se producen en la salida de las venas gaseosas. Este físico, dice también Maurat, ha comprobado que se producen sonidos cuando se hace simplemente salir, por orificios circulares convenientemente dispuestos, el aire comprimido en una gran caja por medio de un fuelle acústico. El ruido que se oye es análogo á un silbato y formado por una mezcla muy compleja de sonidos que difieren por la altura y la intensidad. Si se rodea la vena gaseosa así producida con un tubo, cuyo eje ocupe la vena, la columna de aire del tubo se conmoverá por los movimientos vibratorios de la vena que él pueda reforzar, y se oirá un sonido musical muy puro y fácilmente determinable. El aparato será un verdadero tubo de órgano.»

Cúmplenos ahora tratar de algunos fenómenos que guardan con los precedentes la más estrecha analogía. Nos referimos á los sonidos producidos por llamas incandescentes las cuales han recibido los nombres de *llamas sonoras, cantantes ó sensibles*.

§ 2.—Llamas sonoras ó cantantes. Llamas sensibles.

¿Qué es una llama? Es la incandescencia de una vena gaseosa que se desprende de un cuerpo á una temperatura muy elevada. Compréndese, pues, inmediatamente la analogía que existe entre este fenómeno y el de la salida de una vena ó chorro líquido. El primer movimiento va acompañado de vibraciones que nacen en el seno del líquido, y que, comunicándose al aire ambiente, le hacen entrar en vibración á su vez y producen sonidos. En vista de esto, hay razones para presumir que en el seno de las llamas se verifican vibraciones semejantes. Falta comprobar su manifestacion en vibraciones sonoras y esto es lo que vamos á ver en los párrafos siguientes.

Ciertos hechos familiares muestran claramente que la llama va acompañada generalmente de ruidos. Así, en una chimenea cuyo tiro sea muy enérgico se oye una série de ruidos acompasados que cesan si la llama cesa; si la cortina de la chimenea es baja, el sonido se hace mas intenso, como acontece en las aberturas muy pequeñas de las pailas, y esto es motivado porque la columna de aire, más pronunciada, activa á la llama y entonces se oye un ronquido sonoro que adquiere en cierto grado el carácter de un sonido musical.

«Si se pasa rápidamente al aire, dice Tyndall, una bujía que arda tranquilamente, se obtiene una faja de luz dentada; y el sonido casi musical que al mismo tiempo se oye, anuncia el carácter rítmico del movimiento. Si, por otra parte, se sopla sobre la llama de una bujía, el ruido producido por su agitacion indica tambien una agitacion rítmica.»

Todo esto era conocido: pero los sonidos que acompañan á las llamas no han principiado á ser estudiados científicamente sino á contar del experimento á que se da el nombre de *armónica química* y del cual hicimos

mencion en las páginas precedentes. Con este aparato se obtiene un sonido musical, mediante el desprendimiento de un chorro de hidrógeno inflamado que se le recubre con un tubo de cierta longitud. Según Tyndall, al doctor Higgins se debe la primera observación de este curioso fenómeno en 1777. Posteriormente Chladni, de la Rive, Faraday, Wheatstone, Rijke, Sondhaus, Kundt y en fin Schaffgotsch y Tyndall han hecho investigaciones sobre este punto de las cuales vamos á hacer un sumario resumen.

Veamos desde luego el experimento fundamental, que ya sabemos que consiste en introducir una llama en el interior de un tubo de modo que se puedan ver los movimientos que experimenta el chorro gaseoso. En seguida que la llama, hasta entonces tranquila é inmóvil, penetra en el interior del tubo, se la ve disminuir de longitud, recobrar después su posición primera, alargarse de nuevo, haciéndose estos movimientos de oscilación cada vez más rápidos. De repente se oye un sonido continuo de intensidad sostenida y de carácter claramente musical (1). Entonces parece que la llama vuelve á ser lo que era, tan tranquila como antes de haberla introducido en el tubo. Se diría que después de haber dado, por sus vibraciones propias, origen á las vi-

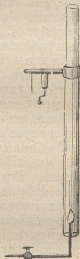


Fig. 12.—Llama cantante.

(1) Con el aparato de Rijke se obtiene en un tubo de vidrio un sonido cuyo origen tiene cierta analogía con el sonido de una llama cantante. Este sonido se produce cuando se ha llevado al rojo una especie de tela metálica fina, fija en el tubo en el tercio de su altura, habiendo ya retirado la lámpara de alcohol que sirvió para elevar la temperatura. Enfriada la llama, el sonido se estingue.

braciones de la columna de aire, ha dejado por sí misma su movimiento. Pero nada de esto sucede; en realidad ella vibra siempre, sólo que, la rapidez de sus oscilaciones es tal, que el ojo no percibe más que una sensación continua, y esto es fácil de probar. El medio más sencillo es mirar la llama ora á la simple vista, ó con una lente, dando á la cabeza un movimiento de vaivén horizontal.

Puédese también examinar la imagen de la llama por medio de un espejo giratorio (según el método Wheatstone). En ambos casos, si la llama estaba inmóvil, conservará una longitud constante y el ojo experimentará la sensación de una faja luminosa continua de la misma altura que la llama; lo mismo que aparece en una atmósfera tranquila. No sucede lo mismo cuando el sonido resuena en el tubo: en este caso se vé una serie de llamas separadas por intervalos oscuros y luego en estos mismos intervalos llamas más pequeñas y más pálidas. «Cada imagen, dice Tyndall, se compone de una punta amarilla que descansa sobre una base de riquísimo azul.» Por consecuencia, es evidente que las vibraciones del gas se manifiestan por una serie de extinciones y avivamientos de la llama, ó al menos, si la extinción no es completa, como lo prueban los fulgores más pequeños de los intervalos oscuros, por cambios periódicos de altura y de brillo. Algunas veces no es posible ver traza luminosa alguna entre dos imágenes consecutivas.

Si se introduce la llama desmesuradamente en el tubo, las agitaciones de aquella adquieren una amplitud mayor y entonces el aire, rechazando la llama al interior del tubo, puede apagarla. Sucede en ocasiones que con la extinción de la llama se produce una violenta explosión análoga á un pistoletazo (1). La esplicacion de

(1) Con un tubo de 4m,50 de longitud y 1 decímetro de diámetro, y un gran mechero de gas de Bunsen con la boca en forma de regadera, Tyndall obtuvo un sonido de tal intensidad que conmovió el entarimado y los muebles

este último fenómeno es bien fácil de comprender. «Supongamos en efecto, dice Maurat, que en la primera parte de una vibración el aire entre dentro del mechero rechazando la llama delante de sí, pero sin enfriarla lo suficiente para apagarla; durante la segunda mitad de la misma vibración no saldrá el gas puro, sino una mezcla de gas y de aire y su inflamación deberá causar una verdadera detonación (1).

Por los experimentos que se acaban de describir se advierte que las llamas pueden representar el mismo papel que las corrientes aéreas ó líquidas con las que se ponen en vibración los tubos sonoros; por sí mismas, las llamas suplen á las embocaduras de flautas ó lengüetas, sin las cuales no se producirían las vibraciones. No se ha obrado, pues, fuera de razón al denominarlas *llamas sonoras* ó *cantantes*; bien es verdad que aisladas, no producirían una vibración suficientemente intensa para ser percibida por el oído: es preciso un tubo que las envuelva para reforzar el sonido y hacerle sensible.

La altura de un sonido emitido por un tubo sonoro depende, como vimos, de la longitud del tubo. Pues lo mismo sucede con las llamas sonoras. Si después de haber conseguido el unísono de la nota musical que se

de la sala de experimentos, y añade el célebre profesor, «hasta mis oyentes se conmovieron sobre sus asientos.»

(1) «Notemos á este propósito, dice el mismo sábio, que la mezcla de aire y de gas se forma siempre mas ó menos completa en una llama cualquiera, aun cuando arda al aire libre. No se verifica solamente en la superficie, sino en una region muy estensa, puesto que comprende toda la parte alumbrada. Si no se produce explosión, consiste en que se restablece el equilibrio entre la llegada del gas y el aflujo de aire exterior, de suerte que los mismos puntos del espacio son asiento de un fenómeno de combustión que no varía sensiblemente de un instante á otro. No acontece lo mismo cuando la corriente gaseosa vibra fuertemente. Las velocidades alternativamente en sentidos contrarios de que entonces están animados el gas y el aire circundante, favorecen mucho su mezcla. La combustión se hace por lo tanto intermitente ó instantánea, es decir, por una série de pequeñas explosiones. La última de ellas, la que produce la extinción de la llama, debe ser por esta razón de una intensidad excepcional, puesto que va seguida inmediatamente de una disminución considerable del volumen de la vena gaseosa, consecuencia del enfriamiento que ha sufrido.»

obtiene con un tubo de una longitud dada, 1 metro, por ejemplo, se hace resonar la misma llama en un tubo de 2 metros, el sonido es precisamente la octava grave del precedente. Con tubos mas cortos se obtendrian sonidos mas agudos. Tyndall, en sus notables experimentos sobre las llamas sonoras, habia dispuesto una série de ocho tubos cuyas longitudes estaban calculadas de manera que diesen, al resonar, los sonidos de una gama de la octava grave ó la octava aguda. Por medio de un tubo móvil ó sea un tubo de papel que recubria uno de estos tubos, influia á voluntad sobre la altura del sonido, que llegaba á ser más grave cuando el tubo de papel subia, es decir, cuando alargaba el tubo, y más agudo conforme bajaba.

Peró si se comparan los sonidos de las llamas cantantes con los que dan los tubos de órgano de la misma longitud, se vé que estos son más graves. La razon es muy sencilla: la presencia de las llamas eleva la temperatura de las columnas de aire puestas en vibración, y sabido es que el número de vibraciones crece con la velocidad del sonido y por consecuencia con la temperatura en una misma longitud de la onda.

Aparte de esto, la altura del sonido depende tambien de las disminuciones de la llama. «Al disminuir la cantidad de gas, dice Tyndall, hago cesar el sonido que la llama produce actualmente. Pero despues de un momento de silencio, la llama da un nuevo sonido que es precisamente la octava del primero. Este era el sonido fundamental del tubo que rodea la llama; el segundo, el primer armónico de este mismo tubo.» Hé aquí, segun el mismo fisico, otra manera de patentizar la influencia de las dimensiones de las llamas sobre la altura de los sonidos que ellas producen. Se hace que dos llamas dén el mismo sonido y despues, girando un poco la llave del gas, se modifica levemente la dimension de una de las mismas. Al punto de ocurrir esto, el unísono es alterado y se oyen palpitations. O mejor

todavía, se toma un tubo de vidrio de 2 metros de longitud que se hace resonar mediante una gran llama de hidrógeno. Se le sustituye un tubo la mitad menor en longitud y ya no se oye sonido musical. «La llama es demasiado grande, dice Tyndall, para poderse acomodar á los periodos de vibracion del tubo mas corto. Pero disminuida la altura de aquellas da un sonido intenso, la octava del sonido del primer tubo. Quitemos el tubo corto y recubramos de nuevo la llama con el tubo largo. Este tampoco da entonces el sonido fundamental que le es propio: sino que da el del tubo más corto. Para acomodarse á los periodos vibratorios de la llama acortada, la larga columna de aire se divide como en un tubo de órgano abierto que da su primer armónico. Puedense variar las dimensiones de la llama de modo que se obtenga con el mismo tubo una série de notas cuyas velocidades de vibracion estén en la relacion de los números 1: 2: 3: 4: 5, es decir, del tono fundamental y de sus cuatro primeros armónicos.»

§ 3.—Llamas sensibles.

Hemos visto que la forma de una vena líquida que mana se modifica desde el momento en que las vibraciones de que ella es causa son susceptibles de dar origen á un sonido. Ademas, la misma modificacion se observa si en las inmediaciones de la vena se produce un sonido cuya altura sea casi igual á la del sonido que daría sola. La primera observacion de este último fenómeno la debemos á Schaffgotsch. Habiendo introducido una llama de gas en un tubo de poca altura, este observador advirtió que si se emitía un sonido, ya al unísono, ya á la octava superior de la nota dada por su llama sonora, ésta se agitaba y vibraba; ó asimismo se extinguía, cuando los sonidos emitidos

se reducian á cierto grado de intensidad. ¿Cuál es la causa de esta agitación singular?

Otro hecho, simultáneamente descubierto por Schffagotsch y Tyndall, es el que sigue. Dada una llama silenciosa en el seno del tubo, si se eleva convenientemente el sonido de la voz, la llama empieza á cantar. Su canto se interrumpe si la nota sensible se interrumpe; vuelve á cantar al unísono si la voz recobra su canto. Hé aquí, segun Tyndall, las condiciones del experimento: «Recubro, dice, la llama con un tubo de 50 centímetros de longitud de manera que esté á 5 ó 4 centímetros de distancia de la estremidad inferior. La emision de la nota conveniente hace temblar la llama, pero no la hace cantar. Bajo el tubo de suerte que la distancia de la llama á la estremidad inferior sea de 7 centímetros y al momento su canto se convierte en explosion. Entre ambas posiciones hay una tercera en la cual, la llama que en ella se coloque no rompe el silencio espontáneamente, sino que, cuando ha sido escitada y como seducida por la voz, canta y continúa indefinidamente cantando.»

Esa sensibilidad de las llamas, que ademas del nombre de *llamas sonoras* y *cantantes* ha hecho que se les de tambien el de *llamas sensibles*; esa facultad de ejecutar movimientos vibratorios de cierta periodicidad y de resonar al unísono de las voces que se pronuncien en sus inmediaciones, permite, por decirlo así, el servirse de ellas para el análisis de los sonidos compuestos.

Las llamas desnudas, es decir, que arden en el aire libre sin estar cubiertas de un tubo, sufren la misma influencia y manifiestan igual sensibilidad. La primera observacion de este hecho nuevo se debe al profesor Lecomte. Tyndall y Barret han efectuado acerca de este curioso punto multitud de experimentos variados. Limitémonos á citar algunos de ellos.

Hagamos observar en primer término que todas las

llamas desnudas no son llamas sensibles. Lecomte habia ya advertido que la llama de los mecheros de gas sobre la cual versaron sus observaciones, no comenzaba á vibrar sino cuando la presión aumentaba convenientemente. «Hé aquí, dice Tyndall, una bujía encendida: nosotros podremos, sin comoverla, gritar, dar palmadas, tocar este pito, dar martillazos sobre este yunque ó hacer estallar una mezcla de hidrógeno y oxígeno. Aunque en cada uno de estos casos pasan por el aire ondas sonoras muy energicas, la bujía es absolutamente insensible al sonido; en su llama no se produce ningun movimiento. Pero con este pequeño soplete dirijo contra la llama de la bujía una fina corriente de aire, que produce un principio de estremecimiento al mismo tiempo que disminuye el brillo de la llama. Soplando ahora el pito, la llama salta visiblemente.»

La llama en forma de cola de pescado de un mechero de gas ordinario es insensible á todos los sonidos emitidos cerca de ella; basta, sin embargo, dar una vuelta á la llave y aumentar la presión, para que se agite al momento por la influencia de un silbido; su llama en forma de abanico se trasforma en otra de seis ó siete lenguas separadas.

Las llamas más sensibles deben tener bastante altura, de 25 á 50 y hasta 45 centímetros; pero aparte de esto, según las circunstancias, las vibraciones sonoras las alargan unas veces y otras las acortan. Tyndall toma

dos llamas, la una larga, derecha y humosa, otra corta, bifurcada y brillante, y bajo la influencia de

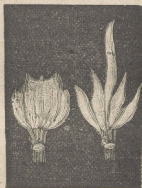


Fig. 13. —Influencia de los sonidos sobre las llamas.

un mismo silbido se opera en ambas una transformación singular: la primera llama es, por decirlo así, transformada en la segunda y reciprocamente.

Terminemos esta cuestión mencionando dos interesantes experimentos que el célebre físico inglés ha reproducido en sus notables conferencias sobre el sonido.

«A la vista teneis la llama más maravillosa de las observadas hasta aquí. Sale del orificio único de un mechero de esteatita y se eleva á la altura de 60 centímetros. El golpe mas insignificante dado sobre un yunque que esté á gran distancia, la reduce á 17 centímetros. Los choques de un manojo de llaves la agitan violentamente y vosotros ois sus enérgicos ronquidos. Hagamos caer, á la distancia de 20 metros, una moneda de 50 céntimos sobre unos ochavos sostenidos en la mano, y este choque tan leve la humilla. No puedo andar sin agitarla; el ruido de mis botas la pone en violenta conmoción. El causado al arrugar ó rasgar un papel y el rozamiento de una tela de seda producen el mismo efecto. Una gota de agua que cae la sobresalta. Cerca de ella se ha colocado un reloj de bolsillo y ninguno de vosotros oye el tic-tac; ved, sin embargo, qué efecto ejerce sobre la llama: cada pulsación la achica; si el movimiento aumenta ocasiona en la llama un espantoso tumulto. El canto de un gorrión que esté á buena distancia basta para bajarla; la nota del grillo produciría sin duda el mismo efecto. Colocado á 50 metros de distancia he hablado muy bajo y la llama se ha acertado al momento dando como especies de ronquidos.»

