

Caja 15  
20

3202

ESTUDIOS

# FÍSICOS

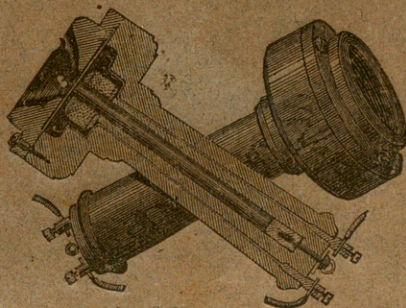
POR

D. EDUARDO LOZANO,

CATEDRÁTICO DE FÍSICA EN EL INSTITUTO DE TERUEL,  
DOCTOR EN CIENCIAS, SECCION DE FÍSICAS Y DE EXACTAS, Y LICENCIADO  
EN FARMACIA.

TOMO II

TRATADO DE ACÚSTICA



MADRID

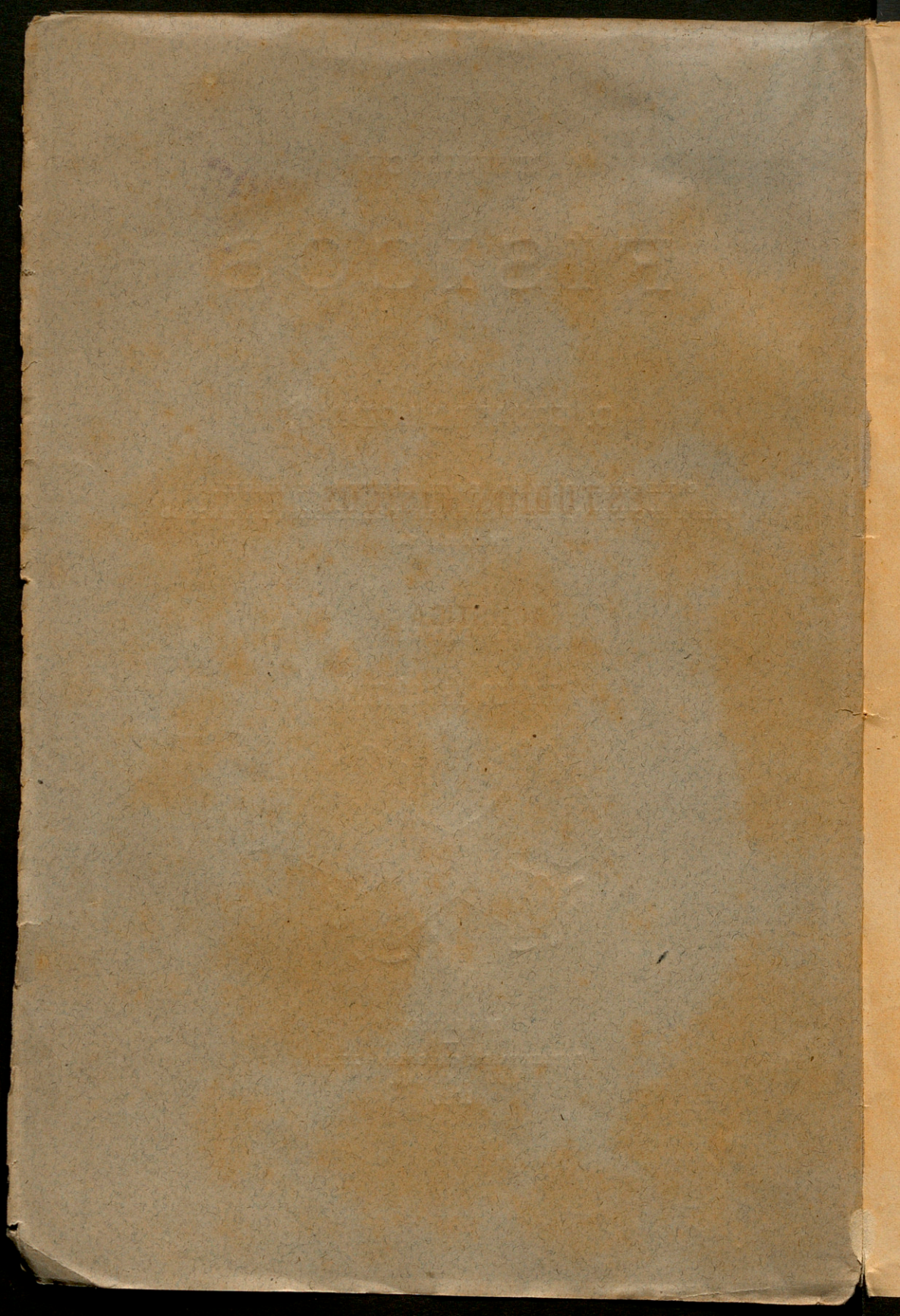
—  
IMPRENTA DE GREGORIO JUSTE

Pizarro, 15. bajo.

1880









M 53 602  
M 00682973

3202



ESTUDIOS FÍSICOS  
II  
ACÚSTICA



ESTUDIOS

# FISICOS

DE EDUARDO LOZANO

ESTUDIOS FISICOS

ACUSTICA  
TOMO II

TRABAJO DE ASESORIA



ESTUDIOS

DE EDUARDO LOZANO

TOMO II



ESTUDIOS  
FÍSICOS

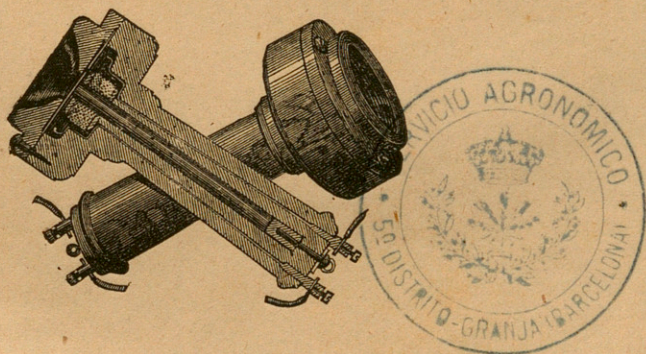
POR

D. EDUARDO LOZANO,

CATEDRÁTICO DE FÍSICA EN EL INSTITUTO DE TERUEL,  
DOCTOR EN CIENCIAS, SECCION DE FÍSICAS Y DE EXACTAS Y LICENCIADO  
EN FARMACIA

TOMO II

TRATADO DE ACÚSTICA



MADRID

IMPRENTA DE GREGORIO JUSTE

Pizarro, 15, bajo.

1880



ESTUDIOS

# FISICOS

PRÓLOGO

D. EDUARDO LOZANO

---

El autor se reserva todos los derechos que la ley sobre propiedad literaria le confiere, después de haber cumplido sus prescripciones.

---



## PRÓLOGO

Hace pocos meses quedó terminada la impresion del tomo 1.º de los Estudios Físicos. La benévola aceptacion de nuestro modesto trabajo nos obliga á renovar los esfuerzos para ofrecer al público ilustrado el 2.º volúmen de la biblioteca, que ofrecido teníamos, en la misma forma y buenas condiciones tipográficas que nuestros lectores nos han rogado diéramos á la obra.

La importancia de los últimos descubrimientos de la bellísima Ciencia del Sonido, cuales son, el teléfono y el fonógrafo, han llegado á hacerlos populares; pero hay muchas personas de instruccion bastante general, que desconocen, sin embargo, cuál ha sido el fundamento de estas y otras prodigiosas invenciones de la misma ciencia; en una palabra, que ignoran los fenómenos y leyes más rudimentarias de la Acústica.

Verdad es que el celo del Profesorado español va poco á poco difundiendo los conocimientos físicos; y que algunos sabios tambien con desinteresado y noble afan trabajan sin descanso para extenderlos y generalizarlos; mas no tenemos noticia de que ni original ni traducido haya visto la luz en nuestra patria ningun Tratado de Acústica de mediana ex-



tension; porque las ligeras nociones de esta ciencia contenidas en las obras españolas de Física, se reducen á satisfacer las exigencias de los programas de los Institutos.

Aquí, donde abundan los buenos músicos, escasean los aficionados á darse cuenta de las impresiones que reciben mediante el oído: saben apreciar el tono de una nota é ignoran acaso su relacion con el número de vibraciones que la producen, y no tienen remota idea de la causa del timbre, ni de los modernos trabajos para explicar el origen de los acordes, de las disonancias y de otros fenómenos musicales.

No pretendemos que nuestro libro llene por completo este gran vacío, y daríamos por bien empleados los desvelos de su publicacion, si con ello contribuyéramos á despertar el gusto por la Ciencia del Sonido, viendo que se publican y leen Tratados más extensos y completos que el presente, acerca de este ramo del saber, así como de los restantes que se comprenden en el vasto campo de las Ciencias Físicas, cuyo cultivo ha de proporcionar dias de mayor gloria y prosperidad á nuestra querida España.

Madrid 1.º de Abril de 1880.



# PRIMERA PARTE

---

## EL SONIDO

---

### CAPÍTULO PRIMERO

I. Preliminares.—II. Produccion del sonido.—III. Su propagacion: teléfono.  
IV. Intensidad del sonido.—V. Su velocidad.

#### I.—*Preliminares.*

Si músicos fuéramos, sabríamos apreciar con exactitud las delicadas combinaciones de notas acordes, armoniosas, que nos deleitan y extasían con los dulces sentimientos que inspiran, y comprenderíamos la agitacion que experimenta nuestra alma al vivo son de la trompa bélica que, acalladas las voces de los demás instrumentos de la orquesta, excita al coraje destructor de las batallas; pero una larga educacion musical nose halla al alcance de muchas personas, ni es tampoco necesaria al efecto: basta un oido regularmente conformado para distinguir un *sonido* de un *ruido*; y con esto la música de la Naturaleza se nos revela en los trinos de las aves al despertar la aurora, en el retumbar de aterradores truenos, en el bramido del viento en noche tempestuosa y el rumor del oleaje; y tambien nos conmueve en lugar apartado el zumbido misterioso é informe de la campiña durante un dia estival, formando parte de esta maravillosa orquesta del bosque, el *murmurio del arroyo*, el *ruido de las hojas* y el bulir y cantar de pajarillos é insectos, de todo sér viviente, que entonan así un himno de alabanza á la Bienhechora Providencia que los anima. ¿Quién no sabe apreciar estas



bellezas musicales? Desde luego puede afirmarse que todos ó la mayoría de los hombres; pues con la espontaneidad de su espíritu, habiendo una ocasión propicia, se despierta y brota el sentimiento estético del fondo de la conciencia.

¿Deberemos contentarnos, según esto, con percibir el sonido agradable de una voz amiga, el cantar cariñoso de la tierna madre, la melodía de una orquesta, ó ya admirar el estrépito de una catarata, sin preguntarnos qué son estos *sonidos*, qué estos *ruidos*, signos inequívocos de la existencia de cuanto nos rodea? De ningún modo: «así como el oído está organizado para oír y el ojo para ver, el entendimiento humano está dispuesto y se complace en investigar la causa de los fenómenos que observa,» buscando infatigable las leyes que presiden las variadas manifestaciones de la Naturaleza.

Nunca será suficientemente repetido: Belleza, bondad, utilidad y verdad, tales son las grandes aspiraciones del hombre. Seduce y arrastra lo bello; practicamos lo bueno; conservamos necesariamente lo útil; y libre la inteligencia de toda pasión, y superior á toda necesidad corporal, se complace en contemplar la verdad cuya plena posesión embarga el espíritu con el más divino goce que alcanzar podemos.

Claramente se deduce de lo dicho que, léjos de estar reñidos la ciencia y el arte, bello ó útil, deben marchar en amigable consorcio; si bien en muchos casos primero surge el arte, después viene la ciencia para explicar, mejorar, perfeccionar y aumentar los descubrimientos hechos por una especie de instinto razonable, que impulsó al hombre desde los primitivos tiempos, agujoneado por sus crecientes necesidades, á enseñorearse de la tierra y someter á su dominio los mismos agentes naturales que de temor y espanto le llenaran.

Así vemos, que ántes de haberse enunciado el primer teorema de la Mecánica, ya se valían los pelagos y los demás pueblos antiguos, tanto de la palanca como de otras máquinas, indispensables auxiliares para remover las enormes moles superpuestas en sus gigantescas construcciones. Muy reciente es la teoría dinámica del calor, y datan de fecha remotísima las innumerables aplicaciones del fuego.



La Acústica es ciencia moderna; la Música es tan antigua como el hombre, puesto que siempre acompañaba el caramillo y la zampoña á los primitivos pastores y patriarcas en sus continuas peregrinaciones. Nuestro objeto actual es dar alguna noticia de la primera, empezando por estudiar la *produccion y propagacion del sonido*.

## II.—*Produccion del sonido*.

Admitiendo que los cuerpos estén formados de menudas particillas, *moléculas*, separadas por huecos relativamente considerables, á primera vista se creeria que aquéllas permanecerán fijas y como enclavadas en el mismo lugar. Sucede, sin embargo, lo contrario: nunca existe semejante equilibrio molecular. De igual modo que la tierra, nuestro sosten inquebrantable, parece que firme insiste en idéntica posición, y no obstante, gira con los demás planetas, tal vez como todos los inmensos globos diseminados por el espacio; así tambien los átomos de la materia obedecen á esta ley general de movimiento, aunque sus excursiones hayan de guardar necesariamente relacion con la extraordinaria pequeñez de los mismos. Ocasion tendremos de estudiar más despacio los fenómenos de calor y luz debidos á las rápidas trepidaciones de las moléculas; mas por ahora nos limitaremos á examinar otras pulsaciones comparativamente lentas y con facilidad perceptibles, las cuales dan origen al sonido.

Supongamos que una cuerda sujeta por los extremos y extendida se desvie de la línea recta, cogiéndola, por ejemplo, con los dedos; así que aflojamos, se escapa en virtud de su *elasticidad*, pugnando por tomar la posición primera; si bien no se detiene al pronto, avanza y se encorva del otro lado y vuelve luégo con movimiento de vaiven, á la manera de péndola que *oscila* alrededor de la vertical. Este movimiento de vaiven se dice *oscilatorio*, especialmente para el *péndulo*, en cuyo caso es producido por la *gravedad*, fuerza ó virtud misteriosa que nos retiene sobre la tierra, y sin descanso á caer solicita todos los cuerpos. El mismo movimiento se dice con toda propiedad *vibratorio* si la elasticidad le determina, como en el ejemplo de la cuerda ántes considerado.

Una *ida y vuelta* completa es una *oscilacion* ó *vibracion*



que tiene su *longitud*, *amplitud*, en el espacio recorrido por cada molécula, y tambien una duracion determinada correspondiendo la mitad á sólo la ida ó la vuelta, *semi-oscilaciones*, que difieren únicamente en el signo: va como arrecciando el empuje al avanzar la primera, durante la *condensacion*, para debilitarse despues, y á partir de la posicion extrema pasar por idénticas fases, pero en sentido contrario, desandando el camino la segunda porcion ú *onda dilatada*.

Ordinariamente se representa el movimiento vibratorio por una curva sinuosa (Fig. 1.<sup>a</sup>). Los tiempos se cuentan sobre la recta XX', y la velocidad de la molécula vibrante se representa por la ordenada ó distancia á XX' del punto correspondiente. Esto supuesto, la inspeccion de la figura nos indica:

1.º Que al cabo de tiempos iguales, pasa la molécula vi-

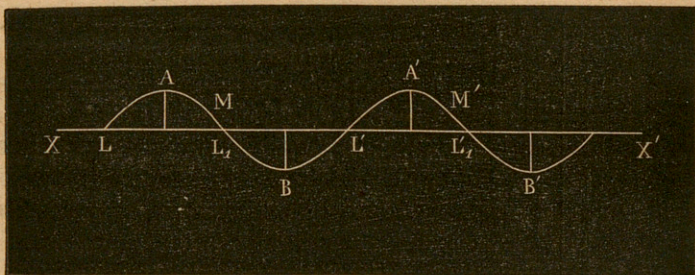


Figura 1.<sup>a</sup>

brante por las mismas fases como en A, A'; en B, B, ó en M, M'; períodos de oscilacion; y

2.º Que á la mitad de estos períodos corresponden velocidades iguales, pero de sentido contrario, como en A, B; una semi-oscilacion.

