

Quedaba por tanto disponible una fuerza ascensional de 10,150 kilogramos. Calculando en 4,000 kilogramos el peso de los 50 viajeros que podían caber en la barquilla, resulta que quedaba todavía un excedente de fuerza considerable. El henchimiento con hidrógeno puro de aquel coloso aerostático requirió solamente tres días, habiéndose consumido 180,000 kilogramos de ácido sulfúrico y cerca de 9,000 de limaduras de hierro. Dos máquinas de 300 caballos hacían funcionar la cabria en la cual se enrollaba y desenrollaba el cable á cada ascensión.

Las cifras que acabamos de estampar permitirán juzgar del enorme gasto que ha causado la construcción de la instalación de semejante globo, que no tenía otro objeto aparente sino el de satisfacer la curiosidad de los numerosos forasteros atraídos á París por la Exposición y excitar su entusiasmo por el arte aeronáutico. Pero de esta empresa se ha reportado otra utilidad, la cual consiste, según hemos dicho antes, en los progresos de toda clase realizados en la construcción de los globos y en los mil detalles de su acondicionamiento.

Es de desear que, con objeto de hacer observaciones científicas continuadas y metódicas, se construyan estaciones aerostáticas de globos cautivos ó fijos, y que se confíe su dirección á personas que reunan á su habilidad técnica el saber. Mucho tiempo hace que se ha formulado este deseo: ¿cuándo se pondrá en ejecución?



CHLADNI

EL SONIDO

PRIMERA PARTE

LOS FENÓMENOS Y LAS LEYES DEL SONIDO

Los fenómenos estudiados en la primera parte de este tomo se hacen patentes en todos los cuerpos (llamados por esta razón *ponderables*) de un modo continuo. Y en efecto, ninguna partícula de materia se exime, ni en el tiempo ni en el espacio, de la influencia de la fuerza de gravitación, ó, por lo que más particularmente atañe al globo terráqueo, de la influencia de la gravedad.

Los fenómenos que vamos á describir en esta segunda rama de la Física no tienen ya ese carácter de universalidad ó de permanencia: los fenómenos sonoros son puramente accidentales. No ocurren si las moléculas de los cuerpos no se conmueven de una manera especial, que en rigor no exige la intervención de ninguna fuerza *sui generis*,

tampoco sobrevienen si, además de esto, la conmoción que los constituye no llega á comunicarse eficazmente á uno de nuestros sentidos, el del oído. Con todo, hanse puesto en evidencia las leyes de estos movimientos moleculares y de su propagación por medio de tales métodos de observación que un sordo podría comprobarlos casi todos, si no tan fácil, al menos tan seguramente como un físico que estuviese en pleno goce de sus facultades auditivas. Sin embargo, esta observación no es cierta sino en cuanto se aplica á la parte objetiva ó puramente física de los fenómenos, y el cuadro que vamos á trazar de los del sonido en la Naturaleza sería incomprensible para el que estuviera privado desde la cuna del sentido del oído.

CAPÍTULO PRIMERO

PRODUCCIÓN Y PROPAGACIÓN DEL SONIDO

I

LOS FENÓMENOS DEL SONIDO EN LA NATURALEZA

La carencia de todo sonido, de todo ruido, en una palabra, el silencio absoluto es para nosotros sinónimo de inmovilidad y de muerte. Estamos tan acostumbrados á oír, aun cuando sólo sea el ruido que hacemos nosotros mismos, que difícilmente podemos concebir la idea de un mundo completamente silencioso, como parece ser el de la Luna.