Por lo visto nos podemos hacer cargo de la sensibilidad de las llamas que arden al aire libre. Veamos ahora qué separación permiten hacer de las notas predominantes en los sonidos compuestos, jugando así el papel de las llamas manométricas de Kœnig y de los resonadores de Helmholtz (de que hablaremos despues).

A una llama larga, recta, brillante, que el ruido

mas leve la reduce al tercio de su altura y cuyo brillo palidece hasta el punto de ser apenas perceptible, Tyn-dall la denomina *llama de las vocales*. En efecto, las diferentes vocales afectan de diverso modo su sensibilidad. La llama no es sensible al sonido fundamental de cada vocal, sino al armónico predominante que constituye su timbre. «Artículo con voz fuerte y sonora el diptongo *ou*, y la llama no se mueve; pronuncio la vocal *o*, la llama tiembla; articulo *é*, y la llama se afecta fuertemente. Pronuncio sucesivamente las palabras *boot* (pronúnciese *but*), *boat* (pronúnciese *bot*), *beat* (pronúnciese *bit*); la primera queda sin respuesta; la llama se agita á la segunda, pero la tercera produce en ella una conmocion violenta. El sonido *ah!* es todavía mucho más poderoso... Esta llama es particularmente sensible á la articulacion de la consonante silbante *s*. Que la persona de este auditorio que esté mas distante me haga el favor de silbar ó pronunciar *Hiss* ó repetir el verso: *Para quién son esas serpientes que silban sobre vuestras cabezas*, y la llama le hará al momento una acogida simpática. El silbido comprende los elementos más aptos para obrar enérgicamente sobre ella. Pongo, en fin, sobre esta mesa una caja de música y le hago sonar una pieza. La llama se conduce como un sér sensible, haciendo un ligero saludo á ciertos sonidos y acogiendo á otros con profunda cortesía.» (*El Sonido*, VI).

CAPITULO VII.

Leyes de las vibraciones sonoras en los tubos, cuerdas y placas.

§ 1.—Vibraciones de las cuerdas elásticas.

La música es hoy un arte tan vulgarizado, que la mayor parte de nuestros lectores conocen sin duda el mecanismo de los instrumentos de cuerda del violín, por ejemplo.

Cuatro cuerdas de desigual grueso y de diferentes naturalezas se tienden por medio de clavijas entre dos puntos fijos, y producen cuando se las pulsa ó se las frota transversalmente con el arco, sonidos de diversa altura. Los sonidos producidos por las cuerdas *al aire* (es decir, vibrando en toda su longitud), deben guardar entre sí ciertas relaciones de altura, de las cuales hablaremos pronto. Destruída esa relacion, el instrumento no está templado. ¿Qué hace entónces el músico? Estira mas ó menos, apretando ó aflojando las clavijas, aquellas cuerdas que no dan los sonidos deseados: si las estira más el sonido llega á ser mas agudo; más grave, por el contrario, si las afloja. Pero cuatro cuerdas serian insuficientes para dar las notas variadas de una composicion musical. El que toca el instrumento multiplica á voluntad el número de ellas colocando los dedos de la mano izquierda sobre tal ó cual punto de

cada una de las cuerdas. Procediendo así, reduce á longitudes variadas las partes de dichas cuerdas que el arco pone en vibracion.

Estos hechos que todo el mundo conoce manifiestan que existen ciertas relaciones entre las alturas de los diferentes sonidos producidos por el instrumento, y las longitudes, gruesos, ténsones y naturaleza de las cuerdas; como estas alturas dependen tambien del número de vibraciones ejecutadas, resulta necesariamente que este número está ligado por ciertas leyes á los elementos mas arriba enumerados. Las mas importantes de dichas leyes habian sido entrevistas por los antiguos filósofos y especialmente por los pitagóricos. Pero á los géometras del siglo pasado, entre los cuales citaremos los nombres ilustres de Tylor, Bernouilli, d'Alembert, Euler y Laplace, es á quienes se debe la demostracion completa de ellas deducidas de la teoría. La esperiencia ha confirmado la exactitud del cálculo.

Tales son las leyes que queremos hacer comprender. Hoy se las demuestra fácilmente por medio de un instrumento especial, el *sonómetro*, al cual se une uno cualquiera de los aparatos que sirven para contar el número de vibraciones de los sonidos. El sonómetro

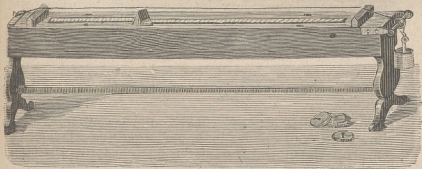


Fig. 14.—Sonómetro.

ó monocordio (fig. 44), consta de una caja de madera destinada á reforzar los sonidos; sobre esta caja están fijas una ó varias cuerdas con tornillos de hierro y ténas merced á pesas que sirven para medir las tensiones de cada una de ellas. Una escala graduada fija por debajo de las cuerdas sirve para apreciar las longitudes de las partes vibrantes, longitudes que se las hace variar á voluntad mediante un caballete móvil que corre á lo largo de la escala y por debajo de las cuerdas.

Consideremos una cuerda cualquiera de tripa ó de metal. Tendámosla con ayuda de un peso suficiente para que produzca un sonido perfectamente puro y cuya altura sea apreciable al oído. Supongamos que su longitud total medida con la escala sea $1^m,20$ y que el sonido que dé corresponda, comprobacion hecha por la sirena, á 440 vibraciones por segundo. Coloquemos el caballete móvil sucesivamente en la mitad, en $\frac{1}{3}$, en $\frac{1}{4}$, en $\frac{1}{12}$ de la longitud total, y en cada una de estas posiciones sucesivas hagamos vibrar la porcion más corta de la cuerda. Evaluando los diversos sonidos obtenidos, encontraremos por segundo los números siguientes de vibraciones: 880, 1,320, 1,760 y 3,200.

Basta observar los números que miden las diferentes longitudes de la cuerda y los que indican los números de vibraciones, para descubrir la ley:

Longitud de la cuerda.	}	120	60	40	30	10
		ó 1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{12}$
Número de vibraciones.	}	440	880	1320	1760	3280
		ó 1	2	3	4	12

¿No evidencia este experimento que los números de vibraciones van creciendo de modo que sus relaciones son precisamente inversas de las que existen entre las longitudes de las cuerdas?

Tal es la primera ley de las cuerdas vibrantes.

Si se estira la misma cuerda, sin variar la longitud, con pesos diferentes y se comparan los sonidos obtenidos, se hallará que para números de vibraciones dobles, triples, cuádruples, etc., las tensiones de las cuerdas son 4, 9, 16, etc., veces más considerables. El número de vibraciones sigue el orden de los números naturales; los pesos ó tensiones siguen el orden de los cuadrados de estos números.

Las cuerdas son de forma cilíndrica. Hagamos variar el diámetro de estos cilindros y comparemos los sonidos producidos por dos cuerdas de la misma naturaleza, tensas por dos pesos iguales y de igual longitud, pero de diámetros diferentes. Se halla entonces que los números de vibraciones de estos sonidos decrecen cuando los diámetros de las cuerdas aumentan, y se hacen precisamente 2, 3, 4... veces menores cuando los diámetros son 2, 3, 4... veces mayores. Esta es la tercera ley de las vibraciones trasversales de las cuerdas vibrantes.

La cuarta ley, que se puede demostrar como las anteriores por medio del sonómetro, se refiere á la densidad de la sustancia que constituye la cuerda vibrante. Así, dos cuerdas, una de hierro y otra de platino, de la misma longitud y de igual diámetro, estiradas en el aparato con pesos iguales, darán sonidos tanto mas graves cuanto mayor sea la densidad; de suerte que la cuerda de hierro dará el sonido más agudo y la de platino el ménos elevado. Basta el oído para hacerse cargo de estas diferencias.

Ahora bien, si se calcula el número exacto de vibraciones que corresponde á los dos sonidos obtenidos, resultará:

Para el hierro.	1,640
Para el platino.	1,000

Entiéndase bien que aquí no se trata de los números mismos, sino de sus relaciones. Pues bien, si se multi-

plica cada uno de estos números por sí mismo, ó lo que es igual, si se elevan al cuadrado, resultan los números 2.698,600 y 4.000,000, que espresan cabalmente en orden inverso, las densidades de los metales platino y hierro. La densidad del hierro es 7,8, la del platino 21,04, y ambas densidades son entre sí como 1,00 es á 2,69. Tal es la ley: en igualdad de circunstancias los cuadrados de los números de vibraciones están en razon inversa de las densidades de las materias que constituyen las cuerdas.

En todo lo que antecede tan solo se trata de las vibraciones trasversales de las cuerdas, es decir, de los sonidos que resultan, bien de la pulsacion, ó del frotamiento por medio de un arco. Una cuerda frotada á lo largo, por ejemplo, con un pedazo de tela empolvoreada con colofonia, da tambien un sonido, pero éste es mucho mas agudo, de suerte que el número de vibraciones longitudinales supera siempre al de vibraciones trasversales. Como para conmovier las cuerdas no se emplea este procedimiento, no nos estenderemos más sobre este punto. Pero no pasaremos adelante sin hacer mencion de un fenómeno de gran interés; nos referimos á la formacion de los *nodos* y *vientres* sonoros y á algunos sonidos especiales que los músicos y físicos llaman *sonidos armónicos*.

Considerémos una cuerda ténsa sobre el sonómetro ó en cualquier instrumento de música. Fijemos con el dedo su punto medio y con un arco agitemos una de las mitades; el sonido producido será, como debia esperarse, más agudo que el sonido fundamental, habiendo doblado el número de vibraciones. Musicalmente hablando, este sonido es la *octava* del sonido fundamental. Pero, cosa notable, las dos mitades de la cuerda vibran á la par y de ello podemos convencernos de dos modos: poniendo en el lado de la cuerda que quedó libre pedacitos de papel, los cuales saltan y caen desde el momento en que se produce el sonido; y en segundo

lugar, observando con la vista la existencia de una hinchazón en las dos mitades de la cuerda. Retirando el

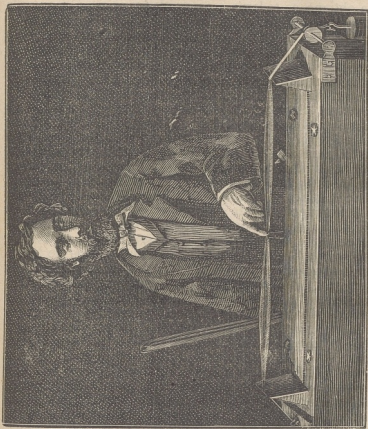


Fig. 15.—Sonidos armónicos, producción de 1. octava.

dedo sin abandonar el movimiento del arco, se observa que el sonido persiste, como asimismo la división de la cuerda en dos partes que vibran simultáneamente.

Hagamos un segundo experimento y coloquemos ahora el dedo en el tercio de la cuerda, aplicando el arco, como ya se sabe, á la parte mas corta. El sonido que se obtiene es todavía mas agudo; y se ve á la cuerda total subdividirse en tres partes iguales vibrando separadamente, lo cual puede comprobarse como en el caso anterior con los caballitos de papel situados en los puntos de division y en cada tercio de la cuerda. Los primeros quedan inmóviles y los segundos son despedidos, lo cual indica la existencia de puntos inmóviles ó *nodos*, y de partes vibrantes, cuya porcion media es lo que se llama un *vientre*. Los nodos y los vientres sonoros se distinguen bien sobre un fondo negro. Los primeros muestran la cuerda blanca reducida á su espesor peculiar; los otros dejan ver hinchazones semejantes á las que hemos señalado en medio de una cuerda que vibra en su totalidad.

Una cuerda puede de este modo dividirse en 2, 3, 4, 5... partes iguales, y los sonidos que entonces produce, cada vez más agudos, son *sonidos armónicos*. Los oídos ejercitados llegan á distinguir algunos de los sonidos armónicos que se producen simultáneamente con el sonido fundamental de una cuerda pulsada al aire; lo cual revela que se verifica la division de la cuerda en partes iguales, aun cuando la fijacion de un punto no sea su causa determinante. Más tarde veremos qué grado ocupan estos diferentes sonidos en la escala musical.

Estudiadas por medio del método gráfico las vibraciones sonoras que engendran los sonidos armónicos, se demuestra concluyentemente que son sonidos compuestos cuyas vibraciones sencillas se sobreponen. Los nodos y los vientres sonoros no son peculiares á las cuerdas vibrantes, pues existen en las columnas de aire que vibran en el interior de los tubos, y tambien en las placas y membranas.

§ 2.—Leyes de las vibraciones en los tubos sonoros.

Los instrumentos de música llamados *instrumentos de viento*, están formados de tubos sólidos, unas veces prismáticos, otras cilíndricos; unos de forma rectilínea, otros mas ó menos acodillados. La columna de aire que estos tubos contienen se pone en vibración por una embocadura, cuya forma y disposición varían conforme sean los instrumentos. Tendremos ocasión de describir los principales géneros de estos cuando tratemos de las aplicaciones de la física á las artes. Mas para conocer las leyes generales que rigen las vibraciones de las columnas gaseosas contenidas en los tubos, nos ceñiremos aquí á considerar los tubos rectos en forma de prismas ó cilindros tales como existen en los órganos.

Las figuras 46 y 47 representan la vista exterior y el corte ó vista interior de dos tubos de esta clase. En la parte inferior de cada uno se vé el conducto por donde penetra el aire suministrado por un fuelle acústico. La corriente entra primero por una caja y después se escapa por una hendidura que se denomina la *luz* y llega á tropezar contra la arista de una placa labrada á bisel. Una parte de la corriente se escapa por la boca al exterior del tubo; otra parte penetra en el interior. Ésta división de la corriente da origen á una serie de condensaciones y dilataciones que se propagan á la columna gaseosa. El aire de esta columna entra en vibración y produce un sonido continuo, cuya altura, como se va á ver, varía con arreglo á ciertas leyes. La embocadura que se acaba de describir es la llamada *embocadura de flauta*. La experiencia prueba que si ponemos á los mismos tubos embocaduras diferentes, solo se modifica el timbre del sonido, pero su altura queda inalterable. Dicha altura tampoco depende de

la sustancia, madera, marfil, metal, cristal, etc., de que se componga el tubo, de lo cual se deduce eviden-

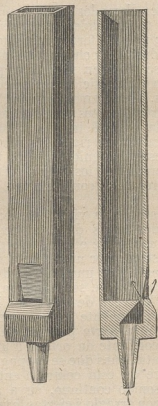


Fig. 16.—Tubos sonoros prismáticos de embocadura de flauta.

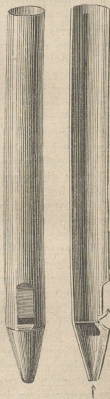


Fig. 17.—Tubos sonoros cilíndricos de embocadura de flauta.

temente que el sonido resulta de las vibraciones de la columna de aire.

El descubrimiento de las leyes que rigen las vibraciones de los tubos sonoros lo debemos al padre Mersenne y á Daniel Bernouille. Vamos á indicar sucintamente la más sencilla de estas leyes.

El primero de dichos físicos demostró que si se comparan los sonidos engendrados por dos tubos semejantes de diferentes tamaños, es decir, uno de los cuales tenga todas sus dimensiones dobles, triples, etc., de las del otro, en todos sentidos, los números de vibraciones del primero serán 2, 3 veces menores que las vibraciones del segundo. Así, el más pequeño de los tubos dará dos veces tantas vibraciones como el otro, y el sonido que produzca será la octava del sonido del tubo mayor. El descubrimiento de esta ley se debe al padre Mersenne.

Los tubos sonoros son unas veces abiertos, otras cerrados por su parte superior. Pero la ley que vamos á enunciar se aplica lo mismo á los tubos cerrados que á los tubos abiertos, con tal que su longitud sea grande en comparacion con sus demas dimensiones. Conviene observar que cada tubo puede dar varios sonidos, tanto más agudos ó elevados cuanto mayor sea la velocidad de la corriente de aire. El más grave de estos sonidos recibe el nombre de *sonido fundamental*; los otros son los sonidos armónicos de aquel y se observa que para obtenerlos basta reforzar progresivamente la corriente de aire. En fin, cuando se hacen resonar tubos de longitudes diferentes, se reconoce que los más largos dan los sonidos fundamentales más graves, de tal suerte, que el número de vibraciones está precisamente en razon inversa de las longitudes.

Pero en igualdad de longitudes, el sonido fundamental de un tubo cerrado es diferente del sonido fundamental dado por un tubo abierto. Las vibraciones son dos veces ménos numerosas, lo cual quiere decir que el sonido fundamental de un tubo cerrado es

el mismo que el de un tubo abierto de longitud doble.

Réstanos decir cuál es la sucesion de los sonidos armónicos en unos y otros tubos.

Ordenando estos sonidos en el orden del mas grave al mas agudo á partir del sonido fundamental, se encuentra que en los tubos abiertos, el número de vibraciones crece conforme á la série de los números enteros 1, 2, 3, 4, 5, 6, etc. En los tubos cerrados, estos números crecen segun la série de los números impares 1, 3, 5, 7, etc. De aquí resulta que si se toman tres tubos, uno abierto de longitud doble de los otros dos, y que de estos, el uno sea abierto y el otro cerrado, los sonidos sucesivos del primero estarán representados por la serie de los números naturales:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8,

y los sonidos de los otros dos por las series:

Tubo abierto ...	2	...	4	...	6	...	8	...
Tubo cerrado 1	...	3	...	5	...	7	...	

es decir, que los sonidos del tubo grande serán reproducidos alternativamente por los dos tubos de la mitad de largo.