Otras veces sobre la XX', se cuentan las longitudes de la onda, y entónces la curva representa las verdaderas posiciones sucesivas de las moléculas.

Paciencia recomendamos al lector, si de primera intencion no comprende algunas definiciones indispensables, ó si le aburrimos, bien á nuestro pesar, con menudos detalles como los anteriores: no desmaye su ánimo y culpe á nuestra rudeza en el decir las dificultades que se le presenten; mas tenga



fé en la belleza y sencillez de la Ciencia, y á pesar de todo, penetrará la luz en su entendimiento y el esfuerzo mental que ponga le verá con usura recompensado, admirando bellezas ántes desapercibidas, penetrando arcanos y misterios insondables para quien no fortalece su espíritu con el estudio y cultivo de la Naturaleza.

Cuanto acabamos de exponer para el caso de un recio cordon, es aplicable á las cuerdas de los instrumentos musicales, y en general á todo cuerpo que produce sonidos. Fácilmente nos convenceríamos de las vibraciones que experimentan las cuerdas de una guitarra ó violin, observando que aparecen más gruesas y como traslúcidas al pulsarlas; y no costaría más comprobarlo en la membrana espolvoreada de un tambor batiente ó de cualquier placa sonora, viendo la agitacion de la arenilla con que préviamente las hayamos recubierto.

Así como en éstos, podria demostrarse en muchos casos, y estamos seguros de que *siempre* al sonido acompaña un movimiento vibratorio, verdadera causa de la impresion, que conmueve el nervio correspondiente y llegando al cerebro nos hace *oir*.

### III.—*Propagacion del sonido: teléfono.*

¿Cómo, pues, un cuerpo vibrante *suen*a para nosotros? La cuestion puede plantearse de este otro modo: ¿Quedan limitados los estremecimientos del cuerpo sonoro á sólo su masa, que entónces en eterno vaiven se mantendria oscilándo, ó bien las pulsaciones se trasmiten por el aire ú otro medio ponderable cualquiera, llegando así á nuestro oido? Tan racional es creer esto último, que basta indicarlo para que se admita. La necesidad de una materia elástica interpuesta, gaseosa, líquida ó sólida, que sirva de vehículo trasmisor del sonido, suele demostrarse extrayendo el aire—mediante una especie de bomba, *máquina neumática*—de un globo de cristal que lleva en su interior una campanilla suspendida por un cordon de seda. Agítese el globo y no se percibe ningun sonido mientras está vacío; pero se oiría cada vez más distintamente dando vuelta á una llave que deje entrar el aire poco á poco. El mismo resultado obtendríamos con



otro gas cualquiera; tambien se escucharia el agudo sonido muy claro, llenando el globo de un líquido, por ejemplo, el agua; ó teniéndole vacío si el cordon que sostiene la campanilla fuera un alambre, ó de sustancia más elástica que la seda.

Propágase de ordinario el sonido por el aire, guardando el mismo ritmo de condensaciones y dilataciones sucesivas que las del cuerpo vibrante, constituido así en centro de infinitas ondas esféricas, parecidas á las arrugas circulares que se formarían en el agua tranquila si teniendo suspendida una piedra la dejáramos chocar contra la superficie y la levantáramos por intervalos iguales; ó bien arrojándola de una vez, en cuyo caso obra la elasticidad del líquido, subiendo y bajando en aquel punto donde cayó la pedruzuela, y surge un oleaje análogo al que se produce en la atmósfera á impulso de las vibraciones de los cuerpos sonoros.

Hay de comun en estos movimientos, que cada partícula empuja la inmediata para formar una onda en igual tiempo que aquéllas recorren su pequeñísima excursion. Existe, sin embargo, entre ambos una diferencia radical: en el agua el movimiento de cada gota que se hunde ó levanta alternativamente es *perpendicular* á la direccion de propagacion superficial, como se observaria en el balanceo de algun cuerpo flotante sacudido por las olas; en cambio las partículas de aire oscilan segun la misma direccion de los radios de las ondas sonoras, ó sea *longitudinalmente*. Las vibraciones de que al principio hablamos en las cuerdas, son *trasversales*; las de un alambre ó varilla frotados á lo largo con una badana impregnada de resina, serian *longitudinales*.

Que los líquidos transmiten perfectamente el sonido, lo prueba el experimento anterior al llenar el globo de agua, pudiendo confirmarse el hecho en diversas ocasiones. Los buzos y demás personas acostumbradas á zambullirse, oyen los ruidos de afuera, aunque muy debilitados, por pasar las vibraciones de un cuerpo ligero, *el aire*, á otro más consistente, *el agua*; y esta circunstancia, segun pronto veremos, apaga el sonido considerablemente. No habria pérdida por tal causa, si el cuerpo sonoro y el oido estuvieran dentro del mismo líquido: en efecto, los sonidos de una campana tocada bajo del agua, llegan así con extraordinaria claridad y fuerza



á distancias mucho mayores que propagadas en la atmósfera.

No debe extrañarnos este resultado, sabiendo la mucha elasticidad de los líquidos, cuya propiedad ó fuerza entra en juego en la trasmision sonora; y ménos nos sorprenderán ahora los innumerables hechos y útiles aplicaciones que á cada paso vemos de la fácil conduccion del sonido á través de los sólidos, principalmente la madera, aunque no se exceptúan los muros más espesos y la tierra misma. ¿Quién no ha oido referir que los salvajes y los escuchas militares aplican el oido en tierra para distinguir á grandes distancias las pisadas de la caballería enemiga? Así perciben tambien los obreros que practican un túnel ó galería subterránea los golpes que dan sus compañeros de trabajo, guiándolos hasta encontrarse al venir horadando el terreno en opuestas direcciones. En virtud de la gran potencia conductiva que presenta la madera, oimos el más ligero roce ó rasguño producido en el extremo de un largo tablon, apoyando la oreja hácia el otro extremo, sin lo cual sería inapreciable el ruido. En esta propiedad se funda el *estetoscopio* ó *auscultador* de madera, especie de tubo que aplican los médicos contra el pecho desnudo del enfermo á fin de percibir cómodamente los ruidos respiratorios; si bien hoy usan con ventaja el auscultador del Sr. Koenig, fundado en las propiedades vibrantes de las membranas y tubos sonoros.

Una curiosa aplicacion de la conductibilidad del sonido por las cuerdas tenemos en un juguete muy conocido y usado por los muchachos para hablar en voz baja de balcon á balcon; de aquí el llamarle *telégrafo* de cuerda. Redúcese el aparato á dos tubos, á modo de panderetas, cerrados en una base por membranas, á las cuales van atados los extremos de la cuerda: su accion se explica con la misma sencillez que se construye; vibra la primera membrana al empuje del aire agitado por el que habla, y las vibraciones continúan á través de la cuerda hasta la otra membrana y por ella al aire del segundo tubo en donde pone el oido quien escucha, no sin cierta extrañeza la vez primera, una secreta conversacion de que no pueden enterarse otras personas, aunque más de cerca lo intentaren. Hemos citado intencionalmente este juguete, porque se acostumbren nuestros lectores á examinar con detenimiento áun las cosas más vulgares y vistas, que no por



eso dejan de ser muchas veces admirables y dignas del más serio estudio. ¿Y quién sabe, por ventura, si *telégrafo* semejante en manos de dos chicuelos no habrá inspirado, sino la idea primordial ó la posibilidad, siquiera la más sencilla forma del *teléfono*, portento y maravilla de los sabios de hoy, que parecerá trivial á los ignorantes de mañana? (1).

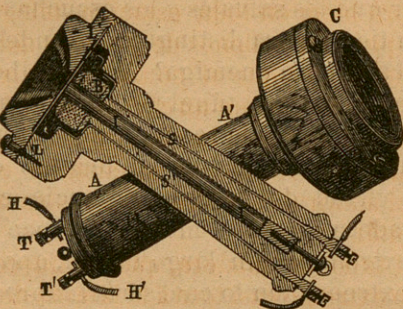


Figura 2.ª

En el teléfono de Bell (*fig. 2.ª*), existen partes correspondientes á las del juguete anterior, pero de figura y sustancia diversa. Forman lo exterior del instrumento dos tubos de madera AA', terminados en una cazoleta C, por donde se habla ó escucha, sirviendo de fondo á la cavidad en vez de membrana una delgada lámina de hierro LL' barnizada para evitar la oxidación; la cuerda se sustituye por un largo alambre, por ejemplo, el que une dos estaciones telegráficas. No puede ser más completa la analogía entre ambos aparatos. ¿Se transmitirá el sonido en el teléfono segun se ha explicado para el caso precedente? También vibran aquí las láminas de hierro, la del primer tubo telefónico se pliega ligeramente á la voz; pero estas pequeñas inflexiones no pasarían directamente al alambre, ni ménos podrian recorrer 50 ó

(1) El telégrafo de cuerda se describió por vez primera en una obra de Física experimental del Sr. Weinhold, publicada en 1872; y el teléfono eléctrico, debido á Reid, data del año 1861.



más kilómetros (1) para llegar á la otra estacion y conmover la segunda lámina. Necesario era, por lo tanto, despertar, y se ha conseguido, otro agente poderoso y velocísimo que, simultáneo con aquellas primordiales vibraciones, obligara á la segunda placa á responder con prontitud y precision suma. Este agente, no puede dudarse, es la electricidad.

Corrientes eléctricas como en el telégrafo ordinario, producen, en efecto, las vibraciones de la placa del segundo teléfono. Ahora bien: en toda estacion telegráfica hay una pila formada por tarros llenos de líquidos donde se introducen planchitas de zinc que al consumirse oxidándose, desprenden electricidad, como un carbon que al quemarse despidе calor. Mas ¿dónde está la pila origen de esas corrientes que con asombrosa rapidez se suceden en el teléfono? En esto estriba el admirable secreto del instrumento y su importancia capital.

Dentro del tubo de madera, que es hueco, se halla un iman II', cuyo extremo casi toca á la lámina de hierro, rodeado por las espirales B de un alambre revestido de seda ó lana, yendo á parar á dos tornillos T y T' de comunicacion que oprimen los cabos H y H' del alambre de línea. Mediante esta ingeniosa y sencilla disposicion, al hablar frente al teléfono *transmisor*, bastan los pequenísimos movimientos hácia adelante ó atrás de su laminilla para engendrar corrientes instantáneas *inducidas*, las cuales caminan á lo largo de los conductores y llegan al carrete ó alambre en espiral del teléfono *receptor*, aumentando y disminuyendo alternativamente la fuerza atractiva de su barra magnética, que á la vez obra sobre la placa correspondiente, puesta así en cadencia perfecta con la del primer aparato.

La palabra, y mejor las voces de algunos instrumentos

---

(1) Poco menor es la distancia que media entre Albarracin y Teruel, y gracias á la amabilidad del ilustrado Director de Telégrafos, D. Francisco Maspons, tuvimos el gusto de ser los primeros que oímos la voz humana dirigida desde la primera de aquellas ciudades, á los que, estupefactos, escuchábamos en Teruel. El júbilo que producen tales acontecimientos, sólo puede comprenderlos quien los ha experimentado alguna vez. La mayor distancia á que se ha entablado correspondencia telefónica, ha sido de 400 kilómetros en la América del Norte, y en Europa entre Barcelona y Zaragoza á 366 kilómetros.



musicales, se prestan admirablemente para ser trasmitidos por el teléfono á considerables distancias, apreciándose los tonos y hasta el metal de voz de las personas que hablan, si bien no es exactamente el natural de la persona, pues ántes bien parece salir de escondido antro aquella vocecilla enferma, atiplada y como *metálica* si se nos permite la expresion.

Algunas perfecciones se han realizado y otras más importantes, se preparan á fin de obviar los inconvenientes que se oponen á la general adopcion de invento tan prodigioso como de fácil manejo; pero esto es obra del tiempo. Aquí haremos punto final acerca del teléfono: bastante nos hemos separado de nuestro plan y derrotero, para que sin nuevas dilaciones continuemos exponiendo otras propiedades generales del sonido.

#### IV.—*Intensidad del sonido.*

De cualquier modo que sean las vibraciones, siempre en el aire engendran ondas esféricas cuya superficie se acrecienta á medida que se alejan del centro; de aquí el que vaya apagándose el sonido á causa del *trabajo* empleado en vencer masas de flúido cada vez mayores, y concluirá por permanecer inalterable el aire muy distante, cual si fuera insensible á la oscilacion, si bien el movimiento nunca por completo se anula, áun cuando se transforme y desaparezca como sonido.

La Geometría enseña la relacion que existe entre las superficies esféricas y sus rádios ó distancias del centro: «las áreas crecen como los cuadrados de los rádios;» luego podremos afirmar que la fuerza ó *intensidad* del sonido disminuye proporcionalmente al cuadrado de la distancia. Así, suponiendo en una torre 4 campanas que lanzáran idéntico sonido, á la distancia de 2 kilómetros se percibiría éste con la misma intensidad que á 1 kilómetro del campanario el toque de *una* sola de dichas campanas.

Por esto mismo, evitando la formacion ó expansion de las ondas esféricas, lo cual se consigue trasmitiendo el sonido á lo largo de tubos como los de una cañería, no disminuye su fuerza sensiblemente á la distancia de un kilómetro,



pudiendo conversar holgadamente dos interlocutores colocados en los extremos de una tubería de esta longitud. En la actualidad se emplean tubos acústicos de goma elástica en los grandes edificios, para transmitir órdenes desde un centro á todas las dependencias situadas en habitaciones y aún en pisos diferentes.

De un modo parecido á los tubos obran las galerías abovedadas, si bien entra por mucho entónces el efecto de las *resonancias* que nos ocuparán en breve.

A propósito de la intensidad del sonido, recordaremos el experimento del globo vacío, del cual nos servimos para demostrar que el aire ú otro medio ponderable es de todo punto necesario para que el sonido se trasmita. Allí hicimos observar que el sonido recobraba su fuerza á medida que entraba mayor cantidad de aire. Conste, pues, que en un aire enrarecido, ó gas de menor densidad, como el hidrógeno, que es 14 1/2 veces más ligero que el aire normal, á temperaturas iguales, la voz que en su seno se produzca será débil y apagada, como de hombre falto de alientos y casi moribundo. Algunos físicos han hecho una fuerte inspiracion en hidrógeno puro, y esforzándose en dirigir la palabra á los circunstantes, escuchaban éstos asombrados una vocecilla amortiguada, pero *ronca y cavernosa*, como de *ánima del otro mundo*. Lo mismo acontece en las grandes alturas, segun cuentan los viajeros y areonautas; y así debe ser, porque el aire ambiente está aligerado del peso de las capas atmosféricas que sobrecargan las más bajas; allí no puede continuarse una larga conversacion, por la fatiga que cuesta hacerse oír del compañero, y el disparo de un fusil ó pistola produce un efecto semejante al chasquido de un simple fogonazo. Infiuye muy poco la naturaleza del gas; porque en una atmósfera de hidrógeno se percibiria el sonido casi igual que en otra de aire si la densidad de ambos fuera la misma, por encontrarse aquél muy condensado ó éste muy enrarecido.