Los fenómenos del sonido se manifiestan en la Tierra en todos los instantes de la duración. Es indudable que por este concepto media una gran diferencia entre nuestras ciudades populosas con sus mil ruidos que nos atruenan constantemente los oídos, y el murmullo suave y confuso que se percibe en las campiñas. ¡Qué contraste también entre la calma de las regiones alpestres ó polares en que desaparece hasta el menor asomo de vida, y las estruendosas playas del Océano! Allí tan sólo rompe el silencio el sordo fragor de los aludes, el crujido de los hielos ó el áspero mugido de los vendavales. El estampido prolongado del trueno, tan sonoro en las llanuras, no se percibe en las crestas de las montañas elevadas; en lugar de esa detonación terrible, que por lo regular caracteriza á las descargas eléctricas y cuya repercusión multiplica su duración, es un golpe seco, semejante á la explosión de un arma de fuego. Por el contrario, á orillas del mar, ensordece el oído el continuo estrépito del oleaje que se estrella sobre las rocas, y el bramido sordo, uniforme, que con diapasón bajo y solemne acompaña á las notas agudas producidas por las olas al chocar con la arena y las guijas: cuando estalla en temporal, este mugido sordo se convierte en espantosa discordancia.

En medio de los campos, en los bosques, la sensación es totalmente distinta. Oyese un susurro vago formado por la reunión de mil sonidos de variedad infinita; ora es la hierba que tiembla á impulsos de la brisa, ó los insectos que vuelan ó se arrastran, ó las aves cuya voz se pierde en el espacio; ya es el ramaje de los árboles que se agita al hálito de leve céfiro, ó se encorva y se troncha al embate del proceloso viento. De todo esto resulta una armonía, unas veces alegre, otras grave y otras terrible (1), muy dife-

(1) Al describir M. Candéze las luchas que traban las fieras tan luego como se ha puesto el Sol y van en busca de una presa, habla del "ruido súbito, terrorífico, indefinible que, en las regiones ecuatoriales, estalla de pronto en lo profundo de las selvas."

rente del bullicio atronador que reina en las calles populosas de las grandes ciudades. Las corrientes, los ríos, los riachuelos y los torrentes unen sus notas á este concierto; y en los terrenos accidentados domina el sonoro rumor de las cascadas al despeñarse, y á veces también el fragoroso estruendo de los aludes que lo destruyen y sepultan todo á su paso.

Pero de todos los ruidos naturales, los más continuos y violentos son los que nacen y se propagan en el seno de la atmósfera; las masas gaseosas, arrastradas por un movimiento irresistible que cualquier diferencia de temperatura ó de densidad basta para engendrar, chocan con todos los obstáculos que les oponen las desigualdades del terreno, las montañas, las rocas, los bosques, los árboles aislados, y tan pronto silban como braman furiosamente. Y si la electricidad se mezcla con ellos, el estrépito es mucho mayor: entonces los terroríficos estampidos del trueno se sobreponen á todos los demás ruidos y los apagan.

Las explosiones de los volcanes y los terremotos son las únicas que rivalizan en pujanza con esa formidable voz de la Naturaleza. Al ocurrir la catástrofe que destruyó á Riobamba en el año de 1797, resonó una inmensa detonación en el valle donde se asientan las ciudades de Quito é Ibarra, siendo lo más particular del caso que esta detonación no se oyó en el mismo lugar del desastre. El levantamiento ó aparición del Jorullo en el año de 1759 fué precedido de mugidos subterráneos que duraron dos meses enteros (Humboldt).

Para completar este cuadro de los sonidos que se producen naturalmente en el suelo y en la atmósfera, réstanos hacer mención de las detonaciones que acompañan á la caída de los meteoros cósmicos, como aerolitos y bólidos. Por lo regular estas explosiones ocurren á grandes alturas, y las personas que de ellas han sido testigos las comparan á descargas de artillería, ó bien al ruido que producen los carros muy cargados al chocar sus ruedas con las desigualdades del empedrado, ó ya también al prolongado fragor del trueno.