Terminemos el estudio de los fenómenos que presentan los tubos sonoros diciendo que las columnas gaseosas que vibran dentro de estos instrumentos, se dividen como las cuerdas vibrantes en partes inmóviles ó nodos y en partes vibrantes ó vientres. De varios modos se hace manifiesta la existencia de esas partes. El mas sencillo consiste en colocar en el interior del tubo una membrana tensa suspendida con un hilo y examinar cómo se conducen los granos de arena de que pré-

viamente estaba espolvoreada. Dichos granos saltan por el impulso de las vibraciones cuando la membrana está á la altura de un vientre: pero quedan por el contrario inmóviles cuando la posición de la membrana coincide con la de un nodo.

Por lo demás, la teoría ha resuelto completamente todos los problemas relativos á este órden de fenómenos y los experimentos de los físicos, siempre algo ménos precisos de lo que exigiria el análisis matemático, á causa de las circunstancias complejas en que aquellos los efectúan, no son más que comprobaciones de las leyes halladas por el análisis. Por nuestra parte, que sólo tenemos la tarea de describir principalmente los hechos curiosos de cada parte de la física, debemos limitarnos á las nociones indispensables para la inteligencia de estos hechos y las aplicaciones que de ellos se han hecho á la industria y las artes.

§ 3.—Vibraciones sonoras de las varillas y de las placas.

Las *varillas sonoras* son tallos cilíndricos de madera, metal, vidrio ú otras sustancias elásticas, á las cuales se las puede hacer vibrar frotándolas longitudinalmente con un pedazo de paño espolvoreado con colofonia ó con tela mojada. Entonces dan sonidos puros y continuos, cuya altura, en una misma sustancia, depende de la longitud del tallo. Por medio de un tornillo ó con los dedos se sujeta la varilla, cuyos sonidos se quieran estudiar, bien por una de sus estremidades, bien por su punto medio ó por cualquier otro. La varilla, pues, queda libre por sus dos puntas ó libre solamente por una de ellas. Si se compara el sonido que da una varilla fija por una de sus estremidades con el que da la misma varilla ú otra de la misma longitud y de la misma sustancia fija por su

punto medio, se vé que el primero es mas grave que el segundo: las vibraciones son en este dobles.

Si se hacen vibrar varillas de longitudes diferentes fijas de la misma manera, la esperiencia demuestra que los sonidos son tanto más agudos cuanto más cortas son aquellas. Los números de vibraciones de estos sonidos varían en proporcion inversa de las longitudes. Las vibraciones de las varillas están, por consiguiente, sujetas á las mismas leyes que las de los tubos sonoros; y se vé que si las varillas libres por ambos extremos se comparan con los tubos abiertos, las varillas fijas por un extremo corresponden á los tubos cerrados. Lo mismo que un tubo, una misma varilla produce, ademas del sonido grave fundamental, sonidos armónicos, cuyas séries ascendentes siguen tambien las mismas leyes que en los tubos abiertos y cerrados.

Los fenómenos que resultan de las vibraciones sonoras en cuerpos de formas variadas, son inagotables, pero vamos á circunscribirnos á señalar solamente aquellos que se producen en las placas y en las membranas.

Si de las hojas delgadas de madera ó de metal bien homogéneas se recortan placas cuadradas, circulares ó poligonales y despues se las fija sólidamente á un pie por su centro de figura, se consigue que estas placas produzcan sonidos estremadamente variados, frotando sus bordes con un arco de violin y apoyando uno ó dos dedos sobre tales ó cuales puntos de su contorno (figura 48). Chladni y Savart, cuyos nombres se encuentran en todas las investigaciones modernas relativas al sonido, han multiplicado los esperimentos sobre las placas de formas, espesores y superficies diferentes. El fenómeno que más ha llamado la atención, es la distribución de las superficies de las placas en partes vibrantes y en partes inmóviles. No siendo estas últimas otra cosa que una serie continua de nodos, han recibido por esta razon el nombre de *líneas nodales*.

Para reconocer y estudiar las posiciones y formas

de estas líneas, dichos sabios espolvorearon la superficie con arena fina y seca. Tan luego como la placa entró en vibración, las partículas de la arena se pusieron en movimiento, huyendo de todas las partes vibrantes

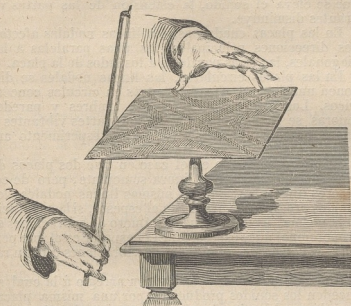


Fig. 18. — Vibración de una placa.

y fueron á refugiarse á lo largo de las líneas nodales, dibujando de este modo todos sus contornos.

Estas líneas son tan numerosas y en ocasiones tan complicadas, varían de tal modo en una misma placa con los sonidos diversos que esta placa puede producir, que Savart tuvo que emplear un procedimiento particular

para coleccionarlas. En vez de arena, empleó polvo engomado con girasol, y por medio de un papel húmedo aplicado sobre la placa, obtuvo la impresion de cada figura. Conviene advertir que las figuras en que están mas multiplicadas esas líneas corresponden á los sonidos mas agudos, lo cual quiere decir, que á medida que se eleva el sonido, la estension de las partes vibrantes disminuye.

En las placas cuadradas, las líneas nodales afectan dos direcciones principales, las unas paralelas á las diagonales, las otras paralelas á los lados de la placa.

En las placas circulares, las líneas nodales se disponen unas veces en radios, otras en círculos concéntricos. Las campanas de cristal, timbres y paredes sonoras se dividen igualmente en partes vibrantes y líneas nodales, como se vió en un experimento anterior.

Se ha probado que en el caso en que dos placas de la misma sustancia y de figura semejante, pero de espesores diferentes, dén las mismas líneas nodales, los sonidos producidos varían con el espesor, si la superficie es la misma, es decir, que el número de vibraciones es proporcional á los espesores. Si el espesor es el que permanece constante, el número de vibraciones está en razon inversa de las superficies.

No se conoce todavia la ley con arreglo á la cual se suceden los sonidos producidos por una misma placa, cuando cambian las figuras formadas por las líneas nodales. Sólo se sabe que el sonido mas grave, engendrado por una placa cuadrada y fija en un centro, se obtiene cuando las líneas nodales son dos paralelas á los lados y pasan por el centro. Cuando estas dos líneas nodales forman las dos diagonales del cuadrado, el sonido es la quinta del primer sonido, del que se puede llamar el sonido fundamental.

CAPITULO VIII.

Acústica musical.

§ 1.—De los sonidos empleados en música; escala musical.

La percepción de los sonidos tiene para el oído humano límites, cuya determinación se ha buscado por medio de la experiencia. Treinta y dos vibraciones por segundo es el de los sonidos graves; el de los sonidos agudos llega hasta 75,000 vibraciones. Es evidente que entre estos límites, la escala de los sonidos es continua, de modo que hay una infinidad de sonidos que tienen una altura diferente, apreciable al oído, y que pasan del grave al agudo ó, del agudo al grave, por grados insensibles.

Todos los sonidos comprendidos en esta escala, y susceptibles por consiguiente de ser comparados entre sí con respecto á la altura, son los llamados sonidos musicales; combinándolos por vía de sucesión ó de simultaneidad, según reglas determinadas de tiempo, de altura, de intensidad y de timbre, es como el músico llega á producir los efectos que constituyen una obra musical.

En toda obra musical se pueden considerar los sonidos ya en su sucesión, ya en su combinación ó simultaneidad. El movimiento de los sonidos sucesivos, con sus variaciones de altura, de duración, con la acentuación ó el ritmo, es lo que forma la *melodía*. La combinación

de los sonidos, su combinacion simultánea que dá origen á una sucesion de consonancias y disonancias ó acordes, regulada por ciertas leyes, constituye la *armonía*.

Un canto, ejecutado por un solo instrumento ó una sola voz, es necesariamente una simple melodia; lo mismo sucede cuando varias voces ó instrumentos ejecutan simultáneamente el canto en cuestion, si en toda la estension del trozo todos los ejecutantes permanecen al *unísono*. La mezcla de instrumentos y voces no cambia, en este caso, el carácter melódico del trozo musical; lo más que puede hacer es aumentar su fuerza y variar los timbres. Esta simultaneidad no es armonía.

En su origen, la música no conocia otras combinaciones: era *homófona*, segun la espresion empleada por Helmholtz. «En todos los pueblos, dice, la música ha sido originariamente formada de una sola parte. En este estado la encontramos tambien entre los chinos, los indios, los árabes, los turcos y los griegos modernos, aunque estos pueblos estén en posicion de un sistema musical muy perfeccionado en ciertos puntos. La música de la antigua civilizacion griega, salvo quizá algunos adornos, cadencias ó intermedios ejecutados por los instrumentos, era absolutamente homófona, pues á lo sumo las voces se acompañaban á la octava.»

En la Edad media en que la música era la asociacion de partes distintas, en un principio sencilla, se hizo despues progresivamente mas complicada, y dió origen á la música armónica. En un trozo musical, la melodia era entonces la parte principal y las partes secundarias formaban el acompañamiento: muchas veces, la idea melódica pasa de una voz ó un instrumento á otro, y se encuentra de tal manera confundida entre todas las partes concertantes, que es difícil distinguir el canto del acompañamiento, y la melodia de la armonía.

Pero en todos los casos, bien se trate de sonidos musicales sucesivos ó de sonidos simultáneos, hay entre las alturas de estos sonidos relaciones determinadas que limitan, entre dos intervalos cualesquiera, las alturas relativas de los sonidos empleados.

Considerados dichos sonidos en su sucesion del grave al agudo ó del agudo al grave, forman una escala discontinua, una *gama* conforme la espresion técnica, ó una série de gamas, cuyo carácter comun ó ley vamos á exponer.

De esta série sacan partido los músicos para componer sus melodías y los acordes que las acompañan sometiéndose para elló á ciertas leyes que son del dominio del arte ó, si se quiere, de la ciencia musical, pero á las cuales es estraña la acústica. Frecuentemente se han comparado los sonidos á los colores de que se sirven los pintores para hacer sus cuadros; y existe en efecto, entre los colores y los sonidos la analogía de que unos y otros proceden por grados. Puede hacerse una gama de los colores como se tiene una gama de los sonidos. Hay sin embargo, la diferencia de que en la naturaleza, como en la pintura, que es de aquella en cierto modo una imitacion, los colores y sus matices infinitos son susceptibles de ser empleados en el mismo cuadro. No sucede lo mismo en una obra musical: en esta, el número de elementos ó sonidos es limitado; la discontinuidad es indispensable, y cuando un matiz sucede á otro para la variedad de la melodía ó armonía, el tránsito de una tonalidad ó un modo á otro modo ó á otra tonalidad, se verifica por grados determinados y no de una manera continua.

Lo que pueda parecer oscuro en lo que precede á los lectores no familiarizados con los principios de la música, lo verán más claro cuando hayamos dado algunas definiciones y establecido algunas reglas.

Intentemos por ahora dar una idea de la sucesion y de la relacion de los sonidos que constituyen las escalas

musicales, conocidas con los nombres de *gamas*, y que forman la base física de la música moderna (1).

§ 2.—La gama.

Dáse el nombre de gama á una série de siete sonidos que se suceden procediendo del grave al agudo ó del agudo al grave, y que están comprendidos entre dos sonidos extremos que presentan el carácter de que el más agudo es producido por doble número de vibraciones del más grave. Como el sonido más agudo es el octavo de la série, se dice que los dos sonidos extremos son la *octava* el uno del otro: uno la octava grave, otro la octava aguda.

Si se considera ahora este octavo sonido como el punto de partida de una série semejante á la primera, teniendo cuidado de componer esta nueva série de sonidos que guarden entre si las mismas relaciones de altura que los primeros, se observará que la impresion producida en el oido por su sucesion, ofrece gran analogía con la que proviene de la audicion de los sonidos de la primera gama. Una melodía formada con una série de sonidos tomados en la primera série, conserva el mismo carácter si la cantamos ó la tocamos por medio de los sonidos del mismo orden de la segunda série. Pasaria una cosa análoga si se formasen de la misma manera una ó muchas gamas más agudas ó más graves que las que acabamos de citar.

(1) Desde Pitágoras hasta la Edad media y el siglo xvii, la gama sufrió modificaciones de composicion, de denominaciones y de forma, cuya historia seria muy larga y saldría, por otra parte, fuera de los límites de esta obra. El conjunto de sonidos que formaba la gama de los griegos comprendia veinte notas ó dos octavas, más una sexta mayor. Estas notas (excepto la primera) se designaban por las letras A B C D E F G a b c d e f g aa bb cc dd ee. Cuando Guy d'Arezzo en el siglo xi modificó la escala musical que estaba en uso, restableció una cuerda ó una nota grave y la designó por la letra griega Γ, *γάμμα*: y de aquí viene el nombre de *gama* que se ha conservado hasta nuestros días.

Una escala musical de este género, formada de gamas consecutivas, es indefinida ó por lo menos no tiene otros límites que los de la perceptibilidad de los sonidos.

Antes de dar los *intervalos* que separan los sonidos sucesivos de la gama, ó lo que viene á ser lo mismo, las relaciones de los números de vibraciones que corresponden á cada uno de ellos, hagamos notar que el sonido del cual se parte para formar una gama, es necesariamente arbitrario, de suerte que hay un número infinito de escalas musicales semejantes que la naturaleza ha puesto á disposicion de los músicos. Mas en la práctica musical se ha sentido la necesidad de tomar convencionalmente un punto de partida fijo, lo cual ha conducido á dar á los sonidos de la gama nombres particulares. Si no se hubiese tratado más que del canto ó de la música ejecutada por la voz humana, no hubiera sido necesario un convenio de este género; porque la voz es un órgano bastante flexible para emitir á voluntad sonidos en cualquier grado de agudez ó gravedad entre sus límites naturales. Pero la música moderna admite el empleo simultáneo del canto y de los instrumentos musicales; con frecuencia en las sinfonías y la música concertante, los instrumentos son los únicos ejecutantes de una obra musical. Pues bien, hay cierto número de instrumentos contruidos de manera que dan sonidos fijos de una altura determinada y en este caso vienen á ser los reguladores de los sonidos emitidos por los demás instrumentos, y por las voces. De aquí la necesidad de adoptar un sonido normal de una altura determinada y constante, producido por un número conocido de vibraciones con el cual se ha convenido en comparar los demás sonidos musicales y que sirva como de base á todas las gamas. Una vez comprendido que este convenio es completamente arbitrario y que el número de gamas naturales es ilimitado, no hay ya ningun inconve-

niente en adoptarlo, al ménos para la música instrumental.

Hé aquí los nombres (1) que se han dado á los diversos sonidos que componen una gama, pasando del sonido más grave al más agudo:

do re mi fa sol la si.

Conforme á lo que hemos dicho acerca de cómo se forman las gamas siguientes y de la analogía, sino de la identidad, que existe entre los sonidos de la otra, se comprende que se ha debido dar los mismos nombres á los sonidos de las gamas sucesivas. Los físicos los distinguen unos de otros afectando los nombres de los sonidos de índices numéricos que marcan el orden de altura de las gamas. Las dos gamas, una inmediatamente mas grave, la otra mas aguda que la gama que sirve de punto de partida, á la cual se dá el índice¹ (á veces o), se escribirán, pues, de esta manera:

do ₋₁	re ₋₁	mi ₋₁	fa ₋₁	sol ₋₁	la ₋₁	si ₋₁
do ₁	re ₁	mi ₁	fa ₁	sol ₁	la ₁	si ₁
do ₂	re ₂	mi ₂	fa ₂	sol ₂	la ₂	si ₂

De la constitucion de las gamas sucesivas resulta tambien que los sonidos del mismo nombre son la octa-

(1) Se ha visto en la nota anterior que la costumbre de los antiguos era representar las notas por letras: este es aun el sistema adoptado en Inglaterra y Alemania. En Italia, Francia y España se emplean los nombres *do*, *re*, *mi*, etc., cuyo origen es este: Un monje benedictino Guido d'Arezzo ó tambien Guy d'Arein fue el que eligió estas sílabas tomadas de un himno latino que se cantaba en las iglesias en honor á San Juan y cuyas palabras son las siguientes: *Ut que-ant la-xis i-eso-are i-bri-bi Mi-ra gesto-nium famu-li tu-orum, Sol-ve pol-lu-ti-tabi-i-re a-tum, Sancte Io-an-nes.*

Por mucho tiempo fueron seis las notas; la sétima, *si*, no tenía ninguna denominación. Esta correspondía á la letra *b*, que se escribía unas veces bajo la forma de una *b cuadrada*, otras bajo una *b redonda* ó *mol*, segun que el trozo fuera en *do* ó en *fa* mayor. De aquí los nombres de *becuadro* y *bemol*, cuyo sentido general se verá mas adelante. En 1684 Francisco Lenaire dio el nombre de *si* á la sétima nota ó ensible del tono de *do*. Todo el mundo sabe que al solfear se sustituye la sílaba *ut* (*) que carece de sonoridad por la sílaba *do* que se entiende mejor.