La intensidad depende en estos casos, más que del medio trasmisor, de la poca densidad del aire en el lugar donde el sonido se produce. Por eso un tiro disparado en la cima de un alto cerro no se oye á cierta distancia bajando, y desde la base llega hasta arriba la detonacion. Se comprende sin esfuerzo, que la energía sonora no decaerá tanto al pasar



desde el medio más denso al que lo sea ménos; por el contrario, la onda en éste producida hallará gran dificultad para mover la mayor masa que aquél opone, y de consiguiente el debilitamiento del sonido. Tan plausible explicacion dan los físicos de los hechos citados y de otros que sería prolijo enumerar; sin que pueda despreciarse en tales casos la influencia debida á la estructura y elasticidad de los diferentes medios sólidos ó líquidos que propagan los sonidos á distancias que no alcanzarían segun dijimos ántes, trasmitidos por el aire.

Desde luego aumentará la intensidad del sonido con la amplitud de las vibraciones, y esta circunstancia caracteriza y suele tomarse como definicion de dicha propiedad; viéndose claramente que golpeando con más fuerza una campana, ó separando mucho una cuerda tensa, ha de percibirse una sensacion más enérgica, correspondiente al violento choque de la onda sonora contra el *tímpano*, membrana que cierra el conducto del oído externo.

Atendida la naturaleza de los movimientos ondulatorios, se comprende su coexistencia en la atmósfera, é igualmente con las corrientes de aire ó vientos que sin cesar alteran la tranquilidad del océano gaseoso. Esto no obstante, alguna influencia ejercen los vientos en la intensidad del sonido; y todo el mundo sabe que en los días de calma se oye desde más léjos el tañer de las campanas que si el desencadenado huracán nos amedrenta con sus estragos; áun cuando sea ménos violento el desequilibrio atmosférico, no se propaga el sonido con la misma facilidad en día revuelto que en la noche apacible y silenciosa, ni llega á igual distancia si el viento es favorable ó sopla en direccion contraria. Facilita también la trasmision del sonido la homogeneidad de la atmósfera, segun se aclarará más adelante.

Algunas causas no indicadas ántes, influyen, por último, en la intensidad, sobresaliendo la *resonancia* de otros cuerpos cercanos, mejor dicho, del aire en ellos encerrado; en lo cual estriba el uso de la *caja* sonora que llevan el piano, la guitarra y demás instrumentos de cuerda, que producirían, sin el concurso de aquélla, sonidos flojos é inapreciables á una distancia moderada.



V.— *Velocidad del sonido.*

Salta inmediatamente á la vista que el sonido caminará en verdad con más ó ménos rapidez que las arrugas circulares de un estanque ó las olas del mar levantadas por el viento cuando vienen á estrellarse contra la playa; pero de todos modos *algo* tardará en trasmitirse la série de ondulaciones sonoras. Confírmase esta induccion con observaciones harto frecuentes: ¿Quién no ha tenido ocasion de ver cortar un árbol á algun leñador, que levanta ya otra vez la implacable hacha cuando llega á nosotros el ruido del golpe antecedente? Lo mismo se observa si á cierta distancia descargan martillazos sobre un yunque, ó vemos disparar un arma de fuego: primero aprecia el ojo, despues nos advierte el oido la produccion del choque ó detonacion correspondiente. ¿Y no pudiera ser la tardanza del último sentido debida á su organizacion especial ó á verdadera imperfeccion? Indudablemente que no, pues el retraso del sonido acrece si nos alejamos, y no sucedería esto por la sola pereza del oido. Explícase muy bien, en cambio, el fenómeno, teniendo en cuenta la asombrosa velocidad de la luz que recorre unos 320.000 kilómetros en un segundo, mientras el sonido avanza en igual tiempo casi la millonésima parte, 340 metros; aún ménos que la bala disparada de una carabina de mediano alcance. La luz puede considerarse como instantánea á cortas distancias; el sonido se percibirá tantos segundos despues que el efecto luminoso, cuantas veces contenga 340 metros el espacio que media entre el observador y el punto donde se produjo el fenómeno.

Ahora sí que podemos comprender por qué siendo simultáneos el relámpago y el trueno se oye éste á veces largo rato despues, y se nos explicará en parte su prolongado retumbar estrepitoso. El chispazo eléctrico, causa única de ambos fenómenos, salta á la par entre varias nubes ó entre las nubes y la tierra á diferentes distancias del que atemorizado escucha el estruendoso *retemblor*, formado, sin embargo, por chasquidos secos que llegan sucesivamente desde el más próximo al más lejano. De igual suerte que puestos en el extremo de una larga fila de soldados que disparen á



un tiempo sus fusiles, oimos varias detonaciones sucesivas por el retraso de las más distantes, y no una sola como sucedería si se desviarán lo mismo formando corro ó círculo á nuestro alrededor. A pesar de todo, hay tanta diferencia entre el insignificante y fugaz chasquido de la chispa de nuestras máquinas eléctricas y el trueno aterrador de furiosa tormenta, que apenas satisface la comparacion, aunque se añada á lo dicho que los parleros ecos contribuyen á realzar el fenómeno indicado, comunicándole cierta sonoridad hueca y formidable que turba y amedrenta, sobre todo, á las gentes sencillas, quienes le atribuyen á explosion de la *cólera celeste*.

Una circunstancia debiera acompañar á los repetidos choques que engendran el trueno, y es, el decrecimiento de su intensidad, la cual sabemos guardaria proporcion con el cuadrado de la distancia. Y para confundirnos y hacernos dudar de la anterior explicacion, ocurre unas veces tal como lo hemos previsto; al primer violento estampido siguen otros ménos fuertes que se van amortiguando y se pierden en lontananza, al paso que en otras ocasiones arrecia á lo último, ó hácia el medio de su duracion, ó sin haber gradacion alguna se oyen con intermitencia estallidos rimbombantes desde el principio hasta el fin de tan complejo meteoro atornador. No cabe decir otra cosa ante los hechos, sinó que serán desiguales la intensidad de los chispazos parciales; que la superposicion de sonidos reflejos, los obstáculos para la trasmision del sonido que ofrezca el terreno y la misma atmósfera, contribuyen á producir tan asombrosa variedad.

Se ha determinado la velocidad del sonido en el aire midiendo la distancia entre dos *estaciones* ó puestos, donde hábiles observadores mandaban disparar cañonazos de tiempo en tiempo, y alternando los dos de cada estacion, para averiguar el término medio de los segundos que empleaba el sonido en recorrer aquel espacio, y dividiendo éste  $e$ , por el tiempo  $t$ , se obtiene la velocidad  $v = \frac{e}{t}$ , como en todo movimiento uniforme. Nada más sencillo á primera vista que resolver este problema, y, no obstante, ofrece serias dificultades en la práctica, y ha preocupado por largo tiempo á los físicos más distinguidos de Europa.



El movimiento del sonido es uniforme, es decir, los espacios que recorre son proporcionales á los tiempos; lo cual se ha demostrado repitiendo el experimento anterior á distancias doble, triple, etc., y anotando los tiempos  $2t$ ,  $3t$ ..., que respectivamente tardaban en oirse los disparos.

Esta velocidad constante para toda clase de sonidos, ya más *agudos* ó chillones, ya *graves* ó broncos, no varía tampoco con la presión de la atmósfera. Si tarda el sonido unos 3 segundos para recorrer 1 kilómetro en las llanuras bajas, otros tantos ó un poco más emplea á la altura de los picos más elevados del Pirineo ó de los Alpes, donde el aire tenga una densidad y ejerza una presión mitad ó menos que á la primera. No sucede así con la intensidad que dijimos disminuye á medida que nos elevamos en la atmósfera.

Aumenta la velocidad del sonido con la temperatura  $0^{\text{m}},6$  próximamente por  $1^{\circ}$  centígrado: de modo que camina con alguna mayor lentitud los días fríos de invierno que en los abrasadores y perezosos del estío: la diferencia apenas llega á  $20^{\text{m}}$ . Por esta razón, tardará un *poco más* en oirse un disparo en las alturas, puesto que á la misma hora del día y en idénticas condiciones el termómetro acusa allí más baja temperatura.

Conviene mucho no confundir la *velocidad* de las ondas sonoras con la *energía* ó fuerza viva (\*) propia de las moléculas al herir el tímpano, la cual da origen á la intensidad. Se advirtió que ésta disminuía en los gases menos densos que el aire, el hidrógeno, al paso que la velocidad del sonido en el último gas es cuádruple que la del primero; llegando á ser próximamente un tercio menos que en el aire la velocidad en el ácido carbónico que es vez y media más denso.

¿No hay alguna relación entre estos diversos hechos, alguna *ley* que exprese matemáticamente su dependencia mu-

(\*) La fuerza viva de una partícula gaseosa, equivalente al trabajo mecánico, está representada por  $\frac{1}{2}mv^2$ ; siendo  $m$  su masa y  $v$  la velocidad, máxima en el caso actual. La intensidad del sólido para notas del mismo tono es proporcional, segun esto, al cuadrado de dicha velocidad, y también al cuadrado de la amplitud de las vibraciones; suponiendo constante la porción de onda sonora recogida por el oído é igual la velocidad de las partículas que la forman.



tua? Efectivamente existe: la han encontrado los físicos y se enuncia así: «La velocidad del sonido es *directamente* proporcional á la raíz cuadrada de la elasticidad del medio, é *inversamente* á la misma raíz de su densidad.»

Por estas leyes comprenderemos cómo dicha velocidad es para el aire independiente de la presión; pues si con ella aumenta proporcionalmente la densidad del vehículo y debiera ser más lenta la propagación del sonido, gana otro tanto en fuerza elástica y trasmisora el gas por el incremento de presión, quedando compensadas ambas variaciones é invariable en definitiva la velocidad del sonido, aunque pasemos de lugares situados á orillas del mar á los puntos más elevados del continente; es decir, de una presión atmosférica desde 76<sup>cm</sup> á 40<sup>cm</sup> solamente. Se ha supuesto constante la temperatura, porque sinó el calor acrecienta desde luego la fuerza elástica de los gases, y también, según la ley que discutimos, la velocidad del sonido en ellos, suponiéndolos en limitado recinto; pero en libre comunicación con el resto de la atmósfera, pugnaria la porción caliente por rechazar las capas de aire que la rodean, estableciéndose el equilibrio, y quedaría sin efecto su primer aumento de tensión si no fuera porque subsiste dilatado y con menor densidad el aire, lo cual produce, en último resultado, aumento en la velocidad del sonido.

Demostrada una ley física, no sólo resume y explica los hechos conocidos, sinó que también ilumina el espíritu y le dirige á ulteriores descubrimientos. ¿Qué puede haber de común en la transmisión del sonido y de la luz? Supongamos, sin embargo, que el *éter* sea un medio elástico por donde aquella se propague; pues entonces debe tener una densidad casi nula, para que el sol nos envíe su luz recorriendo en cada segundo la inconcebible distancia de 320.000 kilómetros. Ejemplos como éste de aproximación entre fenómenos de un orden distinto, ocurren necesariamente al estudiar las leyes del mundo físico.

Respecto á la velocidad del sonido en el agua, se ha procedido también directamente á su determinación como en el aire, colocando en el lago de Ginebra dos barcos á suficiente distancia para hallar el retraso que experimenta el sonido producido por un martillo que golpeaba una campa-



na metida debajo del agua, y al caer inflamaba un poco de pólvora. En uno de los barcos estaba este aparato y en el otro un observador que anotaba el intervalo trascurrido desde que veía el fuego hasta escuchar la campanada por medio de un tubo á guisa de corva trompeta, cuyo pabellon ó boca más ancha, cerrada por una membrana, tenía sumergida en el líquido. El resultado así obtenido es, que el sonido camina en el agua cuatro y media veces más de prisa que en el aire, 1435<sup>m</sup> por segundo.

Por último, si hacía el extremo de una tubería dispusiéramos un doble mazo que á la par diera golpes contra el tubo y contra un timbre libremente suspendido á su entrada, se podría contar desde el otro extremo la diferencia de tiempo que media entre la llegada del sonido por el metal y por el aire interior. El eminente físico Biot dedujo de esta manera que la velocidad del sonido en el hierro era 10,5 más que la del aire.

En el caso de disponer de grandes masas de un cuerpo, se concibe fácilmente que podrían aplicarse métodos análogos para medir la rapidez con que se propagan las ondas sonoras. A la verdad, lo dicho nos basta para conocerla en los medios ordinarios y más abundantes en la Naturaleza. Mas no contentos los físicos con este triunfo, han comprobado y extendido los resultados anteriores, valiéndose de ingeniosos procedimientos aplicables á sólidos, líquidos y gases en corta cantidad necesarios. Si propicia ocasion se nos ofrece, ya indicaremos á su debido tiempo el fundamento de tan curiosas experiencias.

Una duda pudiera asaltar al lector acerca de la generalidad de las leyes de que ántes nos ocupamos, y las cuales formulan los matemáticos por la igualdad

$$[1] \quad v = \sqrt{\frac{e}{d}};$$

siendo  $v$  la velocidad,  $e$  la elasticidad y  $d$  la densidad del gas. En efecto: ¿cómo habremos de conciliar la velocidad mayor en los líquidos y sólidos homogéneos que presentan además una densidad enorme comparados con los gases? Rigurosa-



mente hablando la fórmula [1] sólo conviene á los últimos y aún es preciso entónces dar recta interpretacion á su aparente discordancia con los hechos (\*); pero el aumento de velocidad en el agua y el hierro se concibe muy bien porque estos cuerpos y los que se hallan en el mismo estado poseen muchísima más elasticidad que el aire, y de aquí la viveza y prontitud de la trasmision del sonido. Desde luego se desprende de lo dicho, que el resultado del cálculo sino exacto cuando para facilitarle no se tienen en cuenta todas las circunstancias del fenómeno, ó bien porque se desconocen éstas, pocas veces conduce al absurdo, ni son despreciables sus consecuencias; al contrario, descubren é ilustran los puntos más árduos en una cuestion difícil, presentando soluciones que hubieran sido casi impenetrables á una somera ó ciega experimentacion.

## CAPÍTULO II.

I. Reflexion del sonido.—II. Refraccion.—III. Trasparencia y opacidad de la atmósfera para las ondas sonoras.—IV. Inflexion del sonido.—V. Resonancia.

### I.—*Reflexion del sonido.*

Hemos expuesto el modo de propagacion del sonido por los medios homogéneos. Ahora vamos á ocuparnos de los fenómenos producidos al llegar las ondas sonoras á otros cuerpos de diferente densidad. Y como en último término el sonido físicamente considerado es un mero movimiento, podemos colegir desde luego que al llegar la onda á la superficie de separacion de dos medios, habrá en el primer momento una trasmision de parte de la *fuerza viva* á las

(\*) En la fórmula anterior, propuesta por Newton, no se tuvo en cuenta el aumento de la velocidad ocasionado por la diferencia de temperatura subsistente entre las ondas condensadas y las dilatadas. Para obtener por su medio resultados en conformidad con la experiencia, es preciso multiplicar la cantidad subradical por 1,42; cuyo número expresa tambien el valor de  $\frac{C}{c}$ ; ó sea la razon de los calóricos específicos del aire C á presion constante y  $c$  en volumen constante. Laplace que indicó esta correccion, estableció además la generalidad de su fórmula para líquidos y sólidos.



moléculas del nuevo medio, que á su vez conservará y propagará en una ú otra forma la impulsión recibida; sin que deje por esto de reobrar en sentido contrario rechazando parcialmente la ondulacion por el medio primitivo.

Todos estos efectos se originan siempre; pero variando la naturaleza y elasticidad de los medios, predomina un resultado sobre los demás, y habrá verdadera *resonancia* cuando el nuevo cuerpo se conmueva y vibre á compás del centro sonoro; habrá *refraccion*, si las ondas emitidas continúan trasmitiéndose por aquél, generalmente con desvío de la direccion que traian; ó bien se apagará el sonido y perderá su carácter propio, se convierte en calor, al penetrar por ciertos medios heterogéneos que son opacos, por decirlo así, para la trasmision de este movimiento ondulatorio.