Pero los fenómenos del sonido que más nos interesan son los que el hombre y los animales producen con el auxilio de órganos especiales: la voz humana, intérprete indispensable de nuestras ideas, de nuestros sentimientos (1); los gritos, los cantos de los animales, que expresan de un modo imperfecto y tosco las variadas impresiones que sienten, sus necesidades, sus alegrías, sus dolores. El hombre ha creado un arte, el más poderoso de todos, el de la música, para expresar lo que el lenguaje articulado no puede traducir; y para realzar aún más los dones de la Naturaleza, ha sabido multiplicar con el auxilio de variadísimos instrumentos los recursos de su propia voz. Los sonidos producidos con este objeto especial tienen propiedades físicas características que los distinguen de los ruidos irregulares, discontinuos, indefinibles, que hemos descrito hasta aquí; esos sonidos forman una serie ordenada, regular, aun cuando se prescindiera de la composición que, en una obra musical, hace que se sucedan en un orden inteligente con

(1) "Los fenómenos sonoros adquieren grande importancia, considerados desde el punto de vista de las relaciones del hombre con el mundo ambiente. Por medio del sonido se pone el hombre en comunicación regular y seguida con sus semejantes. La *palabra* es el atributo más elevado, el más poderoso medio de acción del hombre; el estudio de la acústica nos permitirá penetrar el mecanismo mediante el cual llega el hombre á dar á su pensamiento una forma precisa, perceptible, á traducirlo en palabras. Este estudio nos demostrará también cómo y por qué mecanismo llega el hombre á apreciar, en sus infinitas variedades, las palabras pronunciadas por sus semejantes, á conocer sus pensamientos." (Gavarret, *Fenómenos físicos de la fonación y de la audición*)

arreglo á un ritmo marcado, y los combina en melodiosos acordes. Esta serie constituye los sonidos musicales, cuyo estudio es el objeto principal de la Acústica.

Cierto es que las necesidades del trabajo y de la industria humana han obligado al hombre á producir otros muchos ruidos que no se recomiendan ni por la melodía ni por la armonía, pero que en su mayoría son inseparables de los trabajos que los engendran, y participan, por decirlo así, de su carácter de utilidad. En las fábricas y talleres, en las fundiciones, el ruido de martillos, sierras y herramientas de toda clase, y de las máquinas de vapor, no cesa á menudo ni de día ni de noche, constituyendo un concierto nada armonioso y sin duda alguna desagradable para los oídos menos delicados. Pero ¿qué remedio? Para nosotros es también una música preferible de todo punto á la de la fusilería y del cañón en los campos de batalla, así como la lucha en el terreno del trabajo y de la ciencia vale en nuestro concepto mucho más que las decisiones brutales de la fuerza.

Todos los fenómenos que acabamos de mencionar, por variados que parezcan, se refieren á un mismo modo de movimiento, al movimiento vibratorio, y afectan particularmente al órgano del oído, produciendo en nosotros la sensación del sonido. Ahora pasaremos á estudiar la naturaleza de las vibraciones sonoras, á indicar las relaciones que existen entre estas vibraciones y las sensaciones auditivas, y por último, á formular las leyes á que unas y otras obedecen.

II

EL SONIDO ES UN FENÓMENO EXTERIOR É INTERIOR Á LA VEZ

El sonido es una sensación percibida por medio del órgano del oído, y cuya causa exterior consiste en cierto movimiento molecular de los cuerpos.

La producción del sonido supone, pues, necesariamente, por una parte un fenómeno exterior, y por otra un objeto sensible que percibe su impresión. El fenómeno exterior es el cuerpo sonoro en acción, el origen ó fuente del sonido, que en condiciones y circunstancias particulares ocasiona fuera de nosotros un movimiento especial; movimiento que, propagándose desde el cuerpo sonoro al oído, excita nuestros nervios, produciendo así la sensación auditiva. Naturalmente el sonido se extingue cuando desaparece una ú otra de las condiciones que lo han ocasionado. Si el cuerpo sonoro está en reposo, no hay sonido; no lo hay si el nervio auditivo está paralizado ó inerte, y por último, tampoco lo hay cuando no existe algún intermediario material que sirva de medio de comunicación entre el oído y el cuerpo agitado.