(*) Sabido es que los franceses llaman *ut* al *do* que se usa en España.

va unos de otros, lo mismo que sucede con los sonidos extremos de cada gama. Así, do_1 , re_1 , mi_1 , son las octavas agudas de do_{-1} , re_{-1} , mi_{-1} ... y las octavas graves de do_2 , re_2 , mi_2 .

Antes de pasar mas adelante, recordemos las leyes de las vibraciones de las cuerdas y de los tubos y comprenderemos que si se disponen siete cuerdas de modo que den los siete sonidos de la gama, se obtendrán los siete sonidos de la gama aguda, en la octava de la primera, dividiendo todas las cuerdas en dos partes iguales. Si en lugar de cuerdas se tomasen siete tubos abiertos ó cerrados que dieran la gama por sus sonidos fundamentales, seria preciso tomar siete tubos de la mitad de longitud para obtener la gama inmediatamente mas aguda y siete tubos de longitudes dobles para obtener los sonidos de la gama inmediatamente mas grave.

Si se comparan cada uno de los siete sonidos de una misma gama con el sonido mas grave, que forma lo que se llama la *tónica*, con relacion á sus alturas, se tienen otros tantos *intervalos* diferentes, cuyos nombres son los siguientes:

De do á do	<i>unisono.</i>
do — re	<i>segunda.</i>
do — mi	<i>tercera.</i>
do — fa	<i>cuarta.</i>
do — sol	<i>quinta.</i>
do — la	<i>sesta.</i>
do — si	<i>sétima.</i>

Y por último do — do_2 *octava.*

El intervalo musical se define en fisica diciendo que es la relacion de los números de vibraciones de los sonidos que lo forman. El unisono y la octava son los únicos cuyo valor vamos á dar: 1 ó $\frac{1}{1}$ mide el intervalo del unisono; 2 ó $\frac{2}{1}$ mide la octava. Réstanos de-

cir cuáles son los números que miden los otros intervalos.

Hé aquí estos números tales como están adoptados hoy por la mayoría de los físicos:

do — do	unísono =	$\frac{1}{1}$
re — do	segunda =	$\frac{9}{8}$
mi — do	tercera =	$\frac{5}{4}$
fa — do	cuarta =	$\frac{4}{3}$
sol — do	quinta =	$\frac{3}{2}$
la — do	sesta =	$\frac{5}{3}$
si — do	sétima =	$\frac{15}{8}$
do ₂ — do	octava =	2

Fácil es calcular por este cuadro los intervalos consecutivos de los sonidos de la gama, ó las relaciones de los números de vibraciones de dos sonidos sucesivos de la série. Hélos aquí:

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

Se vé que estos intervalos no son iguales entre sí; hay en ellos tres órdenes de grados; tres intervalos, do-re, fa-sol, la-si, iguales cada uno á $\frac{9}{8}$, son los mayores de todos; otros dos, re-mi y sol-la valen $\frac{10}{9}$, de modo que reduciéndolos á un comun denominador, el de los primeros, se encuentra 81 y 80, que son los números enteros que los representarían respectivamente; aunque desiguales entre sí, se llaman en música *segun-*

das mayores y los dos mas pequeños $\frac{16}{15}$ son *segundas menores*. Aun cuando las segundas mayores no sean iguales, se ha convenido en comprenderlas bajo la misma denominacion (1) y se dice que una gama se compone de los intervalos sucesivos siguientes:

Una segunda mayor,
 Una segunda mayor,
 Una *segunda menor*,
 Una segunda mayor,
 Una segunda mayor,
 Una segunda mayor,
 Una *segunda menor*.

La gama así constituida se llama *gama mayor* para distinguirla de una gama formada por intervalos que se suceden en ot o orden que se denomina *gama menor*.

La escala musical formada de este modo no puede bastar al compositor, cuyas melodías, encerradas en circulo tan estrecho, tendrían un carácter de *monotonía* incompatible con la variedad de impresiones que quiere producir. Para aumentar sus recursos, pasa, en el mismo trozo musical, de una gama á otra, y á estas transiciones, cuyas reglas son del dominio del arte musical, es á lo que se dá el nombre de *modulaciones*. Las nuevas gamas no difieren completamente de la primera, de aquella que se ha convenido en llamar gama natural. Sólo se encuentran modificados ciertos sonidos; pero el orden de sucesion y las relaciones de altura de los sonidos de la nueva gama son los mismos.

Escribamos la sucesion de dos gamas consecutivas

(1) Los físicos llaman *tono mayor* y *tono menor* á los dos intervalos de segunda, y reservan para la segunda menor *mi-fa*, *si-do*, el nombre de *semi-tono*.

en octava la una de otra y que tengan por tónica común el sonido *do*:

do re mi fa sol la si do re mi fa sol la si do.

Fácil es ver que por una simple sustitucion de los dos intervalos que separan el *mi* del *sol*, es decir, haciendo seguir el *mi* de una segunda mayor y preceder el *sol* de una segunda menor, se tiene una gama nueva que presenta la misma serie de intervalos que la primera, pero que comienza por el sonido *sol* en vez de empezar por el sonido *do*. Para ello no hay mas que sustituir al *fa* una nueva nota, más elevada, que se llama *fa sostenido*, *fa* \sharp . Hé aquí esta gama:

do re mi fa \sharp sol la si do re mi fa \sharp sol la si do
 gama de *sol mayor*.

Vése en efecto que los dos primeros intervalos de esta nueva gama son dos segundas mayores sol-la, la-si y que van seguidos de una segunda menor, si-do; que despues vienen tres segundas mayores do-re, re-mi y mi-fa \sharp ; por último, que la gama termina por una segunda menor fa \sharp -sol. El nuevo sonido ha debido recibir un nombre enteramente nuevo; se le distingue del *fa* que él reemplaza, por el nombre de *fa sostenido* y se dice que el *fa* natural ha sido *sostenido*. Partiendo de la gama de sol y sosteniendo el *do* se tendrá una nueva gama mayor que empieza por *re* y así sucesivamente, lo cual pone á disposicion del músico siete gamas mayores procediendo por sostenidos, es decir, por la sustitucion sucesiva á los sonidos primitivos, de sonidos mas elevados, ó de segundas mayores á las segundas menores.

Puédese tambien obtener una serie de gamas mayores partiendo de la gama de *do*; basta para ello in-

vertir el orden de los dos intervalos *la-si*, *si-do*, reemplazando el *si* por un sonido mas bajo al cual se dá el nombre de *si bemol*, si \flat . De este modo se tiene la sucesion:

do re mi fa sol la si \flat do re mi fa sol la si \flat do
 ───────────────────────────────────
 gama de *fa natural mayor*.

Procediendo con esta nueva gama como con la primera, se tendria una série de gamas mayores en las cuales estarian *bemolizados* más sonidos primitivos. Hé aqui el cuadro completo de las gamas mayores obtenidas por estos artificios:

GAMA DE DO NATURAL MAYOR.

TODAS LAS NOTAS DE ESTA GAMA SON NATURALES.

	Sostenidos.		Bemoles.
Gamas de sol'	1	Gamas de fa	1
re	2	si \flat	2
la	3	mi \flat	3
mi	4	la \flat	4
si	5	re \flat	5
fa \sharp	6	sol \flat	6
do \sharp	7	do \flat	7

La série de los sonidos obtenidos sucesivamente es esta: fa, do, sol, re, la, mi, si. La de los sonidos bemolizados es precisamente inversa: si, mi, la, re, sol, do, fa.

Como la exposicion completa de las reglas que sirven para formar todas estas escalas musicales estralimitaria el objeto de esta obra, concretémonos á decir que los músicos emplean tambien *gamas menores* que pre-

sentan la particularidad de que el orden de los intervalos ascendentes difiere del de los intervalos descendentes.

GAMA DE LA MENOR.

Intervalos ascendentes.	Intervalos descendentes.
la	la ₂
. . . segunda mayor.	. . . segunda mayor.
si	sol ♯
. . . segunda menor.	. . . segunda mayor.
do	fa ♯
. . . segunda mayor.	. . . segunda menor.
re	mi
. . . segunda mayor.	. . . segunda mayor.
mi	re
. . . segunda mayor.	. . . segunda mayor.
fa ♯	do
. . . segunda mayor.	. . . segunda menor.
sol ♯	si.
. . . segunda menor.	. . . segunda mayor.
la ₂	la

En la gama menor que damos aquí por tipo se vé que los dos sonidos fa ♯ y sol ♯ de la gama ascendente, están reemplazados por los dos sonidos, *fa*, *sol* en la gama descendente. Esto es lo que los músicos indican al afectar el simbolo de cada uno de estos dos sonidos del signo ♯, que se enuncia *becuadro* y que expresa la vuelta de los dos sonidos sostenidos á su estado primitivo ó natural. El mismo signo indica tambien un cambio del mismo género en un sonido primero *bemo-lizado*.

El primer sonido de una gama determina el tono del trozo musical en que dicha gama es empleada y por esta razon recibe el nombre de *tónico*. Así, se dice el tono de do, el tono de sol... A nuestro juicio, los físicos y los músicos han cometido la injusticia de emplear

la palabra *tono* para designar los intervalos de segunda mayor y segunda menor é introducir así una confusión de palabras que puede engendrar la confusión en las ideas.

§ 3.—De los principios constitutivos de la gama.—Gama de los físicos y gama pitagórica.

La historia de todas las transformaciones que ha sufrido la gama desde Pitágoras hasta nuestros días, es decir, en la antigüedad, en la Edad media y en los tiempos modernos, es harto complicada para que ni siquiera intentemos dar aquí un resumen de ella. Pero el hecho de que la serie musical ha variado, que el oído de los griegos se recreaba con intervalos que nuestra música moderna reprueba, junto á este otro hecho de que hoy mismo las gamas adoptadas por los pueblos que se llaman civilizados son bien diferentes de las que se emplean en la música persa, china, japonesa ó tártara, parece probar evidentemente que la gama tiene un origen en gran parte convencional. No está basada absolutamente ni en leyes puramente físicas ni sobre conveniencias fisiológicas: es el producto de una combinación de estas dos especies de leyes, que las costumbres y la educación han modificado poco á poco.

La cuestión del origen de la gama ha sido, y lo es todavía, largamente discutida, y no ha habido acuerdo ni entre los físicos ni entre los músicos. Los números que hemos dado más arriba para expresar los diversos intervalos de las gamas mayor y menor, constituyen en su conjunto la *gama de los físicos*; pero hay otros que, sin diferir mucho de los primeros, forman una gama diferente á la cual se dá el nombre de *gama de los pitagóricos*.

Veamos en qué difieren y en qué se parecen ambas series.

La gama de los físicos nos parece que no tiene mas que este principio: dos sonidos forman una sucesion melódica ó un acorde agradable, cuando sus números de vibraciones están en la relacion más sencilla posible. Representando la tónica ó el primer grado de la escala por 1 y combinando 1 con los números más sencillos 1, 2, 3, 4, 5... se obtendrán los intervalos más agradables $\frac{1}{1}$ ó el unisono, $\frac{2}{1}$ ó la octava, $\frac{3}{1}$ la duodécima que, reducida á la octava inferior, dá la quinta, etc. Así se hallaria naturalmente constituida la gama. Pero aparte de que el principio sentado nos parece por lo menos arbitrario, de este modo se llega á consecuencias que están muy lejos de concordar entre sí, ni con la práctica musical (1). Este no es lugar de entrar en discusion, pues sólo tratamos de comparar ambas gamas.

El principio de la gama de los pitagóricos es este: siendo los números que representan la octava y la quinta 2 y $\frac{3}{2}$, como en la primera, todos los demás intervalos se forman de estos, procediendo por quintas sucesivas. Así, la quinta de *sol* será $\frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2}$ ó $\frac{9}{4}$; es el *re*₂. Luego el *re*₁ está representado por $\frac{9}{8}$. Del *re* se pasa al *la* que es su quinta, despues al *mi* que es la quinta del *la* y así sucesivamente. La gama resultante

(1) El principio e tético que considera la belleza ó el placer en arquitectura, en las otras artes y en música como elementos ligados á la simplicidad de las relaciones numéricas, se adopta generalmente por los matemáticos y físicos, pero nunca ha sido, que sepamos, seriamente discutido y nosotros tendríamos muchas objeciones que hacerle. Para no dar mas que un ejemplo, ¿quién no ve que es preciso considerar la octava como la mas agradable de las consonancias (nada decimos del unisono, que, hablando con propiedad, no es un acorde.) Despues vendrá la quinta, la cuarta, la tercera mayor, etc.— Ahora bien, ¿cuál es el músico en cuyos oídos la tercera mayor ó aun la tercera menor, no produce un efecto más armonioso que la cuarta?

difiere de la de los físicos como se puede ver en el cuadro siguiente:

GRADOS de la GAMA Ó INTERVALOS.	GAMA de los FÍSICOS.	GAMA de los PITAGÓRICOS.
do ó unísono	1	1
re — segunda mayor.	$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$
mi — tercera mayor.	$\frac{5}{4}$	$\frac{81}{64}$
fa — cuarta.	$\frac{4}{3}$	$\frac{4}{3}$
sol — quinta.	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$
la — sexta.	$\frac{5}{3}$	$\frac{27}{16}$
si — séptima.	$\frac{15}{8}$	$\frac{243}{128}$
do ₂ — octava.	2	2

De modo que, de ocho intervalos, cinco son idénticos en las dos gamas; los intervalos diferentes están representados por números menos sencillos en la gama pitagórica, que tiene, por otro lado, la ventaja de no proceder sino por sucesiones de segundas mayores y segundas menores respectivamente iguales entre sí. Mientras que la sucesión de los sonidos está representada en la gama de los físicos por los números: $\frac{9}{8}$ $\frac{10}{9}$ $\frac{16}{15}$ $\frac{9}{8}$ $\frac{10}{9}$ $\frac{9}{8}$ $\frac{16}{15}$, en la gama pitagórica se tiene la serie mucho mas regular, $\frac{9}{8}$ $\frac{9}{8}$ $\frac{256}{243}$ $\frac{9}{8}$ $\frac{9}{8}$ $\frac{9}{8}$ $\frac{256}{243}$.

En todo caso, las diferencias son de poca entidad;

la relación del *tono mayor* $\frac{9}{8}$ al *tono menor* $\frac{10}{9}$ es igual á $\frac{81}{80}$. Es decir, que de 80 vibraciones el exceso de altura del primer intervalo sobre el segundo, está marcado por el exceso de una sola: esto es lo que se designa con el nombre de *coma*. La misma diferencia existe entre los intervalos de la segunda menor $\frac{16}{15}$ de la gama de los físicos y de la segunda menor $\frac{256}{245}$ de la gama de los pitagóricos. Teóricamente, cada cual de ambas escalas musicales así constituidas, puede ser justificada en ciertos puntos y atacada por otros. A nosotros no nos toca decidir la cuestión (1).

§ 4 — Estudio óptico de los intervalos musicales.

Hemos descrito diversos métodos por los cuales se mide el número de vibraciones efectuadas por un cuerpo sonoro en el momento en que produce un sonido determinado. La sirena, la rueda de Savart, el vibróscopio ó fonotógrafo, son los aparatos que se emplean con dicho objeto. En el último de estos instrumentos las vibraciones se inscriben por sí mismas sobre una superficie, y muy fácil es después apreciar su amplitud y número. Éste es el método gráfico para el estudio de los sonidos.

Hace diez y ocho años que un físico francés, Lissajous, tuvo la idea de estudiar con el auxilio de la vista los movimientos vibratorios de los cuerpos sonoros y

(1) Cornu y Mercadier, que han llevado á cabo con escrupulosidad una larga serie de experiencias comparativas sobre estas dos gamas, han llegado á la conclusión de que cada una tiene su razón de ser en la música moderna: la una, la gama de los pitagóricos sería necesaria para los intervalos melódicos, mientras que en los intervalos armónicos sería preciso emplear la gama de los físicos. Pero ¿cómo conciliar esta doble exigencia, siendo así que la gran mayoría de las composiciones musicales modernas hacen igual uso de la melodía y de la armonía?

sustituir de este modo el órgano del oído por el órgano de la vista para la apreciación de las relaciones de los sonidos. De ahí el nombre de método óptico dado al procedimiento que aquel físico empleó y que nosotros vamos á describir sumariamente. Por medio del método óptico, un sordo podría dedicarse á investigaciones sobre la altura comparada de los sonidos.

«Nadie hay entre nosotros, decía Lissajous en una lección en que exponía este nuevo método, que no haya en su infancia, á riesgo de incendiar la casa paterna, metido un palillo en la lumbre para sacarlo con la punta encendida, agitarlo y seguir, con la curiosidad natural de la juventud, esas líneas brillantes producidas por la estremidad encendida cual si fuera un pincel mágico cuya huella fugitiva se borraba en un instante. Tal es el experimento que ha servido de base al método óptico.»

Un diapason, como ya se sabe, es un instrumentito formado por una barra de metal doblada sobre sí misma en forma de pinzas. Con un trozo de metal ó de madera mas grueso que el espacio que media entre las estremidades de las ramas, se separan las dos láminas elásticas y sus oscilaciones producen un sonido cuya altura depende de la forma y dimensiones del instrumento. Los físicos hacen también vibrar el diapason frotando una de las ramas con un arco. Por medio del diapason se templan los instrumentos de música, ó se regula el tono de las voces en las orquestas y teatros. En Francia, el diapason normal es el que produce el segundo *la* del violín, cuyo número de vibraciones sencillas es 870 por segundo.