Por último, la *reflexion* del sonido se produce al encontrar las ondulaciones un obstáculo resistente y denso. Lo mismo que sucede á la pelota lanzada contra un muro, ó á la bola de billar en las bandas de la mesa; rebotan del lado opuesto, formando con la perpendicular á la superficie un *ángulo de reflexion igual al de caída ó incidencia, y están contenidos ambos ángulos en el mismo plano*. Así vemos retroceder las olas del mar y las ondas de un estanque, como si el centro aparente de conmocion se hallara tierra adentro á igual distancia de la pared reflectora que el centro efectivo de la onda directa.

Ninguna dificultad ofrece admitir para el sonido estas leyes generales de la reflexion, demostradas en el choque de los *cuerpos elásticos* contra un plano; pues el aire, su vehículo ordinario, goza en alto grado de la misma propiedad. Aproximadamente ha tenido ocasion de comprobar aquella ley cada cual de nuestros lectores, escuchando las notas de una serenata ó los disparos de los que tiran al blanco, cual si el sonido procediera del lado opuesto al lugar de origen atravesando el muro, en donde sólo han experimentado su reflexion las ondas sonoras.

A idénticas leyes obedecen los rayos de calor y luz cuando se reflejan en un espejo; lo cual prueba la elasticidad del *eter*, que es el medio por donde se propagan sus radiaciones.

En la reflexion del sonido estriba la sencilla explicacion



del eco atribuido en siglos remotos á una deidad, la ninfa Ecos, encargada de remedar, ora las voces angustiosas del perdido caminante, ora los tiernos cantares del pastor enamorado. Por más entretenidos que sean los ecos, repitiendo una ó muchas veces la misma sílaba, ó varias palabras; suavizándose tambien ciertos ecos, y recibiendo extrañas y agradables modulaciones que contrastan con la rudeza del sonido primitivo; en todos los casos ha de haber superficies reflectoras colocadas á bastante distancia, para que mientras van y vuelven las ondas se haya borrado la impresion del sonido directo cuando llegue á nosotros el reflejo que entónces se percibe distintamente.

Sólo pueden pronunciarse con claridad cinco sílabas en el intervalo de un segundo, lo cual se comprueba si decimos Cons-tan-ti-no-pla, ó cualquier palabra pentasílaba, teniendo un reloj á la vista. Por otra parte, el sonido camina 340<sup>m</sup> en igual tiempo, y como ha de recorrer dos veces, contando la ida y la vuelta, la distancia al plano de reflexion, necesitará hallarse situado éste á la mitad de  $\frac{1}{5}$ , ó sea  $\frac{1}{10}$  de 340<sup>m</sup>; esto es, á 34<sup>m</sup> del observador para que se produzca un eco monosílabo. Con superficies reflectoras más próximas hay repeticion de sonidos breves ó inarticulados, cuales son los golpes de un martillo.

Comprendido esto, se deduce fácilmente que la existencia de un *eco polisílabo* implica la del plano á tantas veces 34<sup>m</sup> cuantas sílabas tenga la palabra reproducida. Algunas veces es menor la distancia contada perpendicularmente á la superficie reflectora—que es el caso de un observador escuchando el eco de su propia voz, único que consideramos;—ya porque el punto de reflexion esté más alto que nuestra cabeza, ya porque pronunciemos rápidamente á razon de más de cinco sílabas por segundo. Ambas circunstancias, sin duda, se reunen para que el punto desde donde se oye un eco pentasílabo existente en la plaza de toros de Teruel diste sólo 120<sup>m</sup> de la pared donde el sonido se refleja.

Los *ecos múltiples* provendrán de la reflexion en diferentes lugares, á conveniente distancia del observador para que se suceda la misma voz repetida dos ó más veces sin confusion de sonidos superpuestos. Con frecuencia se engendran dichos ecos polífonos por las reflexiones alterna-



tivas teóricamente infinitas, entre dos planos paralelos. Uno de las ecos más célebres de este género se encuentra en el vasto pátio—con 37<sup>m</sup> de largo por 20<sup>m</sup> de anchura—del castillo de Simonetta en las cercanías de Milan: repite 30 veces un grito y hasta 50 la detonacion de un pistoletazo.

Tambien en las paredes de nuestras modestas viviendas son rechazadas las ondas sonoras, y agregándose á las directas las reflejas amplifican la voz mucho más que si se hablara al aire libre. Esta favorable superposicion de sonidos produce una especie de *resonancias*, las cuales no deben confundirse con el fenómeno del mismo nombre que en breve estudiaremos. Los arquitectos entendidos las tienen muy en cuenta para aprovechar sus efectos, apetecidos al construir los teatros y grandes salones destinados á contener en su recinto un concurso numeroso que alguna vez se hallará pendiente de los labios del orador. Procúrase en cambio evitar los ecos vocingleros, que de producirse aturden con su algarabía y desesperan al más paciente auditorio.

Ejemplos pudieran citarse de tan extraño descuido é impericia que inutilizara algunos edificios por otra parte suntuosos. Acúdense entónces al pobre remedio de impedir toda reflexion sonora poniendo borra y otros cuerpos blandos debajo del papel ó los tapices—el mueblaje, las personas mismas y sus ropas producen á veces un efecto análogo en salones defectuosos;—pero échase de ver fácilmente á costa de cuánta fatiga se dejará entender en condiciones tales áun los oradores de pulmon más robustos y de palabra más elocuente.

Las leyes de la reflexion del sonido explican de igual modo los fenómenos observados en las bóvedas elípticas, cuya curvatura determina la concentracion de las ondas en un punto especial ó foco, sobre todo cuando el movimiento parte del otro foco (\*). Situada en uno de dichos puntos, pue-

---

(\*) Por esta razon, deben proscribirse las citadas bóvedas para formar el techo de las cátedras, iglesias y grandes salones: las cúpulas tienen el grave inconveniente de abultar y prolongar demasiado la voz, lo cual llega á corregirse por medio de una sabia distribucion de los huecos: en los anfiteatros semicirculares se oye con desigualdad, más hácia el centro que por los extremos. La forma preferible para la planta de los edificios susodichos es la



de hablar en voz baja una persona vuelta á la pared sin ser oída de los circunstantes más próximos, y sí del interlocutor colocado en el segundo foco. Compruébanse estos efectos admirables en una sala del Monasterio de El Escorial y en otra llamada del secreto en la Alhambra de Granada.

Para reproducir la experiencia en las cátedras de Física, se disponen de frente dos espejos cóncavos cuyos ejes coincidan, y colgando un reloj de bolsillo en el foco de uno se oye perfectamente el tic-tac en el foco del otro espejo, como si de éste procediera el ruido distante diez ó más metros. Facilita mucho la audición el recoger las ondas sonoras con un embudo de vidrio, cuya punta se introduce en la oreja á guisa de trompetilla acústica, lo cual permite además separar algo la cabeza, que obra sinó como pantalla que detiene buena parte de las ondas sonoras.

Las propiedades anteriores hacen verosímiles algunas anécdotas de pastorcillos inocentes, de quienes se cuenta que,—separados por un río caudaloso á cuyas orillas opuestas y debajo de un gran arco del puente sesteaban,—quedarán atónitos al oír las palabras y suspiros del compañero, cual si á su lado cariñosos le tuvieran. Herschell refiere de un marido, verdadero *curioso impertinente*, que halló por acaso bajo la nave abovedada de una catedral el foco correspondiente á un confesonario, desde donde se entretenía con amigos desocupados en descubrir los secretos de los penitentes contritos; pero hubo de salirle cara la indiscreta broma, porque llegando un día su propia mujer ante el sacerdote dió publicidad de este modo á ciertas aventuras que le importaba mucho estuvieran ignoradas. Aunque sea problemática la veracidad del cuento, no deja de ser posible, y bueno será que se tomen algunas precauciones en las iglesias al situar los confesonarios, con el fin de evitar que la malicia irreverente sorprenda el sagrado de las conciencias.

---

rectangular y mejor terminada por una parábola en el lado donde se coloca la tribuna, precisamente en el foco de dicha curva para que el sonido llegue al extremo opuesto sin que apénas se note pérdida alguna de su intensidad: también se recomienda el cuadrante de círculo ó arco menor para cátedras y teatros.



## II.—Refraccion.

Pocas personas desconocen la propiedad que tienen los vidrios de aumento ó *lentes convexos*, expuestos á los rayos solares, de concentrar la luz y el calor que los atraviesa, en un *foco* denominado *principal* por todos los físicos. Este punto se busca con una cuartilla de papel blanco, observando el lugar en que la pequeña imagen del sol presenta mayor brillo: allí se enciende la yesca y otros cuerpos combustibles. El hecho se explica por la desviacion, *refraccion*, que los rayos de calor y luz experimentan pasando de un medio á otro diferente. Al entrar oblicuos los rayos desde el aire al vidrio, se aproximan á la normal á la superficie de separacion, y otro tanto sucede viniendo de cualquier medio ménos á otro *más refringente*, alejándose en el caso contrario.

Tambien *se refringe ó quiebra la onda sonora* en análogo circunstancias; lo cual no debe extrañarnos, porque la luz y el calor se propagan igualmente que el sonido por un movimiento ondulatorio. Los físicos han patentizado aquella verdad construyendo una especie de lente acústica con un saco de colódion henchido por el ácido carbónico, gas cuyo peso específico es  $1\frac{1}{2}$ ; y determinan el foco sonoro operando de una manera análoga al caso de la reflexion en los espejos cóncavos; mas teniendo, por supuesto, ahora el reloj á un lado del lente, y en el contrario se busca el foco *conjugado*; este punto se acerca ó aleja de la lente conforme desviamos ó aproximamos el cuerpo que emite los sonidos. Otras experiencias se han practicado que corroboran las siguientes leyes generales de la refraccion, reconocido primero teóricamente por los matemáticos que fueran aplicables al sonido: «1.<sup>a</sup> Ley. Si el radio de la onda, rayo sonoro, en el punto de la superficie de separacion de dos medios cae perpendicularmente, no sufre desviacion aunque varíe la velocidad del sonido. 2.<sup>a</sup> La razon del seno del ángulo de incidencia al seno del ángulo de refraccion es constante para cualquiera inclinacion de los rayos. 3.<sup>a</sup> Estas dos rectas y la normal se hallan contenidas en el mismo plano.»

¿A qué será debida, en último caso, la refraccion? A la



desigual velocidad con que se transmiten las ondas por los dos medios; y como en los gases de mayor peso específico camina el sonido más despacio que en los menos densos, el efecto será igual al de la luz ó el calor cuando sus rayos atraviesan los sólidos con más lentitud que los gases transparentes.

Y vista la analogía del fenómeno, ¿no pudiera servir una gran lente de vidrio, ó matraz lleno de agua, para concentrar el sonido lo mismo que la luz? De ningún modo: porque aún supuesto un paralelismo perfecto, que inmediatamente veremos no existe, entre la transparencia luminosa y sonora, las ondas de la última especie se propagan por los sólidos y líquidos con velocidad mucho mayor que por la atmósfera; lo contrario precisamente que sucede á las radiaciones por estos cuerpos transmitidas. Así fué indispensable en el experimento anterior una lente de gas más pesado que el aire; pues á igual fuerza elástica disminuye la velocidad del sonido en los gases proporcionalmente á la raíz cuadrada de su densidad, según llevamos repetido en diferentes ocasiones.

### III.—*Trasparencia y opacidad de la atmósfera para las ondas sonoras.*

Acabamos de hablar del cambio que experimenta la dirección del sonido al pasar de un medio á otro; pero hay cuerpos que, por el contrario, oponen una resistencia casi invencible al acceso de las ondas sonoras transmitidas por el aire. Esta opacidad y transparencia fónica no guarda paralelismo ni relación alguna con la diafaneidad. Basta cerrar las vidrieras de nuestro balcón para que se debilite un poco el ruido de la calle, sin que dejen de verse los objetos con claridad, al paso que las vibraciones producidas por un coche que rueda sobre los adoquines, se propagan á través de las puertas y paredes, que son opacas, y sin embargo retiemblan mientras pasa el vehículo por delante de la casa, transmitiendo admirablemente el sonido. Los artilleros y otras personas, cuyo tímpano se halla habitualmente expuesto á violentas sacudidas, suelen preservarle de una rotura y sordera inminente, tapando el orificio auditivo con *algodon en ra-*



ma, lana ú otros cuerpos semejantes, que todo el mundo sabe no dejan oír, ni tampoco ver, á través de su espesor.

La detencion del sonido en todos los casos, se explica: 1.º Porque la onda aérea que llega tiene una cantidad de movimiento insignificante, comparada con la necesaria para conseguir que entren en vibracion los sólidos macizos, influyendo tambien su elasticidad en el resultado. 2.º Por la estructura del medio trasmisor; es decir, que si ofrece muchos cambios de densidad y elasticidad, habrá otras tantas reflexiones y refracciones con la pérdida consiguiente de energía sonora. Lo mismo que en el primer tomo de los *Estudios Físicos* dijimos sucedia al atravesar la luz los cuerpos pulverulentos.

Esta analogía, entre ambos órdenes de fenómenos, dió la clave de extrañas irregularidades descubiertas por Tyndall en la trasmision de los sonidos con motivo del establecimiento de faros acústicos, que sustituyeran en Inglaterra las señales enviadas por la luz cuando la densa niebla intercepta los rayos á muy corta distancia del puerto.

Antes se creía que tambien era obstáculo á la propagacion del sonido la niebla, la lluvia y principalmente la nieve; y se tenía por dudoso é inexplicable que en un día tranquilo y despejado dejaran de percibirse los ruidos fuertes no lejanos; pareciendo inverosímil que espectadores de alguna batalla aseguren haber presenciado las maniobras del combate sin oír los cañonazos, como si todo aquel aparato guerrero sólo fuera un simulacro inocente y mudo, cuando la muerte, por desdicha, cebaba su guadaña destructora en innumerables víctimas de ambos ejércitos enemigos.

Se comprende la posibilidad de estos y otros hechos parecidos en vista de los resultados que obtuvo el eminente físico citado comparando el sonido de un silbato y una *sirena* enormes, al ruido del cañon que de tiempo en tiempo se disparaba miéntras los observadores se iban alejando. Repetidas experiencias, ejecutadas á diferente hora del día y en condiciones atmosféricas diversas, obligan á la admision del siguiente principio que las resume: «No guardan relacion alguna la transparencia del aire para la luz y el sonido.» Supuesto que en las horas de más calor,—variando la naturaleza del suelo por tierra y con la presencia de islotes en el



mar,—el aire puede caldearse y dilatarse más en unos puntos que en otros, con lo cual pierde su homogeneidad, y sin disminuir en nada su transparencia óptica, se dificulta extraordinariamente el paso del sonido. Al contrario, si la atmósfera presenta una temperatura y densidad igual por todas partes, á pesar de las gotas líquidas ó copos de nieve suspendidos, caminará majestuosamente como un todo la gran onda sonora sin hallar tropiezo, allí donde la diminuta vibracion luminosa se detiene total ó parcialmente.

Conviene fijar nuestra atencion estableciendo estas aproximaciones entre fenómenos de origen diverso, porque es un medio excelente de penetrar en el intrincado laberinto donde recatada la Naturaleza guarda el secreto de las leyes que presiden la magia de sus obras, aún más bellas y admirables por la riqueza y variedad de formas con que se nos presentan. Empeño vano querer explicarlas ligeramente y como á vuela pluma: su conjunto nos aturde, y el entendimiento no puede abarcarlo desde luego; en cambio, la simple acumulacion de embarazosos, pero necesarios detalles, repugna y llega á ser incompatible aún con el espíritu observador, sin el auxilio de afinadas comparaciones: con ellas resaltan mejor los caracteres de los fenómenos y podremos alcanzar tambien á su debido tiempo una síntesis más comprensiva y fecunda, vedada por completo á quien se contenta con registrar las particularidades del hecho aislado.