Partiendo, pues, de estas consideraciones se podría dividir la *Acústica* ó ciencia del sonido en dos partes distintas: en la una se estudiaría el sonido con arreglo á los fenómenos exteriores que lo producen, prescindiendo de la acción que ejercen en nuestros sentidos, ó si en este estudio se hiciese intervenir la sensación, sería únicamente como medio, como procedimiento de investigación: esta primera parte de la Acústica podría llamarse *Acústica física*. En la otra parte, que sería la *Acústica fisiológica*, se trataría de las leyes de las sensaciones auditivas, es decir, del sonido al llegar al oído, de las modificaciones que la conmoción sonora produce en este órgano, del cometido de las distintas partes del mismo, y finalmente, de la comparación de las sensaciones de por sí, que más particularmente se tomasen en consideración. Se podría caracterizar estas dos ramas de la Acústica diciendo que la *Acústica física* tiene por objeto el *sonido fuera*

del hombre, y la *fisiológica*, el *sonido en el hombre* (1). También podría hacerse la misma distinción, planteando, por ejemplo, las dos cuestiones siguientes:

Al sonar una campana, ¿qué sucede en la materia que la constituye y en el aire que nos separa de ella? ¿Qué ocurre en nuestro oído y en nosotros mismos?

Los fenómenos de la luz y del calor dan lugar á una distinción semejante: una cosa es el movimiento ondulatorio que emana del foco incandescente, y otra el efecto perceptible que dicho movimiento produce en nuestros órganos. Si impresiona la retina, la sensación es luz; y es calor cuando sólo afecta los nervios diseminados por la superficie epidérmica. Además, hay ondas que siendo impotentes para impresionar la retina, por no ser bastante rápidas las vibraciones que las engendran, afectan sin embargo el sentido del tacto; por el contrario, si su rapidez traspasa cierto límite, el ojo no las ve, pero su acción cobra otra forma y produce fenómenos químicos en los cuerpos vivos. Por este concepto, el sonido tiene también una ostensible analogía con el movimiento ondulatorio del medio etéreo, y en efecto, ya tendremos ocasión de ver que el movimiento que lo produce no da en realidad origen á una sensación auditiva sino dentro de ciertos límites de rapidez ó de intensidad. Si la conmoción sonora es demasiado lenta, no puede excitar el órgano del oído; si demasiado rápida, traspasa igualmente en sentido contrario el límite de nuestra impresionabilidad (2).

Empecemos por enumerar los varios modos prácticos que nos enseñan cómo puede producirse el sonido. En seguida veremos cómo se propaga éste de los cuerpos sonoros, á través de los gases, de los líquidos y aun de los sólidos, hasta nuestro oído.

III

DIFERENTES MODOS DE PRODUCIRSE EL SONIDO

La *percusión*, ó sea el choque de dos cuerpos entre sí, es uno de los modos más comunes de producción del sonido. El martillo que da golpes sobre el yunque, el badajo que hace sonar las campanas ó los timbres, los palillos del tambor, los platillos, y otros cien ejemplos que el lector recordará fácilmente, son otros tantos casos particulares en que el sonido resulta del choque de dos cuerpos sólidos. De este modo se pueden producir los ruidos y sonidos más variados, pero ya veremos que esta variedad depende á la vez de la forma y de la naturaleza del cuerpo sonoro, y del modo cómo el rumor se

(1) Helmholtz se expresa del modo siguiente acerca de este asunto en su *Teoría fisiológica de la música*:

"Hasta ahora, dice, no se ha tratado detalladamente de la ciencia de los sonidos sino en cuanto se refiere á su parte física, es decir, se ha estudiado los movimientos de los cuerpos sonoros, sólidos, líquidos y gaseosos cuando llevan al oído algún sonido perceptible. Esta acústica física no es en esencia otra cosa más que una subdivisión de la teoría de los movimientos de los cuerpos elásticos.... Los tratados de física suelen contener un capítulo aparte sobre la acústica, separado de la teoría de la elasticidad, á la cual debería pertenecer por la naturaleza de las cosas, pero que sólo tiene su razón de ser en las circunstancias de que el oído ha sido origen de descubrimientos y métodos de observación de índole particular. Junto á la acústica física, hay otra fisiológica, cuyo objeto es el estudio de los fenómenos que ocurren en el oído mismo., También se podría establecer una tercera parte de la ciencia de los sonidos, que vendría á ser la consecuencia de las dos primeras y llamarse *Acústica musical*. La obra del sabio alemán, de la que hemos copiado la nota precedente, trata precisamente de esta parte.