Para hacer visibles las vibraciones de un diapason, Lissajous fija sobre la superficie convexa, en la estremidad de una de las ramas, un pequeño espejo metálico. La otra rama lleva un contrapeso para regularizar el movimiento vibratorio.

«Miremos en este espejo, dice, la imagen reflejada

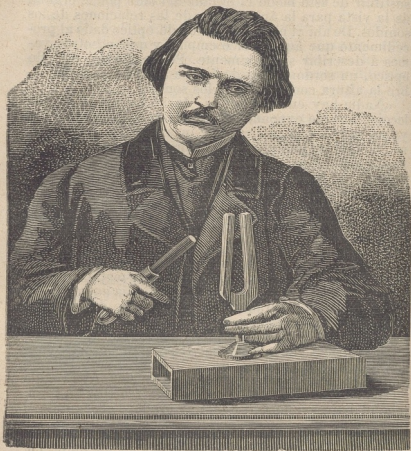


Fig. 19.—Diapason y su caja de resonancia.

de una bujía situada á algunos metros de distancia y hagamos despues vibrar el diapason. Al momento vemos que la imágen se alarga en el sentido de la longitud

de las ramas. Hagamos entonces girar sobre un eje al diapason, la apariencia cambia y vemos en el espejo una línea brillante y sinuosa cuyas ondulaciones acusan por su forma misma la amplitud mas ó menos grande del movimiento vibratorio.»

Sirviéndose de un segundo espejo que envíe la imagen á una pantalla despues de haber atravesado una lente convergente, se hace el fenómeno visible en toda la estension de un anfiteatro. En este caso se toma un manantial de luz mas viva, la del sol ó la luz eléctrica, y se hace girar el segundo espejo alrededor de un eje vertical para obtener la trasformacion de la imagen rectilinea en una curva sinuosa.

Hasta aquí, sólo se ha tratado de hacer visibles las vibraciones de un cuerpo sonoro único. Hé aquí ahora cómo, por el mismo método, ha conseguido Lissajous apreciar la altura comparada de dos sonidos y medir la relacion de los números de vibraciones que corresponden á cada uno de ellos. Se toman dos diapasones, ambos provistos de espejos, pero mientras el eje del uno es vertical, el otro está colocado horizontalmente de modo que están los espejos enfrente. Un haz de luz emanada de una pequeña abertura cae sobre uno de los espejos, en el cual se refleja y va á herir el espejo del segundo diapason, que á su vez lo envia sobre un espejo fijo. Una tercera reflexion proyecta el haz luminoso sobre una pantalla blanca en la cual se advierte una imagen clara y brillante de la abertura, interin los diapasones queden en reposo.

¿Vibra el diapason vertical? Al punto el movimiento de vaiven de la imagen da, en vez de un punto, una línea luminosa alargada en el sentido vertical. Si mientras el diapason vertical está en reposo se agita el diapason horizontal, la imagen en este caso se alarga en el sentido horizontal. Si se hacen vibrar los dos diapasones á la vez, la imagen, encontrándose animada de dos movimientos simultáneos, uno en sentido horizon-

tal, otro en sentido vertical, describirá sobre la pantalla una curva luminosa, y la forma de esta curva dependerá de la relación que exista entre las duraciones de los dos sistemas de vibraciones, de la amplitud de

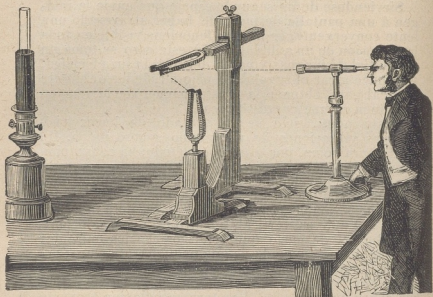


Fig. 20.—Estudio óptico de los movimientos vibratorios por el método de Lissajous.

las oscilaciones, y por último, del tiempo que medie entre los principios de dos vibraciones consecutivas ejecutadas por ambos diapasones. Esta última duración es lo que se llama *diferencia de fase*.

De este modo Lissajous ha determinado curvas luminosas engendradas por diapasones templados de manera que dan los intervalos de la gama, tal como es adoptada por los físicos.

Si los diapasones suenan al *unísono*, la relación de los números de vibraciones es 1; es decir, que las vibraciones efectuadas en tiempos iguales son en número igual. La diferencia de fase es nula, las vibraciones comienzan al mismo tiempo en ambos diapasones, de donde resulta una línea recta luminosa oblicua, la diagonal de un rectángulo cuyos lados tienen una longitud que varía con la amplitud de las vibraciones simultáneas. Cuando la diferencia de fase no es nula, esta línea recta se transforma en una elipse u óvalo.

Dos diapasones que resuenen á la octava el uno del otro dan una serie de curvas, las cuales manifiestan bien que uno de aquellos ejecuta una vibración en el sentido horizontal, mientras el otro verifica dos en el sentido vertical. Si los números de vibraciones están en las relaciones 3 : 2, 4 : 3, 5 : 4, 5 : 3, 9 : 8 y 15 : 8, los diapasones están templados á los intervalos de quinta, de cuarta, de sexta, de segunda mayor y de sétima.

Cuando los diapasones están rigorosamente acordes, la misma curva persiste sobre la pantalla en todo el tiempo de su resonancia simultánea, y acaba por reducirse á un punto. Si por el contrario, el acorde no es perfectamente exacto, si por ejemplo, la octava no es perfecta, el efecto es el mismo que si hubiese un cambio continuo en la diferencia de fase. Anótese el tiempo que emplea en realizar el círculo entero de esas transformaciones y se deducirá de él que hay la diferencia de una vibración en el diapason grave, de dos vibraciones en el diapason agudo, relativamente al número que hubiese dado la octava exacta.

Este método es tan preciso que acusa las mas pequeñas diferencias y permite, no solamente determinar las relaciones de los números de vibraciones, sino también contar el número absoluto de las mismas que corresponde á un sonido dado. Construido así un diapason

que da el *la* normal adoptado por las orquestas, fácil ha sido en seguida servirse de este tipo para construir diapasones que resuenen al unísono.

Lissajous ha aplicado éste método al estudio de las cuerdas vibrantes y al de los sonidos propagados por el aire. Para ello, ilumina la cuerda en uno de sus puntos por la proyeccion de un haz luminoso y recibe los movimientos del aire sobre una membrana en la superficie de la cual fija una pequeña perla brillante (1).

Nos hemos olvidado de decir que si en todos estos experimentos, las curvas trazadas por los puntos luminosos son visibles á la vez en todas sus partes, consiste en que se ha terminado una evolucion entera antes que haya cesado la persistencia de la impresion luminosa en la retina: como la duracion de esta persistencia es próximamente de un décimo de segundo, esto supone que tal es, á lo sumo, el tiempo empleado por la imagen del punto en recorrer la sinuosidad entera de la curva.

Tal es, en resúmen, el método original empleado por Lissajous para hacer sensibles á la vista los movimientos vibratorios de los cuerpos sonoros y las más delicadas particularidades de estos movimientos. Véase, pues, con cuánta razon decíamos antes que una persona privada de la facultad de oír, podria comparar varios sonidos con mayor precision que la que podria obtener por la sola audicion el oído mas sensible.

En estos últimos tiempos, un sabio acústico de París ha ideado otro procedimiento, tambien muy ingenioso, para estudiar las vibraciones de las columnas gaseosas en los tubos. Vamos á dar una idea de él.

(1) Este medio de hacer visibles los movimientos vibratorios habia sido empleado ya por el inglés Wheatstone.

Una de las paredes del tubo sonoro está perforada por cierto número de aberturas, tres, por ejemplo, que corresponden al nodo del sonido fundamental y á los dos nodos de una octava. Cada una de estas aberturas está cerrada por una llave de la cual sale un mechero que comunica con un tubo que conduce á la llave y al mechero del gas del alumbrado. La parte de la llave que se halla en el interior del tubo sonoro, en el seno de la columna gaseosa vibrante, es de cautchú y está ligeramente hinchada por el carburo de hidrógeno. Es, pues, eminentemente elástica y cede al menor aumento de presión. Supongamos encendido el mechero de gas; si la presión interior del aire del tubo crece, la membrana de cautchú se comprime, de modo que la capacidad de la llave disminuye y la llama se alarga; y se acorta por el contrario, si, disminuyendo la presión, aumenta la capacidad interior de la llave. Como se vé, el mechero de gas es un verdadero manómetro indicador de los cambios de presión, por lo cual Mr. Koenig ha dado á las llamas que se desprenden de las llaves, el nombre de *llamas manométricas*.

Imaginemos ahora que el tubo sonoro esté adaptado á un fuelle acústico y que ponemos en vibración el aire que contiene. Sabemos que en este caso entra en vibración la columna gaseosa, que es alternativamente condensada y dilatada por la propagación de las ondas sonoras. Si el sonido producido por el tubo es el sonido fundamental, el nodo se forma en medio de la columna gaseosa; en este punto la dilatación y compresión del aire alcanzan su máximo. Las condensaciones y dilataciones sucesivas se transmiten á la llama manométrica del centro, la cual se alarga y se acorta alternativamente ejecutando una serie de movimientos que acusan el estado vibratorio del cuerpo sonoro. Si se hace dar al tubo la octava del sonido fundamental habrá un vientre enfrente de la llave del centro y un nodo en cada una de las otras dos. También se verán

las llamas extremas muy agitadas mientras que la del centro quedará inmóvil. Estos fenómenos son fáciles de explicar.

Sabemos, en efecto, que en los tubos sonoros, la columna gaseosa vibrante se divide en partes separadas por nodos y cuyos puntos medios son vientres de vibraciones. En cada nodo el aire está en reposo, pero su densidad es alternativamente máxima y mínima. Cada vientre, por el contrario, es el punto en donde la velocidad de conmoción es la mayor posible, mientras que la densidad del aire permanece invariable. Ahora bien, como las variaciones de densidad determinan variaciones de presión y éstas se transmiten á las llamas por las membranas de las llaves, resulta que las llamas manométricas se agitan mucho cuando se hallan en presencia de los nodos, en tanto que quedan en reposo cuando corresponden á un vientre de la columna vibrante. Por el método de Koenig se demuestra la existencia de esos diversos estados. Dando á las llamas poca altura, la agitación que experimentan enfrente de los nodos hace que se apaguen, mientras que permanecen encendidas enfrente de los vientres.

Para hacer mas sensibles las dilataciones y contracciones de la llama. Koenig emplea un modo de proyección semejante al que Lissajous ha adoptado para el método óptico. Para ello coloca un espejo de cuatro caras enfrente del mechero que da la llama y le imprime un movimiento de rotación por medio de un manubrio y dos ruedas dentadas en ángulo. Al momento que el tubo resuena, el espejo deja ver una sucesión de llamas separadas por intervalos oscuros, ó una faja luminosa de bordes dentados. Situada una lente convergente entre el mechero y el espejo giratorio, se proyecta una imagen clara y brillante sobre una pantalla en la cual se pueden estudiar todas las particularidades del fenómeno.

Así, en los dos experimentos que hemos descrito más

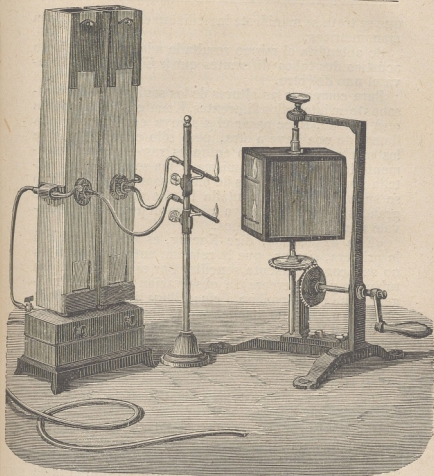


Fig. 21.—Aparato de Koenig para la comparación de los movimientos de dos tubos sonoros.

arriba, donde el tubo sonoro produce sucesivamente el sonido fundamental y su octava, el cambio de altura de

que se trata se manifiesta inmediatamente en las llamas manométricas.

Se obtendría el mismo resultado adaptando al fuelle acústico dos tubos diferentes que [resonasen á la octava el uno del otro.

Para comparar las alturas de los sonidos del tubo resonante en intervalos diferentes, Koenig emplea todavía otro método. Hace pasar el gas cuya combustion da la llama, de una llave á otra, pero sólo enciende uno de los mecheros. Haciendo entonces resonar simultáneamente los dos tubos, la misma llama se encuentra agitada por los dos sistemas de ondas sonoras y se ve que se suceden sobre la pantalla llamas alternativamente grandes y pequeñas, cuyo número depende del intervalo musical de los sonidos.

«Esta disposición, dice Koenig, es aún preferible á la primera, siempre que la relacion entre ambos tubos no sea completamente sencilla. Por ejemplo, para los tubos *do* y *mi* (tercera) la observacion de cuatro imágenes que correspondan á cinco llega á ser ya difícil; pero la sucesion de imágenes que por grupos de cinco se alargan y se acortan, y se obtienen en el espejo giratorio por la segunda disposición, no es de una apariencia muy complicada.

§ 5.—Timbre de los sonidos musicales.

Hemos visto que entre las cualidades de un sonido musical hay una que permite diferenciar los sonidos que tengan la misma altura y la misma intensidad. El *la* de un violin no tiene el mismo carácter que el *la* de una flauta, de un piano ó el *la* emitido por una voz humana; además, en el mismo instrumento no resuena un sonido de idéntica manera si el modo de producirlo cambia: así el *la* obtenido por la cuerda de un violin que vibra en toda su longitud no es idéntico al *la* que

se obtiene con el cuarto dedo pulsando la cuerda de *re*. Las voces humanas, por último, se distinguen las unas de las otras, en el momento mismo en que emiten sonidos de igual intensidad y altura. Esa cualidad peculiar de los sonidos es lo que se llama *timbre*.

Por mucho tiempo no se han tenido sobre la causa de esta modificación de los sonidos más que ideas vagas. Hé aquí lo que sobre el particular decía Rousseau en 1775, en la *Enciclopedia* (art. SONIDO):

«Respecto á la diferencia que existe entre los sonidos por la cualidad del timbre, es evidente que no procede ni del grado de gravedad ni del de fuerza. Un oboe podrá ponerse exactamente al unisono de una flauta, suavizar el sonido en el mismo grado, pero el sonido de la flauta tendrá siempre un no sé qué de dulce y melodioso y el del oboe un no sé qué de seco y agrio que hará que nunca podamos confundirlos. ¿Qué diremos de los diferentes timbres de las voces de igual fuerza y del mismo alcance? Cada cual puede juzgar de la prodigiosa variedad que se observa en ellas. Sin embargo, nadie que yo sepa ha examinado todavía esta parte, que acaso como en las otras encontrará dificultades; porque la cualidad del timbre no puede depender ni del número de las vibraciones que forman el grado del grave al agudo, ni de la magnitud ó fuerza de estas mismas vibraciones que constituye el grado del fuerte al débil. Será preciso, por consiguiente, hallar en los cuerpos sonoros una tercera modificación diferente de las anteriores, para explicar esta última propiedad, lo cual no me parece fácil de resolver.»

De una comunicacion dirigida á la Academia de Ciencias en este mismo año (1875), resulta que Monge habia concebido, si no la teoría del timbre tal como recientemente la han establecido los esperimentos del físico alemán Helmholtz, por lo ménos el principio en que descansa dicha teoría. Hé aquí el texto, en el cual se menciona la opinion del ilustre géometra francés:.....

«He oído decir á M. Monge, de la Academia de Ciencias, que lo que determinaba tal ó cual timbre no debía ser más que tal ó cual orden y tal ó cual número de vibraciones de las alicuotas de la cuerda que produce un sonido de aquel timbre;..... y añadía, que si se lograra suprimir las vibraciones de las alicuotas, todas las cuerdas sonoras, de cualquier materia que fuesen, tendrían seguramente el mismo timbre (1).»

En 1817 Biot reproducía en otros términos la hipótesis de Monge (que debió ser en 1794 su profesor en la Escuela Politécnica recientemente fundada.) En sus *Elementos de Física Experimental* decía lo que sigue:

«Todos los cuerpos vibrantes hacen oír á la vez, además de sus sonidos fundamentales, una serie infinita de sonidos de una intensidad gradualmente decreciente. Este fenómeno es parecido al de los sonidos armónicos de las cuerdas, pero la ley de la serie de los armónicos es diferente para las diferentes formas del cuerpo. ¿No sería esta diferencia la que produciría el carácter particular del sonido producido por cada forma de cuerpo, lo cual se llama *timbre*, y que hace por ejemplo, que el sonido de una cuerda y el de un vaso no produzcan en nosotros la misma sensación? ¿No sería la degradación de intensidad de los armónicos de cada serie la que nos haría encontrar agradables ciertos acordes que no soportaríamos si fuesen producidos por sonidos iguales; y el timbre particular de cada sustancia, de la madera y del metal, por ejemplo, no procedería del exceso de intensidad dada á tal ó cual armónico? (2).»

(1) Citado por M. Resal, como extracto de un opúsculo de Suremain-Miserey, antiguo oficial de artillería, miembro de la Academia de ciencias de Dijon, opúsculo titulado: *Teoría acústica-musical*, 1795.