Las indicaciones que anteceden acerca de la transparencia y opacidad de la atmósfera para el sonido nos permiten explicar algunos efectos de pérdida ó aumento en la intensidad sonora, incomprensibles por las otras causas determinantes del fenómeno, las cuales se estudiaron en lugar oportuno. No es únicamente el silencio de la noche, sino la homogeneidad de la atmósfera que reina con la ausencia del sol, quien determina la percepcion del sonido á mayor distancia que durante el dia. En prueba de ello, puede citarse la observacion de Humboldt que afirma haber oido con más claridad que por el dia la gran cascada del Orinoco durante las noches, las cuales en aquella region americana son muy ruidosas, á consecuencia del rugir espantoso de las fieras, los gritos de horror y angustia de sus víctimas, y el molesto zumbido de innumerables falanjes de insectos. Es-



tenuados los animales por el sofocante calor, buscan durante el día un refugio en sus madrigueras, reinando sepulcral silencio; y no obstante, llegaba debilitado el ruido de la cata-rata; porque entre ésta y el observador se extendía una llanura, donde esparcidas por el verde suelo había multitud de rocas peladas, las cuales con la absorcion de los rayos solares se caldeaban mucho más que la yerba, produciéndose á su contacto corrientes parciales de aire dilatado, que al ele-varse destruían la homogeneidad de la atmósfera. El mismo Humboldt atribuye á esta causa la pérdida de la intensidad del sonido observada en las horas de calor.

#### IV.—*Inflexion del sonido.*

Tanto la *reflexion* como la *refraccion* se producen de igual manera cuando llega el movimiento ondulatorio á un cuerpo ó espacio limitado, que al tocar la superficie de separacion de dos medios con extension indefinida por donde aquel avanza; pero la *inflexion* y la *resonancia* tienen lugar solamente en los cuerpos de dimensiones proporcionadas al radio y energía de las ondas. Supongamos un peñasco aislado en alta mar, y que una gran ola venga á encontrarle: en tal caso parece que se doblega ésta, y se encorva y le rodea por todas partes. Este es el fenómeno de la *inflexion*; y su análogo para las ondas luminosas ha recibido el nombre de *difraccion*.

Newton, que había observado cómo el oleaje circunda los pequeños cuerpos que están en la superficie del agua, desechaba la hipótesis de las vibraciones para explicar la luz y el calor radiante; porque, según dicho sábio, de ser cierta tal hipótesis no deberian proyectar sombra los cuerpos opacos, á consecuencia de ceñirlos por todos lados la onda etérea, cual sucede con el impetuoso oleaje del Océano, cuyo movimiento se trasmite también hácia la cara del obstáculo de la parte contraria á la direccion en que llegan las olas. Esta dificultad ha desaparecido hoy: han demostrado los físicos que deben existir sombra é inflexion parcial para el caso de la luz, igualmente que para el sonido; pues la sombra, en teoría general, equivale al silencio de las vibraciones, al reposo en todo fenómeno mecánico.



Las sombras del sonido se comprueban escuchando detrás de un obstáculo capaz de detenerle; v. gr., observando desde alguna distancia los cambios de intensidad del ruido que produce la marcha de un tren por terreno accidentado, según queda al descubierto sobre un terraplen y en sitio llano, ó bien se nos oculte, y casi nada se oye entónces, al pasar por un desmante de la vía. Basta, pues, la interposicion de un cuerpo de gran tamaño para que el sonido se debilite mucho; pero no se intercepta por completo en virtud de la inflexion. Un caso notable presenció Tyndall, donde este fenómeno adquirió gigantescas proporciones.

Cerca de Erith, Inglaterra, voló un polvorin; sucediéndose á la terrible explosion tan violenta onda sonora, que llegó al pueblo, distante algunos kilómetros del lugar del siniestro, y rompió las vidrieras de casi todas las ventanas; con la particularidad de haber saltado indistintamente los cristales de las fachadas vueltas á espaldas ó de frente al polvorin incendiado. Este hecho revela que al llegar la onda á cada manzana ó casa aislada debió dividirse en el primer momento en dos porciones, que rodearon el edificio á derecha é izquierda hasta ceñirle por completo, y con tal fuerza, que entónces estallaron los vidrios á la presion de la onda. Salváronse sin embargo del general cataclismo la mayor parte de los que tenia la iglesia, sencillamente, porque en sus vidrieras estaban sujetos al marco por tiras de plomo que cedieron al empuje por la flexibilidad del metal; empero si no quebrados, quedaron hundidos hácia adentro los cristales de las ventanas abiertas á todos los rumbos. La reaccion del aire interior que debió seguir á la compresion exterior fué impotente para enderezar las vidrieras.

#### V.—Resonancia.

No todos los cuerpos *resuenan*, respondiendo con igual facilidad á las vibraciones que parten de otro. Parece necesaria á los dos una disposicion especial para *sonar* del mismo modo, ó bien que tengan cierta elasticidad y masa proporcionada. Dichas circunstancias favorables concurren en los cuerpos que están al *uníson* y repiten ordinariamente entónces la misma nota musical.



Cantando enfrente de un piano, del cual se han quitado los apagadores, determinadas cuerdas responden á la voz. Si hacemos vibrar un diapason separado de su caja, y cuando al cabo de un rato ya no es posible percibir su nota, se pone encima de una probeta, vaso de vidrio equivalente á un tubo cerrado, que se acorta echando agua poco á poco, llegamos á constituir así la columna de aire capaz de vibrar á compás del diapason; reforzándose el sonido en términos de oírle cuantas personas atentas al experimento encierra un salon espacioso. Si retiramos el diapason, permanece en aparente silencio; pero entona de nuevo su dulce canto con sólo aproximarle al borde de la campana. Añádanse ó quítense cada vez mayores porciones de líquido, y disminuye primero y desaparece luego toda resonancia; la longitud de la columna de aire, vibrante al máximum, es la misma que debe tener la caja del instrumento, con la cual puede repetirse la experiencia. Toma ésta gigantescas proporciones, disponiendo un ancho tubo de carton, formado de dos que enchufan y que á modo de mortero dirigimos hácia un gran timbre; hacemosle vibrar por medio de un golpe ó con un arco de violon espolvoreado de resina, y resulta, dando la longitud conveniente al tubo, un sonido tan agrandado y lleno, que más que nota parece un potente bramido, sin dejar por eso de ser agradable, musical.

¿Cómo se produce la amplificacion del sonido en estos casos? Por el sincronismo de la columna de aire encerrada en el tubo con las pulsaciones de la nota reforzada. Al hablar de los tubos sonoros, insistiremos en otros pormenores interesantes, y quedará completamente esclarecido este punto.

Por otra parte, nos son familiares algunos ejemplos de considerables efectos mecánicos, debidos á pequeñas impulsiones repetidas con periodicidad. El más violento esfuerzo apenas movería una gran campana; pero continuando los alternativos impulsos rítmicos de menor potencia, se consigue voltearla enteramente. ¿Quién desconoce el medio de *tomar vuelo* en el columpio, valiéndose de acordados empujes?

Los peones que trasportan cubos ó calderos llenos de agua y caminan á compás, ven con frecuencia, aunque sin causa aparente, saltar el líquido de una manera brusca, y se



debe á la acumulacion de los vaivenes que recibe la vasija, y evitan por eso el derrame con sólo variar de paso. Otro tanto pueden observar los viajeros de un ferro-carril en las botellas con agua cuando marcha el tren; los sobresaltos del líquido toman origen é incremento en las trepidaciones correspondientes al tamaño de la vasija, entre las diversas que parten del coche.

Ahora comprenderemos fácilmente, que estando colocados á bastante distancia dos diapasones unísonos, puesto en vibracion uno de ellos emite ondas sonoras que llegan hasta el otro y le obligan á vibrar sincrónicamente, á pesar de su masa, grande en comparacion de la cantidad de movimiento que lleva el aire, por lo cual al principio le opusiera alguna resistencia. Para cerciorarse del hecho, se coge con la mano la horquilla del primer diapason y queda en silencio, pero se deja oír, como un eco debilitado, otra nota idéntica, procedente del diapason que no habíamos tocado.

Esto nos explica de qué modo pudimos tranquilizar en cierta ocasion á un jóven músico que, despues de largo luto por la muerte de su padre, comenzó un dia á tocar su violin; quedando asombrado al oír repetidas las mismas notas por otro violin colgado en la pared, con el cual en mejores tiempos su padre le acompañaba. Atribuyólo á efecto sobrenatural, y muchacho de imaginacion exaltada, no hubiera dado crédito á la verdad, si no se convenciera de que la misteriosa mano oculta en el instrumento, era impotente para reproducir las notas musicales estando muy desacordes los dos violines.

Parece, no obstante, contradictorio lo que llevamos dicho acerca de la predileccion ó facilidad mayor que presenta la porcion de aire encerrado en una cavidad para responder á determinada nota, con el uso de las cajas sonoras que desde tiempo inmemorial llevan los instrumentos musicales que producen sonidos débiles, en especial los de cuerda, para amplificar indistinta y proporcionalmente las notas más variadas. El fenómeno de la resonancia en el caso presente, es muy complejo; vibra la delgada lámina ó tabla elástica á impulso de las cuerdas á quienes se fijan de modo conveniente para conseguir el mayor efecto posible; el aire del interior obedece entónces á cuantas notas le transmiten las paredes



de la caja, si tiene ésta la forma y dimensiones que la práctica recomienda. El objeto apetecido se alcanza siendo muy baja la nota propia de la oquedad; pues la resonancia se extiende también á otras notas más agudas, las *armónicas*, que según veremos adelante, constan de un número de vibraciones, múltiplo de las que forman la primera ó *fundamental*; y es claro que habrá una série de múltiplos más completos, que comprendería todos los enteros, si el primero es la unidad, y por consiguiente, casi todas las notas serán posibles, siendo muy pequeño el número de vibraciones á que propia ó principalmente corresponde la resonancia de la caja.

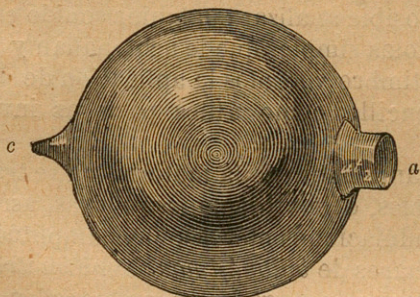


Figura 3.ª

Por otra parte, si se comprende que un cuerpo de considerable masa puede vibrar al impulso de los reiterados, débiles choques de las ondas aéreas lanzadas desde el otro cuerpo lejano que está al uníson con el primero, tampoco debe extrañarnos la universal influencia ejercida por las cuerdas sobre el gas comprendido dentro de las cajas resonantes, en virtud de las fuertes y directas sacudidas que trasmite la madera. Si se nos permite el símil, diríamos que el aire de las cajas del violin ó guitarra, es un prisionero sumiso que obedece á cuantas voces imperiosas le increpan: al paso que el aire contenido en un tubo sencillo, como la caja del diapasón, goza de verdadera autonomía y sólo responde á los halagos ó provocaciones capaces de excitar su humor un tanto caprichoso.

Los resonadores de Helmholtz son tubos, y mejor esferas huecas, figura 3.ª, que llevan dos aberturas: la más ancha *a*, prolongada en cuello ó pequeño tubo sirve para recoger las



ondas sonoras, y la más estrecha está en un apéndice cónico *c*, que se introduce en el oído cuando queremos percibir reforzada la nota característica del resonador; el cual permanece silencioso ante cualquiera otra, y nos sirve admirablemente por eso para distinguir la suya propia (\*) en los sonidos más complejos. Conviene experimentar de manera que únicamente pueda entrar el sonido por la esferilla, y aconseja Helmholtz rodear el cono de ésta con una masa de lacre reblandecido por el calor, la cual se amolda al orificio externo del oído que escucha, cerrando el otro con un tapon de la misma sustancia y por igual procedimiento fabricado.

Se comprende que con una buena colección de resonadores-tipo será posible analizar cualquier sonido especial, averiguando las notas simples que le acompañan y constituyen. Al estudiar el timbre veremos la aplicación de unos instrumentos tan sencillos como útiles para las investigaciones acústicas.

En el incesante bullir de la materia, ya se trate de movimientos tangibles, ó de vibraciones sonoras, así como de las rapidísimas ondulaciones etéreas, cuya amplitud representa algunos centenares de *billonésimas de milímetro*, y por medio de las cuales se propaga la luz, en todos los casos veremos confirmada esta propiedad general de la resonancia, que no viene á ser otra cosa sinó un modo particular de transmitirse la *energía*.

Por eso el diapason que poníamos encima de la campana de vidrio para hacer resonar la columna de aire cesaba más pronto de vibrar que teniendo el instrumento separado de aquella; pues en virtud del ritmo establecido, su fuerza viva se gasta en producir la vibración de una masa mayor, á saber: la suya propia y la del cuerpo resonante. Otro tanto sucederá si la horquilla está puesta sobre la caja; pero no vibrando aislado el diapason, en virtud de la pequeña superficie que entónces ofrece el aire ambiente á quien trasmite débiles oscilaciones directas, y persisten, en cambio, durante más tiempo.

(\*) Algunas veces responden los resonadores á notas más graves que la suya, en el caso de hallarse ésta comprendida entre las armónicas del sonido examinado; pues entónces la correspondiente al período de vibración de la nota fundamental de la esfera determina su resonancia.



No terminaremos el exámen de esta materia, sin advertir que *el ruido del mar*, que creen escuchar los muchachos cuando aplican contra la oreja algunos caracoles, se debe tambien á un efecto de resonancia; pues en la cavidad de la concha se refuerzan ciertos ruidos inapreciables, de los infinitos que incesantemente cruzan la atmósfera en todas direcciones. El mismo fenómeno en parte, la trasmision del sonido por tubos acústicos imperfectos, y sobre todo, la reflexion en las paredes, es ordinariamente origen de la otra especie de resonancia que ha dado celebridad á ciertas grutas misteriosas y galerías subterráneas, donde los sonidos de mediana fuerza se agigantan, y repercutidos acá y allá simulan ayes y suspiros dolientes, ruidosas imprecaciones, la confusa grita y clamor de multitud alborotada, ó bien el retumbar del trueno impetuoso. Un ejemplo de los más notables citado por los autores, donde se observan estos sorprendentes efectos de resonancia, es la renombrada *oreja de Dionisio*, en los alrededores de Siracusa, que se cree construida por el Tirano para servir de cárcel á prisioneros de alguna importancia. En el extremo de una caverna, en forma de S, cuya longitud es 15 metros, estaba el calabozo, y cualquier pequeño ruido que se produjera allí, le oía perfectamente el guardian desde la entrada del subterráneo en donde tenía su vivienda. Parece que un ancho surco ó canal abierto en el techo de la gruta, y recorriéndole por completo, terminaba en las dos habitaciones, era la causa principal de aquella perfecta trasmision del sonido que facilitaba la vigilancia. Cuando los trenes atraviesan un túnel, en largas alcantarillas (\*), gritando desde el brocal de un pozo se amplifica bastante el sonido para que todo el mundo tenga alguna experiencia de tales fenómenos.

---

(\*) Es considerable el abultamiento de la voz en una que por debajo sirve de paso desde el Campo del Moro á la Casa de Campo, en Madrid.