(2) Al estudiar la gravedad, no hemos tenido ocasión de hacer una distinción de este género, pues tan sólo hemos encontrado fenómenos de equilibrio, de movimiento y también de presión, cuya manifestación patente no necesita un órgano especial de percepción, como el oído lo es para los sonidos y ruidos, y la vista para la luz y los colores.

propaga hasta nuestros oídos. En el experimento del martillo de agua (pág. 45) el ruido procede del choque de una masa líquida contra un cuerpo sólido.

El roce ó frotamiento es otro modo de producción del sonido: merced á él se hacen resonar las cuerdas tirantes con un arco cuyas crines están untadas de una resina llamada colofonia; de este modo se producen los sonidos del violín y de otros instrumentos parecidos, y también los de las campanas de vidrio ó de metal. En este caso, el frotamiento es transversal. Pero también se arrancan sonidos de las cuerdas ó de las varillas metálicas mediante un frotamiento longitudinal. Cuando se arrastra un objeto por el suelo, por las piedras, por la madera, etc., resulta un sonido producido por el roce; la rueda de un carruaje que corre por el empedrado ocasiona un ruido que se debe en gran parte al roce, pero en el que también entra por algo la percusión.

La pulsación de una cuerda tirante, como las de la guitarra, arpa, mandolina y otros instrumentos, engendra un sonido que participa á la vez de la percusión y del roce.

Los cuerpos sólidos y líquidos puestos en contacto mediante una ú otro, producen sonidos ó ruidos; estos mismos movimientos los originan también en los líquidos, sin necesidad de que medie ningún cuerpo sólido; tal es, por ejemplo, el murmullo que resuena cuando caen gotas de lluvia en la superficie del agua de un estanque ó de un río.

En breve veremos más detalladamente que el sonido resulta en los gases de una serie de condensaciones y dilataciones alternativas; pero estos movimientos pueden proceder de la percusión y del roce. Así por ejemplo, el aire silba cuando se le da un impulso violento con una varilla ó un látigo, y el viento produce sonidos intensos cuando sopla contra los árboles, las casas y cualesquiera otros obstáculos sólidos. Por lo que hace al ruido del viento que penetra en las chimeneas, tiene por causa una especie de conmoción del aire que estudiaremos al tratar de los sonidos producidos por los gases en los tubos. Este sonido es el que emiten los instrumentos de música conocidos con el nombre de *instrumentos de viento*, y también el de la voz humana y los gritos de los animales.

Las explosiones del gas, el estallido que acompaña á la chispa eléctrica, los estampidos del trueno, son otros tantos sonidos engendrados por bruscos cambios de volumen, por dilataciones y contracciones sucesivas de las masas gaseosas.

Uno de los modos más curiosos de producirse el sonido es el que resulta del contacto de dos cuerpos sólidos de temperaturas diferentes. Schwartz, inspector de una fundición sajona, fué el que por primera vez llamó la atención en 1805 acerca de tan singular fenómeno. Habiendo puesto sobre un yunque frío un lingote de plata de temperatura elevada, admiróse de oír sonidos musicales mientras duró el enfriamiento de la masa. En 1829, Arturo Trevelyan puso por casualidad un hierro de soldar muy caliente sobre una masa de plomo, y al punto brotó del hierro un sonido agudo. Esto le indujo á estudiar el fenómeno y á idear instrumentos á propósito para poner en evidencia esta causa de producción del sonido: en breve los describiremos, al estudiar las vibraciones sonoras.