(2) La idea de que la causa del timbre está en la concomitancia de los sonidos débiles que acompañan al sonido principal, idea perfectamente expresada por Monge, y desarrollada después por Biot, ha persistido hasta los experimentos de Helmholtz. Así, vemos que Daguin en su Tratado de Física publicado en 1833 (1.ª edición), se expresaba acerca de este punto del modo siguiente:

«En los instrumentos de música, el timbre es debido las más de las veces

§ 6.—Influencia de los sonidos armónicos sobre el timbre.

Varias veces hemos tenido ocasión de hablar de los sonidos armónicos y definirlos. La nueva teoría del timbre exige que entremos en algunos detalles acerca de este punto.

Cuando se escucha atentamente el sonido producido por una cuerda vibrante, no se tarda en reconocer que este sonido no es sencillo, pues además del sonido fundamental, cuya altura depende de la longitud, grueso y tensión de la cuerda, el oído distingue cómodamente cierto número de entonaciones más agudas, notablemente menos intensas que el sonido fundamental. Supongamos que la cuerda agitada sea la más grave de un violonchelo. Dicha cuerda da el sonido que los físicos acostumbran á señalar por do_1 . Pues bien, al mismo tiempo que resuena se oyen muy distintamente dos notas de las cuales la más grave es el sol_2 , ó lo que es lo mismo, la octava de la quinta ó la duodécima del sonido fundamental; la otra es el mi_3 , doble octava de la tercera mayor ó décima-sétima. La octava y la doble octava do_2 y do_3 , se distinguen también con menos facilidad, sin duda porque el carácter musical de estos sonidos se parece más al del sonido fundamental y se confunden con él.

Se ha dado el nombre de *sonidos armónicos* ó simple-

á sonidos débiles que acompañan al que se trata de producir solo. Estos sonidos concomitantes provienen unas veces de las partes vibrantes por sí mismas que hacen oír algunos sonidos á la vez; otras el cuerpo vibrante transmite estas vibraciones á las demás partes del instrumento... También puede ser debido el timbre al modo como varía la velocidad del cuerpo vibrante mientras recorre la amplitud de cada vibración. Las curvas que representan las ondas sonoras pueden ser de forma variable y la onda dilatante puede ser diferente de la onda condensante; puede también acontecer que haya interrupciones entre las ondas sucesivas.*

De este modo se han ido precisando poco á poco las opiniones de los físicos sobre la causa hipotética del timbre; pero faltaba demostrar su realidad por hechos, por la observación experimental. Este es el mérito que Helmholtz ha alcanzado por haberlos llevado á cabo satisfactoriamente.

mente de armónicos á esos sonidos mas débiles de los cuales van acompañados la mayor parte de los sonidos musicales. El primer estudio de dichos sonidos, hecho por un físico francés, Sauveur, se remonta al año 1700. La denominación indicada viene sin duda de que los primeros armónicos observados, especialmente los que acabamos de señalar, forman entre sí y con el sonido fundamental, acordes consonantes ó consonancias. Pero bien pronto se atestiguó que no son ellos los únicos y que la série armónica es mucho mas extensa.

Antes de indicarlos comparemos entre sí los números de vibraciones del sonido fundamental y de sus armónicos. Representando el sonido más grave por 1, la quinta es $\frac{3}{2}$ y, por consecuencia, la octava de la quinta es $\frac{5}{4}$; la tercera es $\frac{5}{4}$ y su doble octava $\frac{5}{2}$; en fin, la octava y la doble octava del fundamental estarán representadas por los números 2 y 4. (1). De suerte que ordenando por orden de alturas, del grave al agudo, todos los sonidos en cuestion, se tendrá la série: 1, 2, $\frac{3}{2}$, 4, $\frac{5}{4}$.

Las cuerdas vibrantes no son las únicas que van acompañadas de sonidos armónicos, pues los sonidos de los tubos sonoros, los de la voz humana son ricos en sonidos de este género, que, por lo demás, no se distinguen todos con la misma facilidad áun para los oídos ejercitados: es preciso para reconocer los medios de análisis especiales de los cuales nos ocuparemos pronto. Notemos por ahora que entre los sonidos parciales que forman los sonidos compuestos, los hay que no son sonidos armónicos. Las varillas y las planchas metálicas,

(1) Esto es verdad para los intervalos de la gama de los físicos. La tercera de la gama pitagórica es $\frac{81}{64}$, su doble octava es $\frac{81}{16}$ ó $\frac{5}{16}$. Por consiguiente, la gama de los físicos parece que debe ser preferida á la de los pitagóricos.

las campanas de metal ó de vidrio y las membranas producen, cuando resuenan, sonidos parciales que no entran en la série de los armónicos, y que, además, bajo el punto de vista musical, impresionan desagradablemente al oído.

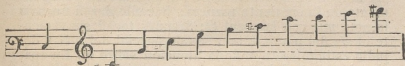
¿Cuál es, pues, el carácter físico peculiar á los armónicos? ¿En qué se distinguen de los otros sonidos parciales que un cuerpo sonoro puede producir? La definición no es otra que la generalización del resultado que más arriba hemos obtenido. Un sonido fundamental tiene por armónicos todos los sonidos cuyos números de vibraciones son múltiplos enteros del número de vibraciones totales que miden su altura; están por consiguiente representados por la série de los números 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, etc., série que perfectamente se comprende que tiene por límite la perceptibilidad de los sonidos; pero es más estensa de lo que se creía al principio.

Por medio de un experimento tan sencillo como ingenioso, debido á Sauveur, se pueden analizar, aislándolos, los sonidos armónicos de una cuerda vibrante. Dicho experimento está basado en la ley que relaciona los números de vibraciones á las longitudes de las cuerdas, de donde resulta que los armónicos se obtienen dividiendo la cuerda dada en números enteros de partes iguales. Puesta la cuerda entera en vibración, si además del sonido fundamental produce los armónicos, esto quiere decir que en realidad aquella se divide en partes vibrantes; que, como ha dicho Sauveur, «cada mitad, cada tercio, cada cuarto de una cuerda tiene sus vibraciones aparte, mientras que se verifica la vibración de la cuerda entera.» Para reconocer la existencia de esas subdivisiones de la cuerda, basta poner un obstáculo en el punto que sea susceptible de dar el sonido armónico que se quiere obtener aisladamente, en la mitad ó en el cuarto de la cuerda, si se quiere obtener la primera ó la segunda octava; en el tercio ó

el quinto, si se desea la duodécima ó la décima tercera. Haciendo vibrar la parte más corta de la cuerda, se oye la nota deseada; las dos partes vibran, aparte de esto, juntas, y la mayor se subdivide, como se puede probar, colocando para ello caballitos de papel en los nodos y en los vientres: los que se ponen sobre estos últimos, caen; los que coincidan con los nodos, quedan solos. Ya recordará el lector que este experimento se hizo en otro lugar.

Hemos dicho que el análisis de los sonidos armónicos por el oído era bastante difícil mas allá de la duodécima y de la décima sétima. Hé aquí á este propósito algunos pormenores interesantes dados por Helmholtz para facilitar á los principiantes los medios de distinguir estos sonidos. «Haré observar, dice, que la educación musical del oído no entraña necesariamente más facilidad ni seguridad en la percepción de los sonidos parciales. Aquí se trata mas bien de cierto poder de abstracción del espíritu, de cierto imperio sobre su propia atención, que de hábitos musicales. El músico ejercitado posee, no obstante, una ventaja esencial y es, que se representa fácilmente los sonidos que pretende oír, mientras que una persona extraña á la música está obligada á hacerlos sin cesar resonar para tenerlos siempre presentes á la memoria. Conviene observar, que se oyen generalmente los sonidos parciales impares, es decir, las quintas, las tercias, las sétimas del sonido fundamental, más fácilmente que los sonidos parciales pares, que son las octavas del sonido fundamental ó de los otros armónicos; de igual modo que es más fácil distinguir en un acorde las quintas y las terceras, que las octavas. El segundo sonido parcial, el cuarto y el octavo son octavas del sonido fundamental; el sexto es la octava del tercero, de la duodécima, los cuales para distinguirlos se necesita ya alguna costumbre. Entre los sonidos parciales impares, los mas fáciles de oír son en general, por orden

de intensidad, el tercero, es decir, la duodécima del sonido fundamental ó la quinta de la octava superior; despues el quinto ó la tercera; en fin, el sétimo ó la sétima menor, ya mucho más débiles, de la segunda octava. La série de los armónicos está representada en el pentágrama por las notas siguientes:



«Al principio, para observar los armónicos, conviene hacer resonar muy despacio, antes que el sonido que se va á analizar, las notas cuya audicion se busca, conservándoles tanto como sea posible un timbre idéntico al del conjunto. El piano y el armonium convienen muy bien para este linaje de investigaciones, porque ambos instrumentos dan armónicos de suficiente intensidad.»

El sabio que acabamos de citar se ha ocupado mucho de la análisis de los sonidos, y especialmente de los armónicos; en este análisis es donde ha basado la teoría del timbre, la cual resumiremos enseguida en sus puntos esenciales. Remitimos al lector á la obra en que ha consignado el resultado de sus indagaciones (1); pero citaremos sin embargo lo que dice acerca de los armónicos de la voz.

«Es más fácil percibir los armónicos en el sonido de los instrumentos de cuerda, del armonium, de los registros mordientes del órgano, que en el de los instrumentos de viento ó de la voz humana; aquí, en efecto, no es tan fácil emitir previamente, con una débil intensidad, el armónico de que se trata, conservándole

(1) *Teoría fisiológica de la música.*

el mismo timbre. Pronto se llega, no obstante, con algun ejercicio, por medio del sonido de un piano, á guiar el oído hácia el armónico que es preciso oír. Estos son los sonidos parciales de la voz humana que son relativamente mas difíciles de aislar. Con todo, Rameau habia ya distinguido los armónicos de la voz sin ningun auxilio artificial. Puede hacerse el experimento de la siguiente manera: hacedle dar á un bajo la nota mi_1 con la vocal *O*; despues tocad suavemente el si_2 del piano, tercer sonido parcial del mi_1 y dejadlo extinguirse fijando la atencion sobre él. En apariencia, el si_2 del piano se prolongará en lugar de extinguirse aunque abandoneis la tecla, porque el oído pasa inmediatamente del sonido del piano al armónico correspondiente de la voz, y toma este último por la prolongacion del primero. Ahora bien, abandonada la tecla á sí misma, y habiendo caido el apagador sobre la cuerda, es imposible que ésta continúe resonando. Si se quiere hacer el experimento con el quinto sonido parcial del mi_1 , es decir, con el sol_3 , es preferible que el cantante dé un *A*.»

El análisis de los armónicos se hace con mas facilidad por medio de los globos de vidrio llamados resonadores. Con una série numerosa de estos aparatos, cada uno de los cuales esté construido de manera que refuerce un sonido de una altura determinada, se reconoce la presencia de los sonidos parciales que acompañan á la nota fundamental de un cuerpo sonoro en vibracion, y se puede ver si pertenecen ó no á la série de los sonidos armónicos. De esta manera se atestiguan no solo sonidos muy débiles para ser percibidos por el oído mas ejercitado y mas atento, sino que, experimentos repetidos de este género dan un gran hábito al que los hace con cuidado, y acaba por reconocer la presencia de dichos sonidos armónicos sin el menor auxilio.

Veamos ahora cómo por la consideracion de los ar-

mónicos ha llegado Helmholtz á la teoría del timbre. Desde luego se ha preguntado: ¿Todos los cuerpos sonoros dan armónicos? No. Hay tambien sonidos que sólo son engendrados por un sólo modo de vibración, y por eso se llaman *sonidos sencillos*. Un diapason, por ejemplo, que vibre en el orificio de un tubo sonoro, produce un sonido sencillo, esto es, sin mezcla; los sonidos de la flauta, los de la vocal *u* de la voz humana son sonidos compuestos; pero como sus armónicos poseen una débil intensidad, se acercan mucho á los sonidos sencillos. Helmholtz ha observado, que los sonidos sencillos difieren entre sí en intensidad ó altura, pero que no ofrecen diferencia sensible de timbre. Respecto á los sonidos compuestos de un sonido fundamental y de sonidos parciales, pero no armónicos, su timbre proviene, segun él, del grado de persistencia y regularidad de los sonidos parciales. Estos son poco agradables al oído y de poco uso en música; las placas metálicas, las campanas de vidrio ó de metal y las membranas dan sonidos de esta especie.

De lo dicho se infiere: primero, los sonidos sencillos, desprovistos de armónicos, no se distinguen entre sí por su timbre; segundo, los sonidos compuestos, pero que no tienen armónicos verdaderos, poseen timbres muy diferentes, pero no tienen carácter musical.

Restan, pues, los sonidos musicales propiamente dichos, compuestos de un sonido fundamental y de sonidos parciales armónicos del primero. En estos sonidos, Helmholtz ha demostrado que las diferencias de sus timbres dependen de la presencia de los sonidos armónicos superiores y de su intensidad relativa, pero de ningún modo de sus diferencias de fases. Hé aquí cómo puede demostrarse experimentalmente la exactitud de esta teoría del timbre.

Una série de globos de cobre, huecos, de diversos tamaños y con dos aberturas de desigual diámetro es-

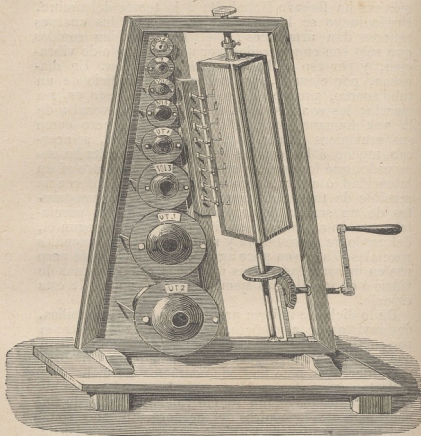


Fig. 22.—Aparato de M. Koenig para el análisis de los timbres en los sonidos musicales.

tán contruidos de tal modo, que en cada uno de ellos la masa interior de aire resuena cuando se pone en presencia de la abertura mayor un cuerpo que produzca un sonido determinado (fig. 22.) Estos globos se

llaman resonadores. Gozan, por lo tanto, de la propiedad de reforzar los mismos sonidos con los cuales estaban acordes.

Esto sentado, Mr. Koenig ha construido un aparato formado de ocho resonadores entonados para la serie de los sonidos armónicos 1, 2, 3, 4, 5, 6, etc., por ejemplo, para los sonidos do_2 , do_3 , sol_3 , do_4 , mi_4 , sol_4 , etc. Los resonadores están fijos en un marco de fundicion, como representa la fig. 22. Cada uno comunica, por un tubo de cauchút que parte de la abertura pequeña, con una caja manométrica; los mecheros de gas de estas cajas están dispuestos paralelamente á un espejo giratorio, y por el estado de reposo ó agitacion de las llamas, se puede ver en la superficie del espejo cuáles son los resonadores que entran en vibracion. Cuando se hace vibrar un cuerpo sonoro, un diapason, por ejemplo, y se le pasa sucesivamente por delante de las aberturas de los resonadores, el sonido es reforzado en el momento que pasa por delante de un resonador que dé el sonido de la misma altura, y la llama del citado resonador aparece agitada en el espejo. Por consiguiente, para estudiar los armónicos de un sonido compuesto y su intensidad relativa, se pasará el cuerpo sonoro que lo produzca por enfrente de las aberturas de los resonadores, y se verán ciertas llamas agitadas, mientras que otras quedan en reposo. La agitacion más ó ménos viva indicará la intensidad comparada de los diversos armónicos.

Por este medio se puede comprobar el hecho de que una variacion en el timbre de un sonido de altura dada, resulta de la diferencia de los armónicos que lo componen y del predominio de tal ó cual de estos sonidos secundarios.

Helmholtz ha aplicado este procedimiento al estudio de los sonidos emitidos por la voz humana. Por medio de los resonadores ha demostrado la existencia de los armónicos, de los cuales, los seis ú ocho primeros son

claramente perceptibles, pero ofrecen variaciones de intensidad que dependen de las diversas posiciones de la boca, es decir, de las formas que la cavidad bucal afecta al pronunciar vocales diferentes. En definitiva, «la altura de los sonidos de mayor resonancia de la boca depende solamente de la vocal, para cuya emision la boca está dispuesta, y cambia de una manera notable aún en las pequeñas modificaciones del timbre de la vocal como lo prueban los diferentes dialectos de una misma lengua.» Cada vocal tiene, pues, un timbre especial que resulta del predominio de un sonido armónico particular y de altura absoluta, de suerte que, bajo este concepto, la voz humana emite sonidos que se distinguen esencialmente de los sonidos emitidos por los instrumentos de música.

Así, la vocal *a* tiene por sonido específico ó característico el *si bemol*. Cuando pronunciamos el sonido *a* á una altura cualquiera, el *si bemol* es el sonido dominante ó de más fuerte resonancia de la cavidad bucal.

Tomad el diapason que dé el *si bemol*₄ y ponedle mientras vibre delante de vuestra boca; pronunciad despues muy bajo, sin que uno mismo las oiga, las dos vocales *a*, *o*, repetidas veces. Observareis que el sonido del diapason es reforzado siempre que la boca hace el movimiento particular de la vocal *a*, al paso que no es modificado por la vocal *o*. El mismo fenómeno se manifestaria con dos vocales cualesquieras, si se emplease un diapason al unísono con el sonido armónico predominante de una de ellas.