## CAPITULO III.

I. Tono: preliminares.—II. Modo de contar las vibraciones. Procedimiento acústico de comparacion: rueda dentada: sirena.—III. Método gráfico. Fonautógrafo: fonógrafo.—IV. Límite de los sonidos perceptibles: longitud de las ondas sonoras.

## I.—Tono: preliminares.

Hasta aquí nos hemos ocupado de la general forma y modo como se produce y marcha la onda sonora, y de los principales fenómenos mecánicos que le acompañan, los cuales se traducen por impresiones acústicas correlativas. Para ser consecuentes con la exposicion adoptada, hemos debido examinar rápidamente las vibraciones originarias del centro sonoro; es decir, se ha prescindido de diversas particularidades que aquéllas ofrecen, conservándose á través de los medios elásticos por donde se propagan, y llegando á nuestro oido, que las aprecia como verdaderos *caractères diferenciales* de cada sonido.

Una excepcion se ha hecho, no obstante, en favor de la intensidad; porque si bien depende este *carácter* de la amplitud de las vibraciones que efectúa el cuerpo sonoro mismo, disminuye necesariamente la velocidad de las partículas de aire que hacen el tímpano conforme se alejan las ondas; y era imposible, por lo tanto, estudiar la marcha de éstas sin hablar de la fuerza del sonido, cuyos cambios producen efectos sorprendentes en cualquier oreja humana capaz de oir, pues lo mismo abarcan los sonidos melodiosos que los ruidos insoportables.

Entre las cualidades distintivas de un sonido, además de la intensidad, se aprecia desde luego la altura ó *tono*, por el cual decimos que tal sonido es *grave* ó *bajo*, como el de una gruesa cuerda ó tambor destemplado; y tal otro es *agudo*, como el de una prima de guitarra bien tirante. Este carácter de las notas ha sido utilizado en todos los tiempos para halagar nuestro oido con los más puros acordes, sábiamente combinados por la Música.

Empero, ¿no es vergonzoso que el hombre, á la manera de las aves canoras, pase su vida entera repitiendo incesan-



tes trinos y gorgeos, sin parar mientes en el porqué de tantas maravillas? ¿De qué dependerá el tono, propiedad misteriosa del sonido? De la rapidez con que se suceden las vibraciones, ó sea del número de las producidas en un tiempo dado.

Para que un sonido merezca propiamente el calificativo de *musical*, aquéllas deben ser de igual y suficiente duración, sucediéndose en *movimiento rápido y periódico*; faltando el isocronismo ó la continuidad en las vibraciones, nos molestan con su estridencia; ejemplo, el chirrido de la lima; ó si bruscamente se producen y acaban, engendran ruidos violentos y desápacibles, como el estampido de un cañonazo.

Ahora bien, las cuerdas ó membranas flojas presentan ménos elasticidad y vibran por eso con más lentitud cuando se las golpea; de aquí las notas graves, melancólicas, que lanzan al aire signo de fúnebre tristeza. Pónganse tensas, lo cual aumenta su elasticidad y la consiguiente rapidez de las vibraciones; subirán de tono las notas, saltando entónces agudas, alegres, que nos reaniman con su frecuencia y viveza. Lo mismo sucederá en todos los casos: la altura crece con el número de vibraciones por segundo, y cuando disminuye este número, baja el tono ó aumenta la gravedad de los sonidos.

Una duda podrá caber al lector: ¿será nuestra afirmacion una simple conjetura, ó tienen los físicos algun medio que les permite contar con exactitud las vibraciones de cada nota? Con matemática exactitud y por diversos procedimientos cuyos resultados son concordantes, se cuentan hoy las vibraciones. Indiquemos los principales métodos usados.

## II.—*Modo de contar las vibraciones. Procedimiento acústico de comparacion: rueda dentada: sirena.*

Siendo en general pequeñas y muy rápidas las vibraciones que engendran los sonidos, ofrecia sérias dificultades el apreciar su amplitud, número y forma. Concretando su investigacion solamente al número de vibraciones por segundo que producen una nota determinada, Savart discurrió contar en otro cuerpo una série de choques, repetidos con la



frecuencia necesaria hasta causarnos la impresion de continuidad é idéntico tono que aquélla. Por tal motivo, denominaremos *método de comparacion* á éste y á cuantos se fundan en el mismo principio.

Imagínese que una rueda con dientes de igual anchura, separados por huecos perfectamente iguales, gire tocando el borde de un naípe ú hoja metálica delgada. Si la movemos despacio se oirá la sucesion de choques distintos por cada diente que pasa, al modo que se produce el ruido de una carraca; pero haciendo girar la rueda con suficiente rapidez, los choques se confunden por último en un sonido continuo, cuya altura podrá subir tambien, llegando á la exacta coincidencia ó uníson con la nota que tratábamos de apreciar. Como es fácil enlazar la rueda dentada,—por medio de un tornillo sin fin,—con una aguja ó saetilla que marca cuántas vueltas dió aquélla en un tiempo determinado; multiplicando éstas por el número de dientes se obtiene el de vibraciones de dicho sonido.

Análogo comparador al de Savart, en su fundamento por lo ménos, es la *sirena* de Cagniard-Latour, ya bastante extendida entre nosotros. En lugar de la série de golpes producidos por la rueda dentada, se consigue ahora el uníson medido en virtud de los soplos ó bocanadas sucesivas del aire impulsado por un gran fuelle de doble corriente. El instrumento es de laton, y forma su parte inferior una caja cilíndrica cuya tapa fija lleva orificios equidistantes, abiertos sobre una circunferencia, los cuales corresponden á otros tantos horadados en un disco movable que al girar interrumpe con regularidad la salida del gas ó líquido; porque tambien canta la sirena bajo el agua, y de aquí proviene su nombre mitológico.

Es de advertir que los taladros son oblícuos á las caras de ambos discos; de manera que forman conductos acodados, y al escapar el aire por ellos *reacciona*, empujando al disco móvil en sentido contrario. Cada vez que pasa uno de los orificios de este disco enfrente de otro fijo en la base del cilindro, se superponen todos y sale ó sopla el aire, cesando despues hasta la coincidencia del inmediato agujero del disco giratorio; y puesto que su movimiento resulta por la corriente misma del flúido, en virtud de la disposicion antedi-



cha, pisando con más fuerza ó con presión mayor en la tabla de los fuelles, se aumenta la rapidez de las pulsaciones hasta alcanzar el uníson con la nota que procurábamos medir. También acompaña á la sirena su correspondiente contador, como el ántes descrito para la rueda dentada.

Helmholtz ha modificado el instrumento combinando dos sirenas, que pueden cantar á un tiempo la misma ó diversas notas, para lo cual llevan sus discos respectivos varios círculos de orificios, y se puede, á voluntad del operador, dejar paso al aire por séries de igual número de agujeros ó por aquéllas en que guarden éstos la relación conveniente. Tal disposición nos permite comparar las notas de la escala musical, comprobándose, como luego diremos, otros fenómenos y leyes interesantes.

Lo mismo la rueda de Savart que la sirena, exigen el oído ejercitado de un músico que sepa apreciar los intervalos y la exacta coincidencia de la nota del instrumento con aquella cuyas vibraciones se cuentan: además, el atender á un tiempo al cronómetro y á mantener el uníson perfecto mientras dura el experimento, requiere habilidad y mucho esmero si los resultados, cuando no exactos, han de ser algo aproximados. El citado profesor Helmholtz, parece haber conseguido obviar en parte estos inconvenientes, regularizando el movimiento de una sirena especial, y al efecto se vale de una máquina electro-magnética, cuya corriente se interrumpe cuando la velocidad excede el límite prefijado.

### III.—*Método gráfico. Fonautógrafo: fonógrafo.*

La importancia del *método gráfico* estriba en su gran sencillez y fácil ejecución de las maniobras necesarias; pues el mismo cuerpo vibrante deja un trazo de sus movimientos, que nos sirve para contar luego despacio cuántas han sido las vibraciones y para reconocer también la marcha creciente ó decreciente de su intensidad, con otras particularidades que en breve deberán ocuparnos.

Suponed un diapason que tenga una aguja fina pegada con cera hácia el extremo de una de sus ramas. Si apoyamos ligeramente la puntita sobre una hoja de papel ó lámii-



na de vidrio, recubiertas con negro de humo (\*), que se vaya corriendo siempre en la misma direccion, queda señalada una raya blanca, derecha cuando no suena el diapason; pero si vibra miéntras avanza el papel, la línea, en vez de recta, será tortuosa ú ondulada, con tantas sinuosidades cuantas hayan sido las vibraciones.

Falta únicamente saber con exactitud el tiempo que dura el trazado de la curva; y para ello se dispone un cronómetro marcador que inscribe un punto por cada segundo: quedando limitada así entre dos señales la porcion de línea cuyas ondulaciones deben contarse. Otras veces se emplea un diapason que da un número conocido de vibraciones por segundo, á fin de trazar con él una sinuosa paralelamente á la inscrita por la varilla, y se determinan las oscilaciones de ésta comparando los números de festones correspondientes á la misma porcion en las dos curvas (\*\*).

El método es ingenioso, de fácil ejecucion y de sorprendente fidelidad y exactitud, fuera del error que introduce en el número de vibraciones de la varilla la adiccion del estilito. Pero, ¿cómo contarlas en la voz humana, y cuando sean producidas por los demás cuerpos sonoros, donde no puede fijarse el pequeño punzon impresor?

Modifícase el procedimiento para estos casos obligando á vibrar sincrónicamente con el instrumento productor del sonido, una membrana tensa que lleva la cerda ó seda de jabalí destinada á trazar las ondulaciones en el papel ennegrecido (\*\*\*), el cual va arrollado ahora sobre un cilindro giratorio, cuyo eje tiene el correspondiente tornillo que le permite avanzar un paso de rosca por cada vuelta: de este modo resulta inscrita una verdadera hélice sinuosa, y de haber movimiento de simple rotacion, se superpondrian los

(\*) Para recubrir la hoja ó lámina con negro de humo, se expone humedecida á la llama fuliginosa que se produce quemando trementina.

(\*\*) La proporcion que se establece, dirá:  $\frac{s}{s'} = \frac{n}{n'}$ . Las  $s, s'$  representan los números de ondas, y las  $n, n'$  los de vibraciones por segundo en el diapason y varilla respectivamente.

(\*\*\*) Para fijar esta línea, habiendo cortado el papel á lo largo de una generatriz, se introduce en un baño de alcohol; y algunos todavía le barnizan despues de bien seco.



diversos trazos de la seda en una misma circunferencia festoneada. Recoge las ondas de cualquier origen sonoro por su extremo abierto, una gran caja parabólica ó elipsoidal de zinc, y cierra su otra extremidad la membrana vibrante sujeta entre dos aros, ocupando su centro precisamente el foco del paraboloide. El instrumento, en conjunto descrito, se denomina *fonautógrafo*; fué ideado por Scott y construido admirablemente por el Sr. Koenig, y sin disputa ha sido el fundamento de posteriores ensayos *logográficos*, en que sólo falta interpretar, consiguiendo que desaparezcan algunas irregularidades, las sinuosas características de cada palabra, para obtener su fiel escritura, simultánea con la pronunciación, sin necesidad de taquígrafos ni de otros hábiles pendolistas.

Hasta hace muy poco tiempo, el problema de reproducir por algun mecanismo la voz humana, se consideraba tan difícil, que casi rayaba en lo imposible alcanzar resultado satisfactorio en palabras algo complicadas; no obstante haberse construido ya instrumentos que, á imitación de nuestra laringe, llevaban membranas, vibrando por soplos ó corrientes interrumpidas de aire, las cuales llegaban á repetir *mama* y otras voces de sencilla pronunciación. Ultimamente, el Sr. Faber, Profesor de Viena, ha perfeccionado, con paciencia verdaderamente alemana, este sistema de *máquina parlante*, dando á su aparato una boca que aumenta y disminuye de capacidad rápidamente; tiene labios y lengua de goma elástica, y consigue remedar las consonantes más difíciles como la *r*, con exactitud maravillosa.

Reservado estaba al genio inventor de Edison realizar el *portento inverosímil*, resolviendo de una manera completa el problema que preocupaba á los físicos; y siguió para ello una marcha en todo diferente á la de sus predecesores. No trató el ilustre norte-americano de imitar la fonación con artificios equivalentes al juego de los órganos bucales, sino de producir ondas sonoras, idénticas á las que brotan de nuestros labios, solamente en cuanto determinan el mismo efecto mecánico sobre el tímpano y el nervio acústico. Observando que el fonautógrafo escribía las palabras, aunque en signos ininteligibles hasta entónces, se propuso y ha conseguido con su *fonógrafo*, no ya descifrarlos, sino tradu-



cirlos en la voz originaria con su entonacion y timbre característicos.

Consiste el fonógrafo de Edison (fig. 4.<sup>a</sup>), en una trompetilla *T*, con su lámina delgada, como la del teléfono, á la cual va enlazado mediante un resorte, ó directamente, el estilito que marca los puntos de la línea ondulada sobre una hoja de papel fuerte de estaño, arrollada en el correspondiente cilindro rotatorio *C*. Presenta la superficie cilíndrica un surco helizooidal, cuyo paso de rosca es idéntico al del eje. Con la disposicion adoptada, el cilindro avanza al mismo tiempo que gira, conforme dejamos descrito al hablar del fonautógrafo, y resulta además que, una vez apoyado el extremo del estilo sobre un punto en hueco, continúa trazando las impresiones en el papel de estaño sin salirse de la hélice acanalada.

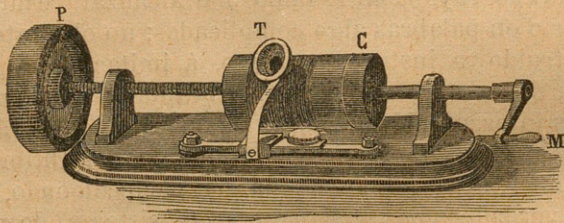


Figura 4.<sup>a</sup>

Mientras se habla, damos vuelta al manubrio *M* en un sentido, y se escribe, por decirlo así, la oracion ó discurso; despues separamos la trompetilla con la punta impresora y desandamos el camino, volteando la cigüeñuela en sentido contrario, hasta que coincida la punta impresora con la primera señal grabada. A partir de esta posicion, repetimos exactamente el movimiento inscriptor, procurando llevar la mano con la misma velocidad, y entónces las depresiones, imperceptibles en algunos puntos de la hoja metálica, transmiten recíprocamente á la aguja vibraciones idénticas á las grabadas sobre el estaño; vibra tambien á impulso del estilo la laminilla telefónica como ántes, y se reproduce con sorprendente fidelidad la voz metálica, algo ronca y chillona, sin que sepamos de dónde sale, ni tampoco quién



la articula, á no esconderse dentro del cilindro mágico algun encantador pigmeo que repite una por una nuestras palabras, las cuales no serán ya fugaces, ni se *las llevará el viento*, segun proverbialmente se decia: puesto que en lo sucesivo, recogidas en el papel *fonografiado*, quedarán indelebiles; serán imperecederas como el espíritu y la idea; pudiendo escucharlas nuestros sucesores cuando hayamos desaparecido de la escena viviente y vuelto al polvo de que procedemos.

A poco que reflexionen nuestros lectores, comprenderán algunas imperfecciones, y asimismo la manera de evitarlas, halladas en el fonógrafo primitivo y sencillísimo que acabamos de describir. En primer lugar, aumentando la velocidad del manubrio, se suceden las vibraciones con mayor rapidez y aumenta la altura del sonido; lo cual, si entre cortos límites no ofrece un inconveniente grave para reproducir la voz humana en una conversacion, altera los acordes de las notas en un trozo de música al repetirlos con el instrumento parlante, y de consiguiente, es tambien ménos propio para el canto. Se corrige en parte el defecto por medio de un volante ó disco muy pesado *P*, que lleva el eje en su extremo opuesto al manubrio y cuya gran masa retarda el incremento de velocidad, la cual, una vez adquirida, se conserva despues durante cierto tiempo. Hoy se construyen fonógrafos que reciben movimiento uniforme con auxilio de un aparato de relojería.