El paso de una corriente eléctrica hace resonar una barra de hierro suspendida por su parte media, y uno de cuyos extremos está en el centro de un carrete de inducción.

Por último, la combustión de los gases en los tubos da también origen á sonidos musicales. Si se enciende el chorro de hidrógeno que se desprende del pequeño aparato

llamado por los químicos *lámpara filosófica* (fig. 246), y se introduce la llama en un tubo de diámetro mayor abierto en sus dos extremos, se percibe un sonido más ó menos agudo ó grave según la longitud y el diámetro del tubo, y también según su temperatura. Situando convenientemente cierto número de estos aparatos, resulta una serie de sonidos musicales que forman diferentes acordes, y de ahí procede el nombre de *armónica química* ó de *órgano filosófico* con que se conoce esta especie de instrumento músico. Este hecho ha servido de punto de partida para los curiosos experimentos de Schaffgotsch y de Tyndall sobre las llamas cantantes.

De los hechos que preceden resulta en primer lugar una consecuencia: la de que el sonido necesita para producirse cierto movimiento de las moléculas de los cuerpos, un estremecimiento que no siempre percibe la vista, pero sí con frecuencia el tacto, cuando se pone la mano ó el dedo sobre el cuerpo sonoro. Y valiéndonos del lenguaje científico, diremos que los sonidos y los ruidos no son otra cosa sino sensaciones producidas por vibraciones periódicas de los cuerpos, cuando estas vibraciones llegan á adquirir cierto grado de velocidad y de amplitud. Acabamos de ver que hay ciertos modos de suscitar dichas vibraciones: la propiedad de los cuerpos que las hace posibles es sólo una, la que se conoce en física con el nombre de *elasticidad*.

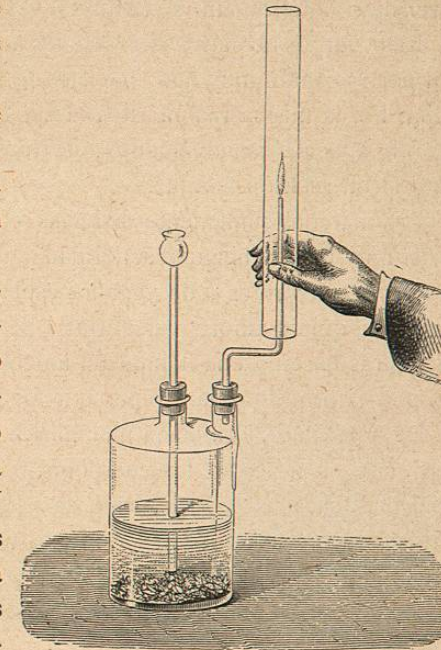


Fig. 246.—Experimento de la armónica química

IV

LOS CUERPOS SONOROS

Tenemos, pues, que los cuerpos capaces de emitir sonidos, de *resonar*, empleando una expresión familiar y exacta á la vez, cuando se les somete á una percusión, á un frotamiento, etc., son los que en cierto grado están dotados de elasticidad. Los metales, el cristal, la madera de estructura fibrosa son los que poseen más marcada sonoridad entre los sólidos; pero esta propiedad depende en gran manera de la forma y dimensiones de la masa resonante. Un trozo de acero de forma cúbica despedirá un sonido opaco, sordo, cuando se descarga sobre él un martillazo; pero este sonido será más intenso si se suspende dicho trozo por uno de sus puntos y se aplica el martillazo á cierta distancia del punto de suspensión; el mismo pedazo de metal, transformado en una varilla cilíndrica un tanto larga, despedirá sonidos más intensos mediante el frotamiento ó el choque. Pero su sonoridad será mucho mayor, si se le da la forma de vasija hemisférica, de campana ó de timbre. En resumen, la sonoridad está en razón directa de la elasticidad.

Los líquidos y los gases son cuerpos elásticos, por lo cual pueden emitir sonidos, según hemos visto antes. Débeseles, pues, incluir entre los cuerpos sonoros, pero la pro-