Hé aquí, pues, una série de fenómenos inesplicables hasta el dia, cuya produccion está ligada á las leyes conocidas de las vibraciones de los cuerpos sonoros.

§ 7.—Interferencias sonoras.

Luz agregada á luz puede en ciertas circunstancias producir, no un aumento de intensidad luminosa, sino al contrario, una disminucion de brillo y áun á veces una oscuridad completa. Este fenómeno de apariencia tan paradógica se esplica, sin embargo, en el sistema de las ondulaciones de un modo claro y sencillo. Cuando dos ondas luminosas se encuentran, el movimiento de las moléculas etéreas que las constituye se agrega unas veces, otras se destruye en parte ó totalmente. Una misma molécula, obligada á hacer en el mismo instante dos oscilaciones opuestas, queda en reposo; ese reposo es la oscuridad. No hacemos más que recordar aquí muy sumariamente el fenómeno y la teoría de las interferencias luminosas, porque vamos á hablar de un fenómeno análogo, de la interferencia de las ondas sonoras.

Supongamos que dos conmociones sonoras, emanadas de dos focos diferentes, se propaguen en el mismo medio elástico, en el aire por ejemplo. Las vibraciones ú ondas aéreas que de ellas resultan coexistirán generalmente en el medio; es decir, que en cada punto y en cualquier instante, habrá superposicion de los pequeños movimientos que constituyen estas vibraciones. Las condensaciones y dilataciones sucesivas se compondrán unas veces agregándose, otras restándose, conforme á las leyes de la mecánica. Que los dos sonidos tengan la misma estension de ondulacion ó la misma altura é intensidad, y entonces podrá suceder que se destruyan: bastará para ello que las dos ondas tengan fases opuestas, que la semi-onda condensada del uno coincida exactamente con la semi-onda dilatada del otro. Destruyéndose los dos movimientos, el medio elástico quedará en reposo en todos los puntos en que se haya verificado esa destruccion

de movimiento. ¿Y qué resultará de aquí? El silencio. Hé aquí, pues, establecida esta paradoja de la acústica: *Un sonido agregado á otro sonido, puede dar silencio.*

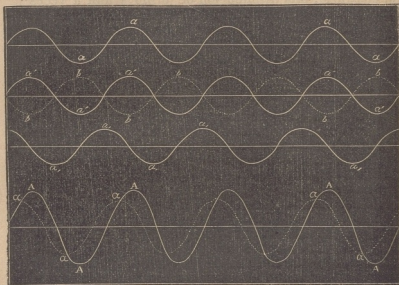


Fig. 23.—Interferencias de los sonidos musicales.

En la fig. 23 se ve la representación gráfica de varios casos de interferencia sonora. Las ondas $a a a...$ $b b b...$, se juntan y producen la onda $A A A$. Las ondas $a a a...$, $a_1 a_1 a_1$ se componen dando por onda resultante, la onda $a a a...$; las ondas opuestas $a a a...$ $b b b...$ se destruyen en todos los puntos; la onda resultante será nula. Hay interferencia completa de los sonidos.

Este es el fenómeno explicado por la teoría; ahora falta saber cómo se demuestran por la experiencia estas consecuencias singulares de los principios de la acústica. Para probar la interferencia de los sonidos, Wheatsthone empleó un tubo sonoro de dos ramas bifurcadas en forma de Y. Situando las aberturas sobre una placa vibrante que hacia resonar, obtenia á voluntad, ora un refuerzo del sonido producido ó bien el silencio del tubo. Habia refuerzo del sonido, es decir, entraba en vibracion la columna de aire del tubo, cuando las dos aberturas correspondian á dos vientres alternos de la placa, que tuvieran movimiento en el mismo sentido; el tubo quedaba en silencio si las dos aberturas se colocaban enfrente de dos vientres consecutivos ó dotados de movimientos de sentido contrario.

El sábio fisico inglés llevó á cabo igualmente un experimento que no dejaba sombra de duda, por medio de un aparato en el cual, los dos tubos, colocados paralelamente, estaban unidos por un tercero en ángulo recto con los primeros. En las estremidades de los tubos laterales habia dos aberturas, las que, en el caso de permanecer los tubos paralelos como hemos descrito, estarian una enfrente de otra. Dispuestas así las cosas, se interponia entre ellos una placa sonora en vibracion y de este modo la abertura de cada tubo se encontraba en presencia de una misma region de la placa, pero el uno por un lado y el otro por el lado opuesto, de suerte que los movimientos vibratorios comunicados á la columna de aire del uno eran exactamente opuestos á las que recibia la columna del otro. Propagándose ambas ondas á un tiempo y en sentido inverso, se destruian y el sonido de la placa se oia solo. Pero si se hacia girar á uno de los tubos de manera que quedase una sola abertura en presencia de la placa, la interferencia cesaba, el tubo entraba en vibracion y entonces el sonido de la placa era reforzado.

Tomemos ahora de Helmholtz otros dos ejemplos en que se produce el fenómeno de la interferencia, es decir, en que el sonido se destruye por el sonido.

«Supongamos, dice, dos tubos de órgano exactamente semejantes, templados al unisono y muy cerca el uno del otro. Cada uno de ellos, herido aisladamente por el aire, da un sonido intenso; pero si se hace llegar el viento á los dos á la par, el movimiento del aire es modificado de tal modo, que la corriente entra en uno de los tubos mientras que sale por el otro, sin que el oído de un observador lejano perciba el menor sonido; sólo se oye el rozamiento del aire. El diapason presenta igualmente fenómenos de interferencia, cuya causa está en que las dos ramas ejecutan sus movimientos en sentido contrario. Si se toca un diapason aproximándolo al oído y se le hace girar alrededor de su eje, se encuentran cuatro regiones en las cuales se oye distintamente el sonido; en las cuatro regiones intermedias, el sonido es inapreciable. Las cuatro primeras son aquellas en que una de las dos ramas, ó uno de los dos planos laterales del diapason, caen enfrente del oído. Las otras están situadas en posiciones intermedias, á 45° sobre los planos de las ramas.» (*Teoría fisiológica de la música.*) En este último caso, la interferencia se verifica en los puntos en que se anulen los movimientos en opuesta dirección de las dos ramas del diapason que obren á la vez sobre las mismas regiones del aire ambiente.

¿No debemos atribuir también á interferencias las desigualdades de intensidad que se observan en el sonido de una campana cuando repica? Unas veces la onda llega al oído con toda su fuerza, otras veces parece como anulada, y de esto proceden esas singulares alternativas que inducen creer que la campana se acerca ó se aleja. Sea el que fuere el modo de división del cuerpo sonoro en partes vibrantes y en líneas nodales, sucede evidentemente que las partes diametralmente

opuestas obran sobre el aire en el mismo instante en sentido contrario, lo mismo que las ramas de un diapasón, y nos parece muy plausible que la esplicacion de las variaciones de intensidad del sonido en este último caso, esté conforme con el que acabamos de recordar. Conviene añadir que como el badajo de la campana no da siempre en los mismos puntos, debe resultar de ello una mudanza de los vientres y en las líneas nodales de la campana.

§ 8.—Pulsaciones y sonidos resultantes.

Para que dos ondas sonoras puedan destruirse por su interferencia, es preciso que los sonidos que concurran estén exactamente al unisono uno de otro y posean la misma intensidad. Cuando no se cumple la primera de estas condiciones, el concurso de los dos sonidos produce tambien, en ciertos casos, fenómenos muy interesantes: tales son las *pulsaciones* y los *sonidos resultantes*.

A Sauveur se debe el descubrimiento, ó si se quiere el primer estudio científico de las pulsaciones.

Cuando dos sonidos que difieren poco en altura resuenan simultáneamente, además de la impresion particular de disonancia que resulta de su simultaneidad, el oído oye debilitaciones y refuerzos periódicos. A estos refuerzos del sonido es á lo que se da el nombre de pulsaciones. La esperiencia y el cálculo están conformes en afirmar que el número de pulsaciones, en un tiempo dado, depende á la vez de la altura absoluta de los dos sonidos y de su intervalo; en una palabra, el número de pulsaciones es igual á la diferencia de los números de vibraciones completas que los dos sonidos ejecutan en el tiempo dado.

Tomemos uno ó dos ejemplos. Consideremos el do grave del violonchelo, que efectúa 128 vibraciones en un segundo, y hagamos resonar al mismo tiempo el so-

nido, un poco inferior al do sostenido, que hace 155 vibraciones. El número de las pulsaciones será cinco por segundo. Si el intervalo fuera mayor, el del mismo do al re, el número de pulsaciones, igual á la diferencia de los números 128 y 144, sería igual á 10 por segundo. En la octava superior sería doble ó igual á 52; en la octava inferior, por el contrario, no sería mas que ocho. No habría más que una pulsación por segundo, si los dos sonidos estuviesen tan próximos el uno del otro que sólo hubiese una unidad de diferencia entre los números de vibraciones que efectuasen separadamente.

Las pulsaciones no son otra cosa que un fenómeno de interferencia. Sean dos ondas sonoras de periodos poco diferentes, de las cuales una efectúa ocho vibraciones completas, mientras que la otra, que corresponde á un sonido mas elevado, efectúa nueve en el mismo tiempo.

Partiendo de un punto en que el movimiento de las dos ondas sonoras sea opuesto, y en el cual, por consecuencia, se destruyan ó se neutralicen sus efectos, se van separando poco á poco; al cabo de cuatro vibraciones y media de la primera, la segunda habrá efectuado cuatro solamente, y entonces las fases, en vez de ser opuestas, serán idénticas; concurrirán los efectos de las ondas, y por tanto, su amplitud; la intensidad del sonido alcanzará un máximum que decrecerá en seguida en toda la mitad inversa del período comun. Así, en cada período de nueve vibraciones del primer sonido y de ocho del segundo, habrá una debilitación y un refuerzo y así sucesivamente. Segun eso, si en el trascurso de un segundo el número total de periodos semejantes es 16, es decir, si el primer sonido, el mas grave, hace 128 vibraciones completas, mientras que el otro hace 144, el número de refuerzos del sonido ó de pulsaciones, será 16, como así lo ha dado á conocer la ley enunciada mas arriba.

Las pulsaciones pueden hacerse visibles merced al

empleo de los métodos ópticos ó gráficos que sirven para registrar los movimientos vibratorios. El fonotógrafo de Scott es un aparato que llena perfectamente este objeto. Consiste en un paraboloide de revolución cortado en su foco, donde hay una membrana tensa que vibra por la influencia de las ondulaciones que recibe la superficie interior del paraboloide y cuya superficie las refleja. Un estilete fijo en la membrana traza sobre un cilindro que gira una curva sinuosa que representa las vibraciones aéreas transmitidas.

Se llega al mismo resultado por medio del método óptico de Lissajous, ó con las llamas manométricas y los espejos giratorios de Koenig.

Hemos dicho que las pulsaciones se producen principalmente cuando los sonidos emitidos son casi de la misma altura; pero son tanto mas sensibles cuanto mas se acercan los sonidos á ser sencillos, que es lo que acontece con los diapasones y los tubos cerrados; entonces, las pulsaciones están separadas por intervalos de silencio casi completo y tanto mas sensibles. En los instrumentos que producen sonidos compuestos, cuando á consecuencia de los fenómenos de interferencia los sonidos fundamentales se anulan, se oyen todavía resonar los armónicos, los cuales por sí mismos determinan pulsaciones. Un medio de obtener pulsaciones muy distintas, es el servirse de dos tubos cerrados que estén al unísono. En el instante en que los tubos hablan, se acerca el dedo á la embocadura de uno de ellos, lo cual produce un leve descenso de la altura del sonido, y al momento se oyen las pulsaciones. Helmholtz, dice acerca de este punto lo que sigue: «Cuando dos sonidos complejos ejecutan pulsaciones, sus armónicos las dan igualmente; á cada pulsacion del sonido fundamental, corresponden dos pulsaciones del segundo sonido elemental, tres del tercero, etc. Con armónicos de cierta intensidad, fácil seria engañarse al contar las pulsaciones, sobre todo, si los golpes del sonido funda-

mental son muy lentos, y separados por silencios de uno ó dos segundos; si en estas condiciones se quiere apreciar bien la altura de los sonidos que pulsan, es necesario recurrir á resonadores.»

La concurrencia de dos sonidos muy intensos, de alturas diferentes, da origen tambien á un fenómeno particular, á un sonido que difiere á la vez de cada cual de los sonidos primitivos y de sus armónicos. Para apreciar la altura de este sonido que se llama *sonido resultante*, se halla la diferencia de los números de vibraciones de los sonidos compuestos. Dos notas á la octava, cuyo intervalo mida la relacion de los números 1 y 2, producen un sonido representado por 1, es decir, al unísono del mas grave; dos notas á la quinta (relacion 2 á 3) dan el sonido resultante 1, octava grave del primer sonido; á la tercera mayor (relacion 4 á 5), producen el sonido 1, á la doble octava grave del primer sonido y así sucesivamente. Como se vé, la ley es semejante á la que da el número de pulsaciones, y de ella se habia deducido que los sonidos resultantes no eran otra cosa que el sonido engendrado por el concurso de pulsaciones bastante rápidas para producir en el oido la impresion de un sonido musical. Pero esta teoría no era exacta como lo ha probado el citado Helmholtz por el análisis y la esperiencia. En efecto, aparte de los sonidos resultantes diferenciales que se acaban de definir, dicho sábio ha probado que existen sonidos resultantes, cuya altura está medida por la suma de los números de vibraciones de los compuestos.

El primero que observó los sonidos resultantes fué un organista aleman, Sorge; pero el célebre músico italiano Tartini fué el primero que, en 1734, llamó la atencion de los sábios sobre este curioso fenómeno.

CAPITULO IX.

El oído y la voz.

§ 1 —El órgano del oído en el hombre.

Todos los fenómenos físicos se revelan al hombre por las impresiones que producen en sus órganos. Para él son en un principio sensaciones simples ó compuestas segun que concurren á su produccion uno ó varios sentidos. Así, por el intermedio del órgano de la vision, del ojo, es como percibimos la luz; por el tacto experimentamos la sensacion del calor: el esfuerzo que hacen nuestros músculos para levantar un cuerpo pesado, la vista de una piedra que cae, nos revelan la existencia de la gravedad; el oído, por último, nos dá la sensacion del sonido.

Mas para estudiar los fenómenos en sí mismos, para hallar las condiciones y las leyes de su produccion, importa distinguir en las sensaciones experimentadas, aquello que pertenece á nuestros órganos de lo que les es exterior. Con esta condicion únicamente la naturaleza propia de los fenómenos se hace accesible á nuestra inteligencia. A decir verdad, esta abstraccion nunca es completa, puesto que no hay ninguna observacion, ninguna esperiencia, que no necesite la presencia del hombre y la intervencion de uno ú otro de sus sentidos para comprobar los resultados. ¿Cómo, pues, conseguimos hacer abstraccion, por decirlo así, de nos-

otros mismos, en el estudio de los fenómenos físicos? Pues variando todo lo posible sus modos de producción, así como los métodos de que nos servimos para observarlos. Por el registro mutuo de unas sensaciones por otras, es como, en una palabra, la verdad puede abrirse camino y aparecérsenos los fenómenos en su independencia.

Merced al empleo de esos métodos, sabemos ahora lo que es el sonido, el cual consiste en un movimiento particular de las moléculas de los cuerpos elásticos, sólidos, líquidos ó gaseosos. Hemos comprobado la existencia de las vibraciones sonoras y estudiado sus leyes. Restanos ahora saber cómo se comunican á nuestros órganos, hasta el momento en que, formando, por decirlo así, parte integrante de nuestro sér, la conmocion que ellas comunican á nuestros nervios, se trasforma en una sensacion particular que es la sensacion del sonido. El oido es el aparato especial encargado, en el hombre y en todos los animales, de recoger las vibraciones sonoras y trasmitirlas al nervio auditivo. Veamos en pocas palabras la disposicion y el papel que juegan las diversas partes de este órgano.

Todo el mundo conoce el oido externo situado á los lados de la cabeza y compuesto de dos partes, el *pabellon de la oreja* y el *conducto auditivo*.