El papel de estaño es blando, y si esto facilita la inscripcion, no puede ser en cambio tan clara, borrarándose á las pocas repeticiones. Parece ventajoso el empleo de hojas de cobre, sirviendo de estilito una punta de rubí que tiene mucha dureza, y tambien se amplifican de este modo los sonidos reproducidos, que se perciben así á cien y más metros del aparato. Con el mismo objeto se dispone una especie de embudo ó bocina en la trompetilla, consiguiéndose además inscribir la palabra sin esfuerzo ni aproximar tanto los labios á la embocadura.

El extender sobre un disco el papel, de plano y no arrollado en un cilindro, la interposicion de un paño con numerosos pliegues delante de la boquilla fonográfica mientras está hablando, con el fin de apagar cierto chirrido de la hoja



metálica, y otras muchas advertencias y modificaciones que cada día se anuncian, nos permiten abrigar la fundada esperanza de oír en breve plazo clara y distinta la palabra de las personas queridas, mandando á nuestro fonógrafo que dé voz y cuerpo á la carta escrita por el ausente sobre el milagroso papel de estaño. Así escucharíamos también á nuestro sabor los provincianos, aquellos elocuentes discursos pronunciados en los centros literarios y políticos de Madrid, leídos con tanta avidez ahora por todos,—como fastidioso hastío suelen inspirar los asuntos científicos,—si pudiera darse bastante sensibilidad y precisión á la portentosa máquina de Edison, para que funcione á larga distancia y sin molestia alguna por parte del que perora.

IV.—*Límite de los sonidos perceptibles: Longitud de las ondas sonoras.*

Provistos los físicos de los medios indicados para contar las vibraciones de una nota, sobre todo, empleando la doble sirena, puede demostrarse que *«idéntico tono corresponde siempre al mismo número de vibraciones; y recíprocamente, sonidos de igual número de vibraciones tienen el mismo tono.»* También se comprende la comparación aritmética de las notas musicales, deducida por Pitágoras, de las longitudes de las cuerdas que producían la gama de los antiguos griegos; aunque la verdadera causa de la variedad de tonos quedó todavía oculta por muchos siglos.

No hay dificultad ya en prever las curiosas investigaciones hechas con el fin de determinar el límite de los sonidos perceptibles, que para tener buen empleo en música deben hallarse comprendidos entre 27—algunos quieren no baje de 40—y 4.000 vibraciones completas por segundo; oyéndose por oídos delicados sonidos de 16 á 37.000 vibraciones.

Divertidos experimentos pueden repetirse para comparar la diversa aptitud de varias personas en percibir sonidos. Tóquense pitos cada vez más cortos y llega el caso de que mientras para algunos observadores no se altera el silencio, lastiman y hieren el tímpano de los otros, agudísimas, penetrantes notas lanzadas por los tubos muy cortos, al vibrar



con suma rapidez la columnita de aire en ellos encerrada.

¡Admirable máquina la del cuerpo humano! ¡Portento sin igual el de nuestro sistema nervioso! No existe en ninguna parte el reposo: la misma materia inorgánica sin cesar se conmueve, vibra. Las vibraciones son lentas, tardan más de  $\frac{1}{16}$  de segundo, pues las aprecia el tacto y el oído como una serie de choques, ó la vista como movimiento general y de masa: sigue creciendo su velocidad, pero conservando el isocronismo, y dan origen á diferentes tonos musicales que hácia el límite de 30.000 vibraciones en un segundo producen sonidos confusos como al principio, concluyendo por el silencio si se excede el número antedicho. Y luego ¿qué sucede? Aquellas rapidísimas trepidaciones moleculares silenciosas, pero más benéficas aún, constituyen el calor que nos reanima. Increíble parece, mas no cabe duda hoy: la Física lo demuestra palmariamente: lo que para nuestro sentido es calor ó frío, es meramente agitación vertiginosa en las moléculas de los cuerpos, que se propaga á los nervios distribuidos por la piel, yendo á parar á un centro común, el cerebro; adonde llegan, trasmitidas por los cordones nerviosos, todas las impresiones, ó sean las conmociones excitadas por el sempiterno hervor de cuanto nos rodea, que todo vibra en perennal y sublime música, presentida muchos siglos atrás por el génio de Pitágoras.

Calentando suficientemente un cuerpo, como se observaría en un trozo de hierro, se pone incandescente; es decir, emite destellos de luz rojiza al principio, y más viva y blanca á medida que se calienta más. Analizada la luz por medio del prisma en cada momento, sólo habría color rojo al comenzar, apareciendo despues sucesivamente el naranjado, amarillo, verde, azul, añil y violeta; tintes que proceden de vibraciones cada vez más rápidas, las cuales se cuentan por algunas centenas de billon; pero en último resultado son tonos más ó menos subidos, que trasmitidos por el éter forman los colores del iris, la gama de otra música divina apreciada por el ojo.

Y despues de las luminosas, ¿habrá vibraciones más rápidas? No tenemos sentido que las perciba; pero el ingenio de los físicos, más perspicaz que los sentidos, ha descubierto las radiaciones ultra-violetas, y llegando á templar y moderar



su vértigo, reaparecen con ellas entónces los colores del espectro solar en imágen irisada; ó bien el hombre las ordena que trabajen, en cuyo caso, obedientes, operan admirables trasformaciones químicas de la materia, como obedientes trabajan tambien las radiaciones luminosas y graban con extraordinaria fidelidad su noble imágen sobre la placa dagueriana, cual pudiera ejecutarlo el más hábil y consumado artista.

Conociendo el número de vibraciones por segundo y el espacio recorrido por el sonido en igual tiempo, á saber, 340 metros, cualquiera que sea el tono;—puesto que la experiencia diaria nos testifica la constancia de los acordes musicales, áun cuando nos alejemos de una orquesta;—fácil nos será, con tales datos, determinar la longitud de las ondas sonoras en cada caso. En efecto, hemos dicho ántes que la velocidad en todo movimiento uniforme es la razon de la distancia ó espacio recorrido por el móvil al tiempo empleado

en recorrerle,  $v = \frac{e}{t}$ ; luego si en un segundo se producen  $n$  vibraciones de longitud  $l$ , cada una tardará  $\frac{1}{n}$  de segundo; y sustituyendo en la expresion anterior tendremos,  $v = \frac{l}{\frac{1}{n}}$ ;

ó bien,  $v = l \times n$  [4].

Lo cual significa, y por otra parte parece evidente, que el espacio recorrido en un segundo por el sonido,  $v$ , es igual al producto de la longitud de una onda por el número de las que se suceden en dicho tiempo, y de aquí se deduce el valor  $l = \frac{v}{n}$ ; que es la solucion del problema propuesto.

La longitud de las ondas en las notas más graves, con 81 vibraciones, que forma una voz varonil de bajo profundo, será, segun esto,  $340^m : 81 = 4,1^m$  aproximadamente. Análoga division nos da una longitud de sólo tres décimetros para la nota más aguda de 1044 vibraciones en la voz femenina que los músicos llaman de *soprano*. (\*) Esta longitud tiene límites

(\*) Como límites excepcionales de la voz humana se señalan para el bajo 64 vibraciones, cuya longitud de onda pasa de cinco metros y medio, y para



ménos extensos si se trata de la conversacion ordinaria; las ondas correspondientes á la voz del hombre varían entónces de  $2,^{m}4$  á  $3,^{m}6$ ; y para la mujer desde  $0,^{m}6$  á  $1,^{m}2$ ; pues su tono se halla ordinariamente á la octava aguda de la voz del hombre en los sonidos más bajos, y casi difieren en dos octavas en los sonidos agudos de la conversacion.

Claro es que la longitud de las ondas sería diferente variando la velocidad del sonido áun para el aire mismo, y sobre todo en medios diferentes de nuestra atmósfera. Así, transmitidas bajo el agua las amplitudes de onda son cuatro veces y media mayor que en el aire, á consecuencia de expresar este número la razon de las velocidades del sonido en dichos medios.

Por la misma fórmula [1] se determina  $n$ , conocidas  $v$  y  $l$ . Ahora bien; dicha ecuacion es aplicable á todo movimiento ondulatorio, y por eso ha servido á los físicos para averiguar el número de vibraciones por segundo de cada uno de los colores del espectro, supuesto que préviamente habian determinado la velocidad de la luz y la longitud de las ondas monocromáticas.

#### CAPÍTULO IV.

- I.—Vibraciones simultáneas: interferencias: pulsaciones. Sonidos resultantes.  
 II.—Timbre: Composicion de las vibraciones pendulares. III.—Sonidos armónicos apreciados por el oido y con independencia de este órgano.  
 IV.—Sonidos armónicos en las cuerdas. V.—Análisis y recomposicion de las vocales.

#### I. — *Vibraciones simultáneas: interferencias: pulsaciones. Sonidos resultantes.*

Hasta ahora hemos considerado tácitamente los sonidos como si fueran simples; es decir, nos hemos ocupado de la produccion, la propagacion, el número y otros caracteres de sus vibraciones, supuestas idénticas y especiales para cada nota, y emitidas aisladamente por el respectivo centro sonoro.

Dos cuestiones se presentan desde luego á nuestro exá-

---

la soprano 4305. Segun Mozart, la Bastardella alcanzaba á producir notas de 2.000 vibraciones por segundo, la longitud de onda correspondiente siendo de 17 centímetros.



men: *Primera*. ¿Son ó no simples las vibraciones de una nota? *Segunda*. ¿Qué sucederá al encontrarse varias ondas que se propagan por un medio cualquiera, ya provengan de sonidos del mismo ó de diferente tono?

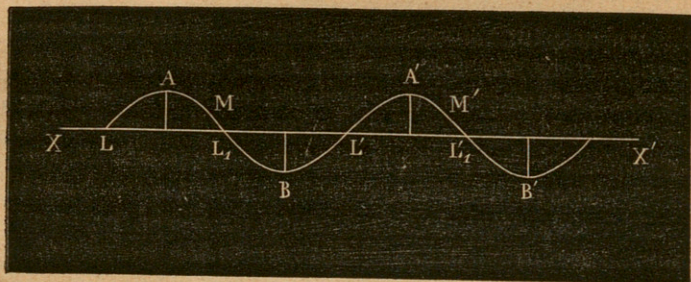
El principal objeto de este capítulo será el estudio del problema señalado como primero, y sin embargo, ántes de penetrar de lleno en las dificultades que entraña, y de exponer algunos admirables resultados obtenidos por los físicos modernos referentes al mismo asunto, sírvannos de preliminar las siguientes indicaciones acerca de la cuestion enunciada en segundo término.

Observando con detenimiento las olas del mar ó de un estanque, sus colinas y valles circulares nos darán una imagen visible de las condensaciones y dilataciones de las ondas esféricas que en la atmósfera transmiten el sonido, y nos permitirán comprender mejor los fenómenos. Claro es que la caída de una sola piedra en la superficie del agua tranquila engendra una ola única; pues en virtud de la perfecta elasticidad del medio fluido, toda la fuerza viva que produjo el hundimiento ó depresion en el lugar del choque se transmitió en seguida á la capa inmediata, formando la cresta que le rodea como resultado de la vibracion en círculos verticales de las partículas del agua. Aparece luego el surco adyacente, despues otra prominencia, y así se continúa la marcha de la onda por la superficie, decreciendo su altura al dilatarse hasta desaparecer á la vista y permanecer inmóvil el líquido, cuando el pequeño impulso inicial es impotente para levantar la enorme masa de agua que corresponderia á una ola de radio en extremo prolongado. En el movimiento ondulatorio anterior, las partículas describen su círculo respectivo con velocidad constante, y aparentan, sin embargo, subir y bajar tan sólo del nivel general de la superficie con la misma regularidad en sus cambios de posicion que se producen las oscilaciones de un péndulo: por esto se denominan *pendulares* ó *simples* las vibraciones en el caso estudiado y otros análogos, representándose entónces por *sinusoides* (\*), de las cuales la figura 5.<sup>a</sup> puede darnos alguna idea.

(\*) Llámense así porque en esta clase de vibraciones la distancia del punto vibrante á su posicion primitiva es igual al seno de un arco que crece proporcionalmente al tiempo.



Esta misma regularidad y simetría hallaríamos en la representación de las condensaciones y dilataciones de las ondas aéreas propias de ciertos sonidos, como el de un tubo de órgano manteniendo constante la corriente de aire lanzada por el fuelle, y también se hace constar en la curva trazada por un diapason vibrante—según se expuso en el capítulo anterior al tratar del método gráfico,—y más pura todavía se percibe su nota característica mediante la resonancia de una columna de aire, en cuya experiencia hemos insistido; página 35. Pronto necesitaremos ampliar esta ligera noción de las vibraciones simples,—cuya identidad de forma sostuvo primeramente Ohm,—exponiendo las interesantes consecuencias á que ha dado margen.

(Fig. 5.<sup>a</sup>)

Supongamos que sean dos ó más las piedras arrojadas al estanque: cada una forma su ola, y ambas olas se propagan sin perturbarse, pudiendo seguir con la vista después de su encuentro las series de círculos correspondientes á cada centro, con entera independencia los del uno y del otro origen; y lo mismo si la superficie permanece tranquila y plana, que á través de las arrugas con que se hallare rizada por la brisa. Otro tanto sucede con las gigantescas olas del mar y también con las líneas que se dibujan en un lebrillo, ó vasija de parecidas dimensiones, lleno de agua que se conmueve en uno ó varios puntos: aquí las ondas directas se entrelazan sin alterar su marcha con las que fueron rechazadas en las paredes del barreño, y puede verse, por la reflexión de un haz de rayos solares en la superficie rugosa del líquido, pintada sobre el techo mismo de la sala ú otra



pantalla, la imagen bellísima de aquella agitación extraordinaria; pero nada confusa é irregular, sino guardando perfecta simetría, que se nos revela en el precioso encaje formado por los cruces, dobles y repliegues sin cuento de las ondas, aparentando anudarse y desatarse con una movilidad y encanto particular, tan imposible de describir cuan fácil es de observar por todo el mundo. El efecto es aún más brillante reemplazando el agua por el mercurio.

La imagen anterior permite formarse alguna idea de los innumerables cruces de las ondas sonoras procedentes de diverso origen, que se encuentran también sin alterar su individualidad en la atmósfera limitada de un salón de baile. Las notas de la orquesta, el roce de los vestidos, el cuchicheo de las parejas, los ruidos de su acompasado pisar engendran tropel de ondas, que se aumentan con las reflejadas en las paredes y techo, y parece debieran producir un conjunto caótico; no obstante lo cual, poniendo alguna atención, distinguimos perfectamente un sonido cualquiera de los demás, y con ello nos aseguramos de que las grandes y pequeñas ondas se cortan en todas direcciones sin perturbarse en su camino, obedeciendo á las inmutables leyes de orden y armonía que rigen el universo.

A fin de comprender cómo es posible y qué debe entenderse por la coexistencia de las ondas en el punto mismo donde se encuentran, refiriéndonos primero al caso de un líquido, observamos que al chocar las crestas de dos olas sube su altura, y cuando son dos las depresiones concurrentes aumenta su profundidad, produciéndose una rebaja y compensación parcial en el caso de cruzarse una montaña con un valle, y si son equivalentes el reborde ó convexidad de aquella y la concavidad de éste, quedará aplanada del todo la superficie líquida en el lugar de la superposición. Expresábase brevemente estos resultados mecánicos diciendo: «*El punto donde concurren dos ó más olas sufre un impulso tal, que el efecto resultante es la suma algebraica de los movimientos componentes;*» esto es, que la subida ó el descenso de las gotas respecto al nivel general del líquido, aumenta en la suma de las alturas positivas ó negativas de todas las olas que tienen igual fase, y se restan sus alturas si llegan con fase contraria.



De un modo análogo sucede con los sistemas de ondas que atraviesan la atmósfera procedentes de diversos centros sonoros. También *el aire adquiere un movimiento resultante en cuanto á su presión, velocidad y posición de sus partículas, que es la suma algebraica de todas las impulsiones recibidas* (\*). La misma ley es aplicable á cualquier movimiento ondulatorio en un medio flúido, y por eso, para ondas simples de igual tono, ya sonoras, ya luminosas, se producen *interferencias*, esto es, puntos de reposo, que es el silencio ó la oscuridad (\*\*) respectivamente, siempre que se encuentran dos ondas caminando en sentidos contrarios, segun dicen los físicos con opuestas fases, ó sea que difieren en un número impar de semi-ondulaciones; y habrá refuerzos en la intensidad del sonido, ó la luz, donde chocan ondas de la misma fase ó que difieren en un número par de semi-ondulaciones. Al estudiar las placas vibrantes, los tubos sonoros y otros instrumentos acústicos comprobaremos las interferencias del sonido que nos explican, v. gr., el hecho curioso de sonar más fuerte un solo tubo que cuando tocan á la par dos exactamente iguales, puestos sobre la misma *caja de viento*. La rama de un diapason aislada de la otra por un tubo de cartulina deja percibir la nota del instrumento cuando parecían completamente apagadas sus vibraciones, porque interfieren las ondas aéreas procedentes de ambas ramas oscilando libres, y no hay posibilidad de tal fenómeno, deteniendo las que parten de una extremidad de la varilla mediante el expresado tubo.

---

(\*) En rigor, cada molécula del flúido por donde se cruzan diversos sistemas de ondas obedece en la composición de todos los impulsos que recibe, á la ley dicha del paralelogramo; pero se obtiene la resultante por una simple adición, ó resta, considerando las pequeñas desviaciones que, en comparación de la amplitud de las ondas sonoras, sólo longitudinalmente pueden experimentar las partículas de aire que llenan el estrecho conducto auditivo. En general se admite la ley expresada en el texto siempre que sea despreciable la altura de las olas, ó la diferencia entre la condensación y dilatación en las ondas gaseosas, comparadas con su longitud.

(\*\*) Esta circunstancia de que la luz añadida á luz produce oscuridad no se comprende en la teoría de la emisión de partículas luminosas, sin admitir nuevas hipótesis gratuitas. En cambio es sencillísima la explicación anterior de las interferencias dada como inmediata consecuencia de la teoría ondulatoria, que hoy se acepta unánimemente por los físicos.



Aun cuando no sean exactamente iguales los tonos de las notas cuyas ondas respectivas se superponen en la atmósfera, también obedecen las partículas gaseosas á la ley de composición aditiva ántes estudiada, y dan lugar al fenómeno de las *pulsaciones*, que es un caso de interferencias sonoras intermitentes. Si disponemos de dos tubos ó diapasones unísonos, podríamos disminuir el número de vibraciones en uno de ellos (\*), y existirían períodos de tantas coincidencias y refuerzos del sonido, con otros tantos mínimos intermedios de completo silencio, cuantas sean las vibraciones del primer tubo ó diapason más que las del segundo cuyo sonido le acompaña.

Para comprender fácilmente este resultado, supongamos que la diferencia de las vibraciones por segundo sea una, y que comiencen éstas á la par en ambos instrumentos; es evidente que irán separándose cada vez más de la coincidencia, hasta hallarse en fase contraria sus oscilaciones después de haber trascurrido la mitad del segundo, y á partir de dicho punto se aproximan simétricamente hasta coincidir al cabo del segundo completo. Podemos representar esto mismo por dos rectas de idéntica longitud divididas en partes iguales, de modo que coincidan sus extremos, y una de las líneas tenga una división ménos que la otra, como sucede en el nonius ordinario. La mayor separación de las rayitas divisorias cae justamente en el medio, aproximándose por uno y otro lado hasta corresponderse las últimas divisiones de ambas reglas.

Siendo la diferencia entre el número de vibraciones dos, tres, etc., igual será el de coincidencias y separaciones que nos darían las rectas divididas en partes correspondientes, pudiendo afirmarse desde luego este principio: «dos instrumentos que se hallan próximos al uníson producen tantas pulsaciones por segundo, cuantas sean las unidades en que difieran sus números de vibraciones durante un mismo tiempo.» No costará más trabajo generalizar lo dicho á otros intervalos musicales distintos del uníson, en alguno de los cuales se observan ya pulsaciones que vienen á alterar con

(\*) Se consigue bajar la nota en los tubos aumentando su longitud, ya por la adición de otro más corto si están abiertos, ya por medio de una tablilla agujereada que se eleva resbalando como una corredera. Los diapasones emi-



su estridente ruido la suavidad y pureza de la sensación agradable requerida por el Arte.

Finalmente han descubierto los músicos (\*) ciertos *sonidos* llamados *resultantes*, que se perciben con especialidad cuando un mismo cuerpo se halla solicitado á vibrar de dos maneras distintas con duracion y fuerza bastante para que las excursiones de sus moléculas no puedan considerarse como infinitamente pequeñas. Helmholtz ha demostrado matemática y experimentalmente luégo por medio de su doble sirena, que deben producirse en tal caso *sonidos resultantes* cuyo número de vibraciones es la *suma* de las contadas en ambas notas componentes; asimismo que se producen los sonidos de Tartini, más intensos, y que tienen un número de vibraciones igual á la *diferencia* de dichas notas. Entiéndase que unos y otros tonos resultantes son los primeros términos de una série de sonidos cada vez más débiles cuya existencia demuestra el cálculo; y nos explicamos este resultado analítico, porque se originan dichos sonidos con los armónicos de uno ó los dos fundamentales y tambien por la combinacion misma de éstos con los tonos resultantes primarios.

En un principio se creyó que los tonos por diferencia eran debidos á la fusion en un sonido continuo de las pulsaciones originadas por las dos notas componentes y simultáneas, puesto que el número de vibraciones del tono diferencial, como el de pulsaciones, es igual al exceso de la que cuenta más de entrambas notas; percibiéndose pulsaciones aisladas solamente cuando el número de éstas no llega á 33, que es el límite inferior de choques, capaces de producir una sensación continua. Várias razones aduce el ilustre físico Helmholtz que echan por tierra la hipótesis anterior, y dan la clave del misterioso fenómeno:

*Primera.* Es posible que se engendren ondas derivadas de diverso modo al encontrarse las primitivas, que no con-

---

ten notas cada vez más graves fijando con cera pesitos crecientes en el extremo de una de sus ramas, y tambien calentando la varilla, lo cual disminuye su elasticidad, y por consiguiente el número de vibraciones.

(\*) El primero un organista alemán, Sorge, en 1743, sin que nadie atribuyera grande importancia á su descubrimiento, que pasó desapercibido. Fueron hallados posteriormente por Tartini, que ha dado su nombre á estos sonidos.



servarán íntegra entónces su individualidad; y esto sucede efectivamente si las vibraciones moleculares alcanzan una amplitud apreciable, pues en tal caso la existencia de los tonos adicionales observados confirma la teoría; no habiendo para ellos explicacion plausible considerando los sonidos resultantes como formados por rápidas pulsaciones interferentes. *Segunda.* Los sonidos resultantes por diferencia tienen una intensidad menor que los sonidos primitivos, los cuales han de ser fuertes para producir aquéllos; miéntras pueden oírse pulsaciones de sonidos imperceptibles, supuesto que duplicándose en ellas la amplitud de las ondas, será cuádruple su intensidad respecto á la que ofrecen las notas primordiales.

Alguna razon más añade Helmholtz; pero basta lo dicho para adquirir certidumbre de que los sonidos resultantes se deben á nuevas vibraciones, con su período especial, producidas por el choque de las primarias que emanan de centros sonoros próximos; y si éstos se alejan y la masa de aire intermedia no se conmueve fuertemente, aún es posible la percepcion de aquéllos, formados ahora dentro del mismo oído, por la resonancia del tímpano al período de las ondas que llegan, y al de su combinacion en tonos resultantes.

## II.—*Timbre: Composicion de las vibraciones pendulares.*

Hace pocos años se ignoraba todavía la causa de otra cualidad característica de los sonidos que, teniendo la misma intensidad y tono, permite distinguir, sin embargo, cuál es el instrumento de donde aquéllos proceden, y sobre todo nos deja reconocer por la voz á nuestros amigos sin necesidad de verlos, siendo causa tambien de la alegría que desde la misma cuna muestra el niño al aproximarse su tierna madre, cuyo dulce y cariñoso acento jamás confunde con el de otra mujer. Esta particularidad de los sonidos suele llamarse *metal de voz*, aplicándose á los que se producen en nuestra laringe, y *timbre ó matiz sonoro* en general, si proceden de cualquier otro instrumento.

El eminente Profesor Helmholtz descifró el enigma que tanto preocupaba á los físicos. No consta el sonido que parte de un cuerpo, v. gr., una cuerda, de vibraciones de un sólo



período: además del tono dominante, y simultáneos con él, son emitidos otros llamados *armónicos* ó *sobretonos*, cuyo número de vibraciones es múltiplo por los primeros enteros de las que cuenta el sonido principal. Más débiles que éste son ordinariamente los sonidos armónicos, y como guardan con él ritmos concordantes, no pueden distinguirse del fundamental sin ciertas precauciones que detallaremos á continuación.

Ahora bien; si con varios instrumentos puede darse la misma nota, segun su naturaleza, forma y disposicion, acompañan al tono fundamental de cada uno armónicos diferentes y con desigualdad reforzados, que originan el carácter propio é individual de cada sonido, designado bajo la denominacion de timbre. A la manera que los diferentes matices del color rojo, por ejemplo, que nos ofrecen la naturaleza y las artes, provienen de la adición al rojo espectroscópico, de diversos colores ó en distinta proporcion reflejados por los cuerpos (\*).

No faltará quien piense y quizás diga: «poca dificultad debiera de haber costado extender por analogía al presente caso del sonido la explicacion del color, fundada en la composicion y descomposicion de la luz, tiempo há descubierta por Newton.» ¡Achaque muy comun entre los que somos ignorantes, encontrar fácil y hacedero lo que hombres de mérito superior alcanzaron á costa de paciencia, fatiga y génio! No revela sus secretos la Naturaleza á quien someramente indaga, ó con distraccion irreverente huella al acaso el sagrado recinto de su templo. Menester son ofrendas contínuas, muchos desvelos, fervoroso culto, para que propicia acoja nuestros votos y benigna responda á nuestras plegarias; y nada faltaba al ilustre físico-matemático Helmholtz para ejercer el ministerio sublime de escogido intérprete y fiel oráculo de la Naturaleza, timbre el más glorioso del sábio que medita en su retiro por penetrar el arcano de las leyes físicas, velado misteriosamente; pero al alcance de nuestra inteligencia, segun pluguiera al Supremo Hacedor como para obligarnos á contínuo ejercicio racional y de investigacion

(\*) Tambien pueden obtenerse tintes rojizos sin la presencia del rojo simple, aunque entra éste comunmente en la mezcla de colores que los constituyen.



empírica, medios poderosos y casi exclusivos de realizar con éxito el progreso científico, que es la base de todo progreso humano y seguro guía para conducirnos hácia el hermoso ideal de otros tiempos más felices y prósperos que lleva el hombre grabado en su mente, y por el cual desde muy antiguo suspira á través de tantas penalidades y tropiezos, vencidos al fin durante su larga peregrinacion sobre la Tierra.

Para inquirir el origen de los caractéres observados en una misma nota musical variando el instrumento que la produce, tambien pudiera razonarse de este modo. La intensidad del sonido proviene de la amplitud de las vibraciones; el tono de la rapidez con que se suceden; y no habiendo otra circunstancia que pueda cambiar en un movimiento periódico, sino la especie de su ritmo, ó como suele decirse, la *forma* de las vibraciones, necesariamente dependerá de ésta el timbre propio de cada sonido. Es evidente que el hablar de forma de las vibraciones implica su representacion geométrica; pero es tan natural recurrir á la sinuosa correspondiente, que en las primeras definiciones dadas en el presente libro nos valimos ya de este medio, y para mayor claridad reprodujimos atrás la figura 5.\*

Supongamos dos sinusoides que representan sonidos elementales. Para obtener la curva resultante de su combinacion, basta tirar perpendiculares á los ejes  $X_1X_1'$  y  $X_2X_2'$  desde los puntos correspondientes en ambas líneas; lo que llaman los matemáticos, trazar las *ordenadas* cuyos piés caigan á igual distancia del *origen*. Tomada ésta, ó sea la *abscisa* comun de dichos puntos sobre la recta  $X_1X_2'$ , que ha de ser ahora el nuevo eje, levántese la ordenada de longitud equivalente á la suma algebraica de las dos ordenadas anteriores, y representarán todas tres las intensidades respectivas de los sonidos componentes y resultante; en virtud del principio de la combinacion de los movimientos ondulatorios arriba mencionado. Así iremos señalando cuantos puntos nos hagan falta para unirlos despues en una línea continúa que expresara con toda fidelidad el sonido resultante: su *forma* es por consiguiente la de esta curva.

A trueque de pecar de redundantes para los lectores que no desconocen el lenguaje matemático, utilísimo y casi indispensable para todas las ciencias, insistiremos en que se



tenga en cuenta el signo de las ordenadas para hallar su suma; llevándolas una á continuacion de otra sobre la misma perpendicular al eje de la resultante, siempre que ambas componentes sean de igual signo,—por encima ó por debajo de la  $X_1X_2'$  segun sea positivo ó negativo,—y tomando como ordenada la diferencia de aquéllas, y con el signo de la mayor cuando le tuvieren diferente.

Recomendamos al lector que desee adquirir completa y exacta idea de la precedente composicion gráfica de las vibraciones, y asimismo de la extraordinaria variedad de formas resultantes, que él dibuje por su mano las sinusoides componentes; empezando por ejemplos sencillos como el suponer dos solas y que el período de la una sea doble que el de la otra, correspondiéndose primero en ambas la fase inicial, y variando despues esta última condicion, con lo cual ya varía en definitiva la forma de la resultante que se traza.

De la construccion gráfica resulta, que al superponerse las vibraciones pendulares engendran sonidos que guardan un período constante, y la regularidad propia de los sonidos musicales, siempre que entre las vibraciones de los tonos simples combinados exista alguna cuya duracion sea divisible exactamente por la que corresponde á los períodos de los demás sonidos; pues desde luego se vería que la sinuosa resultante corta al eje  $X_1X_2'$  en porciones iguales, marcando la duracion; y las partes de curva comprendidas entre dos divisiones sucesivas del eje se repetirían con idéntica forma, lo cual es prueba de un ritmo continuo, regular. En este caso, que principalmente nos interesa, de una nota fundamental acompañada de sus armónicas, se reconoce tambien la verdad de nuestro aserto por la experiencia diaria; pues el oido confunde en un todo los sonidos parciales cuya diversidad presta á la nota el timbre especial que la distingue. Análoga fusion de dos notas á la octava y de otras armónicas producidas por diapasones exactamente acordados, comprueba el resultado anterior; aunque nunca es tan perfecta la coincidencia de los tonos múltiples empleando instrumentos diferentes.

Tambien es cierta la recíproca de la proposicion anterior, segun ya hemos indicado en otro lugar, á saber: «las vibraciones pendulares, son siempre de igual forma; aún cuando