El pabellon A (fig. 24) consiste en una membrana cartilaginosa cuya forma varía segun los individuos, pero comunmente presenta el contorno de un óvalo irregular adelgazado en su parte inferior (fig. 24). En el centro, una cavidad redondeada, la *concha*, forma la entrada del conducto auditivo B, (especie de tubo sonoro) que termina á cierta profundidad en el punto mismo en que principia el llamado oido medio. Aquí, separada del conducto auditivo por una membrana muy delgada y delicadísima C, llamada *tímpano*, existe una especie de tambor D, conocido con el nombre de *caja del tímpano*. La membrana del tímpano está

bastante oblicuada sobre el eje del conducto auditivo, de suerte que su superficie es mucho mayor que la sección recta del conducto en el punto de su inserción. La caja

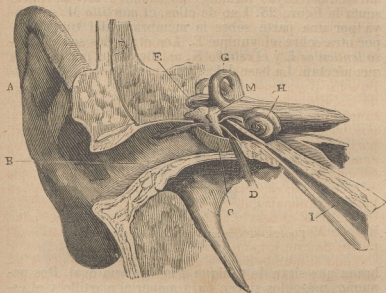


Fig. 24.—Oído humano; vista interior. A, pabellón.—B, conducto auditivo.—C, membrana del tímpano.—E, yunque.—M, martillo.—H, caracol.—G, conductos semi-circulares.—I, trompa de Eustaquio.

del tímpano está perforada por cuatro aberturas: dos en la pared de la caja que cae enfrente de la membrana; y como una es de forma circular y la otra elíptica, se las distingue con los nombres de *ventana redonda* y *ventana oval*. En la parte inferior del tímpano desemboca, por la tercera abertura, un canal I que pone en co-

municación el oído medio con el aire exterior por las fosas nasales. Por último, en la parte superior de la caja existe una cuarta abertura. En el interior del tímpano se vé una série de huesecillos que se llama *cadena de los huesecillos*, cuyas formas y posiciones relativas representa la figura 25. Uno de ellos, el *martillo* M, se apoya por una parte sobre la membrana del tímpano y por otra sobre el yunque E. Los otros dos son el *hueso lenticular* L y el *estribo* K, así llamados por la forma que afectan. La base del estribo está unida á la mem-

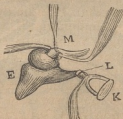


Fig. 25.—Pormenores de la caja del tímpano.

brana que sirve de tabique á la ventana oval. Dos pequeños músculos sirven para mover el martillo y el estribo y para apoyarlos con mas ó ménos fuerza contra las membranas próximas.

Detrás de la caja del tímpano se halla el *oído interno* que parece la parte más sensible del órgano auditivo. Está protegido por las partes mas duras del hueso temporal, por las que los anatómicos llaman el *peñasco*. Tres cavidades especiales componen el oído interno. Tales son: el *vestíbulo* en medio; los *conductos semi-circulares*, G, en la parte superior y el *cáracol*, H, en la parte inferior. Su conjunto forma el *laberinto* cuyo interior está tapizado, en toda su estension, por una membrana que baña un líquido gelatinoso. A este líquido van á terminar

las ramificaciones del nervio auditivo que penetra en el laberinto por un canal óseo llamado *conducto auditivo interno*.

Tal es la descripción de las principales partes que constituyen el órgano del oído en el hombre. En la serie animal descendente se vé desaparecer por grados el oído externo y el oído medio; pero á proporción que el órgano se simplifica, las partes restantes están mas desarrolladas. Fáltanos ahora decir el papel que juegan las diferentes partes del oído.

Evidentemente el pabellon de la oreja tiene por objeto reunir y reflejar las ondas sonoras al interior del conducto auditivo externo. Prueba de ello es que los animales que tienen el pabellon móvil, vuelven dicha abertura del lado de donde vienen los sonidos. El hombre no posee esta facultad y para obtener el mismo resultado tiene que volver la cabeza de manera, que el orificio del pabellon caiga en la dirección de donde proceden los sonidos. Se ha observado que los individuos que tienen el pabellon muy separado del cráneo, son los que gozan de oído mas fino y todo el mundo sabe que para oír mejor basta agrandar artificialmente la superficie reflejante del oído externo, valiéndose de el hueco de la mano. El conducto auditivo externo trasmite, reforzándolas, las vibraciones sonoras á la membrana del tímpano, y en seguida por la cadena de huesecillos al oído interno (1). La trompa de Eustaquio conduce el aire exterior á la caja del tímpano, y de este modo mantiene por la parte interior de la membrana, la misma presión que en el aire exterior, en la cara que

(1) Las partes sólidas de la cabeza, los dientes, transmiten directamente al oído interno las vibraciones sonoras. Así es que, si se suspende un timbre con un hilo sujeto entre los dientes, habiéndose tapado previamente los oídos, se oye un sonido grave transmitido por el hilo, los dientes y los huesos temporales hasta el oído interno. Los sordos, cuya enfermedad solo es debida á una conformación viciosa de los órganos exteriores, pueden oír de esta manera. Se citaba un español sordo que oía los sonidos de una guitarra poniendo entre sus dientes el mástil del instrumento. (Ingrassias, según C. Broussais.)

corresponde al conducto auditivo externo. En cuanto á los huesecillos, además de su misión de transmitir las vibraciones al oído interno más fácil y energicamente que lo haría un cuerpo gaseoso, sirven también, según Savart y Müller, para moderar el efecto de los sonidos demasiado intensos; y sobre todo, para tender la membrana del tímpano y la de la ventana oval y hacerlas de este modo más sensibles al movimiento vibratorio. Por esta razón, según Müller, una varilla colocada entre dos membranas aumenta la intensidad de la transmisión sonora. De ahí la diferencia que existe, bajo el punto de vista de la sensación, entre los modos de audición que el lenguaje caracteriza con estas palabras: *escuchar*, *oir*. La persona que solo oye experimenta una sensación menos fuerte, porque no hace intervenir la acción de la voluntad. Por el contrario, desde el momento en que escucha, manda instintivamente obrar á los músculos del martillo y del estribo; las membranas se ponen tensas y el sonido parece más claro é intenso. Esta opinión de Bichat ha sido adoptada por los fisiólogos y los físicos (1). Parece que el grado de tensión de la membrana del tímpano varía asimismo con el grado de agudez ó gravedad de los sonidos que se han de percibir: para los sonidos agudos, la membrana

(1) ¿Está exenta de objeciones? ¿Se ha probado por experimentos que la distinción, tan perfectamente establecida de hecho entre los dos estados fisiológicos sucesivos por los cuales pasa una persona que sólo oye y después escucha, es causada únicamente por el paso de una tensión menos fuerte á una tensión más fuerte de su membrana del tímpano? En todo caso, la intervención de la voluntad puede hacer pasar el órgano del oído de un estado casi pasivo á una actividad más intensa, determinar en ciertos casos una elección entre las sensaciones auditivas. Todo el mundo, en efecto, ha observado que, en medio del murmullo confuso de muchas conversaciones que se oyen á la vez sin escuchar ninguna, el oído puede, por una atención voluntaria, seguir una de las conversaciones parciales que oye entonces distintamente, mientras que las otras voces, sin dejar por eso de afectarle, continúan siendo *oidas*, pero no son *escuchadas*. Evidentemente no es sobre la membrana del tímpano ó al menos en ella sola, sobre la que la voluntad ha podido obrar para producir ese resultado, puesto que entonces la membrana, más tensa y sensible, lo sería lo mismo para tal ó cual voz. Las fibras de Corti, de las que hablaremos después, ¿no servirán para llevar á cabo tal distribución?

na está más tensa que para percibir sonidos graves.

Antes hemos dicho que el oído interno es la parte esencial del órgano del oído, y en efecto, está probado por la observación que la membrana del tímpano y los huesecillos pueden perderse sin que por ello sobrevenga la sordera. Para que así sea no han de estar deformadas las dos ventanas del tímpano, porque entonces, derramándose los líquidos que bañan el nervio auditivo, quedan secos los órganos del oído interno y pierden su sensibilidad, como asimismo las ramificaciones del nervio auditivo. En este caso hay sordera absoluta. El nervio auditivo distribuye sus ramillos en dos grupos, uno de los cuales, el que penetra en el caracol, se divide en una multitud de hilillos muy sueltos que reciben la denominación de *fibras de Corti*, del nombre del sabio micrógrafo que las descubrió. Según Helmholtz, estas fibras, cuya longitud varía y son en número de más de tres mil, vibran probablemente cada una al unísono de un sonido particular, de modo que forman una serie regular análoga a la gama musical. Suponiendo que doscientas de estas sean afectadas por los sonidos situados fuera de los límites musicales, «quedan, dice, dos mil ochocientas fibras para las siete octavas de los instrumentos de música, es decir, cuatrocientas para cada octava, treinta y tres para cada semi-tono, bastante en todo caso para explicar la distinción de las fracciones de semi-tono en el límite en que ella es posible.» Si se admite este papel de las fibras de Corti, compréndese entonces de qué manera se trasmite hasta el nacimiento de los nervios el mecanismo de las vibraciones sonoras. Sencillas ó compuestas, estas vibraciones llegan por el conducto auditivo hasta la membrana del tímpano; transmitense en seguida por la caja de este, por la cadena de los huesecillos y las membranas de las dos ventanas hasta el oído interno. Al llegar á este punto, de vibraciones aéreas, se trasforman en vibraciones de

cuerpos líquidos y sólidos, hasta las fibras de Corti. En éstas, por último, se hace el reparto y cada vibración sencilla de altura musical dada, encuentra una fibra para recibirla. De este modo se explicaría también la descomposición de un sonido compuesto y sus armónicos, como asimismo la sensación simultánea del sonido fundamental y del armónico predominante, es decir, del timbre.

Como se vé la teoría del oído presenta todavía oscuridades. A los fisiólogos mejor que á los físicos pertenece el disiparlas por completo (1). Lo admirable en esta organización de uno de los sentidos mas útiles á la conservación del individuo, para sus relaciones con sus semejantes y con el mundo exterior, y que es el manantial de los goces mas deliciosos y profundos, es su maravillosa facultad de percibir una multitud, por decirlo así, indefinida de sonidos. Aparte de esto, la coexistencia de las vibraciones en el aire y en los medios propios para propagar el sonido, explica esta propiedad del oído, el cual no hace mas que transmitir á los nervios, y de éstos al cerebro, las mil modificaciones de los medios elásticos en que nos hallamos sumergidos.

§ 2.—La voz humana.

Terminemos el estudio de los fenómenos del sonido por una sumaria descripción del órgano de la voz en el hombre, de ese instrumento natural de música por cuyo medio nos comunicamos nuestras ideas en sus

(1) El órgano del oído está conformado casi de la misma manera en todos los mamíferos, con la diferencia de que unas partes están mas ó menos desarrolladas; en las aves, el aparato auditivo está siempre construido sobre el mismo plano, aunque es notablemente mas sencillo; no hay pabellon ni caracol propiamente dicho. Todavía es mas sencillo en los reptiles y en los peces. No se conoce el órgano del oído en los insectos, por mas que la función existe, pues se sabe que estos animales saben producir sonidos por medio de los cuales se llaman cuando están separados unos de otros. En fin, los moluscos, excepto los cefalópodos superiores, no poseen sentido auditivo.

matices mas íntimos y delicados, instrumento tan sensible y completo, que los instrumentos artificiales mas perfeccionados no consiguen esa diversidad de matices, y timbres que permite á la voz humana expresar las pasiones y sentimientos mas variados.

El órgano de la voz no es otra cosa que un instrumento de viento, es decir, un aparato en que los sonidos son producidos por las vibraciones más ó ménos rápidas del aire á su paso por una abertura de forma especial. El aire llega de los pulmones por un tubo ó canal anular N llamado *traquearteria*; de ésta penetra en la *laringe* M en la cual entra en vibracion y produce los sonidos de la voz, y despues á la *faringe*. El sonido llega entonces á las cavidades de las fosas nasales y de la boca, las cuales juegan el papel de cajas reforzantes y dan al sonido un timbre especial.

La fig. 26 muestra la conformacion interior de la laringe. Es, como se vé, una especie de caja cartilaginosa terminada interiormente por la tráquearteria N y en la parte superior por el *hueso hioides*, en forma de herradura. Una especie de válvula movible, la epiglotis E, puede al bajarse cerrar la laringe en su parte superior, impidiendo así que los alimentos penetren por ella, lo cual produciria la extincion de la voz ó la sofocacion. Debajo de la epiglotis está la *glotis* K, abertura comprendida entre dos repliegues que dejan entre sí una cavidad que se llama *ventrículo de la glotis*. Estos repliegues son, por la parte inferior de la glotis, las *cuerdas vocales* I, (así llamadas porque al principio se creyó que ellas formaban los sonidos al vibrar por la influencia del aire, cual las cuerdas sonoras frotadas por un arco de violin,) y por la parte superior, los *ligamentos superiores* H.

Por los experimentos de los fisiólogos se ha probado que las cuerdas vocales vibran como las lengüetas batientes de los tubos sonoros y que los sonidos así produ-

cidos son más ó menos agudos, conforme la tensión más ó menos fuerte de las cuerdas vocales modifique las di-

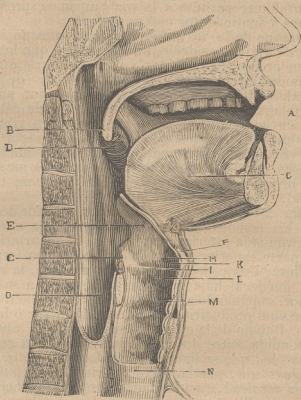


Fig. 26.—Órgano de la voz en el hombre; caja interior de la laringe.
E, epiglotis.—H, ligamentos superiores.—I, cuerdas vocales.—K, glotis.
—N, traquearteria.

mensionen de la abertura de la glotis. Cuando el sonido llega á la boca su altura está determinada; no sufre en

esta otras modificaciones que las que constituyen su timbre ó que forman la voz articulada. Los movimientos de la faringe, de la lengua y de los labios sirven para producir esos diversos cambios, de los cuales no podemos hablar aquí.

Diremos solamente que las voces de hombre, que difieren de las voces de mujer y de niño por su gravedad, deben su carácter á las dimensiones mayores de la laringe y de la abertura de la glotis. El desarrollo rápido de este órgano en los jóvenes, en la edad de la pubertad, es la causa de la trasformacion que se observa entonces en la voz de los mismos.

FIN.

INDICE.

	PÁGS.
INTRODUCCION.	V
CAPÍTULO PRIMERO.—PRODUCCION Y PROPAGACION DEL SONIDO.—§ 1.—Los fenómenos del sonido en la naturaleza.	
§ 2.—El sonido es un fenómeno á la vez exterior é interior.	9
§ 3.—Diferentes modos de produccion del sonido.	13
§ 4.—Los cuerpos sonoros.	19
§ 5.—El sonido no se propaga en el vacío.	21
§ 6.—Propagacion del sonido en los sólidos, líquidos y gases.. . . .	25
CAP. II.—LA VELOCIDAD DEL SONIDO.—§ 1.—Velocidad del sonido en el aire.	
§ 2.—Condiciones que influyen en la velocidad del sonido.	30
§ 3.—Recientes esperimentos sobre la velocidad del sonido.	37
§ 4.—Medicion de distancias por la velocidad del sonido en el aire.	41
§ 5.—Velocidad del sonido en los líquidos.	48
§ 6.—Velocidad del sonido en los sólidos.	53
CAP. III.—REFLEXION Y REFRACCION SONORAS.—§ 1.—Ecos y resonancias.—Eco sencillo y eco múltiple; explicacion de estos fenómenos.—Leyes de la reflexion del sonido; demostracion esperimental.—Fenómenos de reflexion en la superficie de las bóvedas elípticas.—Esperimentos que prueban la refraccion de los rayos sonoros.	
§ 2.—Ecos notables.	61
§ 3.—Leyes de la reflexion del sonido.	64
§ 4.—Refraccion del sonido.	68
CAP. IV.—PROPIEDADES DISTINTIVAS DE LOS SONIDOS.—	
§ 1.—Caractéres propios de los diferentes sonidos.	71
§ 2.—Intensidad de los sonidos.	74
§ 3.—Variaciones en la intensidad del sonido con la altitud, el dia y la noche.	76
	81

	PÁGS.
§ 4.—Del alcance de los sonidos.	88
§ 5.—Sobre la transparencia y la opacidad acústicas de la atmósfera.	90
CAP. V.—LAS VIBRACIONES SONORAS.—§ 1.—Vibraciones de los sólidos, líquidos y gases.	96
§ 2.—La altura de los sonidos está en razón del número de vibraciones sonoras.	104
§ 3.—Las ondas sonoras aéreas.	106
§ 4.—Superposición de las ondas sonoras.	110
§ 5.—Distinciones entre los sonidos musicales y los ruidos.	112
§ 6.—Piedras musicales; fenómeno del Gebel-Nagus; estatua de Menon.	117
CAP. VI.—LAS VIBRACIONES SONORAS.—§ 1.—Vibraciones pendulares.	122
§ 2.—Llamas sonoras ó cantantes. Llamas sensibles.	132
§ 3.—Llamas sensibles.	137
CAP. VII.—LEYES DE LAS VIBRACIONES SONORAS EN LOS TUBOS, CUERDAS Y PLACAS.—§ 1.—Vibraciones de las cuerdas elásticas.	142
§ 2.—Leyes de las vibraciones en los tubos sonoros.	149
§ 3.—Vibraciones sonoras de las varillas y de las placas.	153
CAP. VIII.—ACÚSTICA MUSICAL.—§ 1.—De los sonidos empleados en música; escala musical.	157
§ 2.—La gama.	160
§ 3.—De los principios constitutivos de la gama.—Gama de los físicos y gama pitagórica.	169
§ 4.—Estudio óptico de los intervalos musicales.	172
§ 5.—Timbre de los sonidos musicales.	182
§ 6.—Influencia de los sonidos armónicos sobre el timbre.	185
§ 7.—Interferencias sonoras.	195
§ 8.—Pulsaciones y sonidos resultantes.	199
CAP. IX.—EL OIDO Y LA VOZ.—§ 1.—El órgano del oído en el hombre.	203
§ 2.—La voz humana.	210