

12 de diciembre, durante los cuales rodeó á Londres una niebla de espesor excepcional, se oyeron los disparos de cañón á mucha mayor distancia que en los días despejados que precedieron á los brumosos ó que siguieron á la desaparición completa de la niebla. Así pues, como nota Tyndall, la misma causa que disminuye la transparencia óptica de las capas de aire aumenta su transparencia acústica.

M. Felipe Bretón, ingeniero en jefe de puentes y caminos, sin rechazar la explicación de Humboldt y de Tyndall, cree que otra causa puede producir la brusca interrupción de las señales sonoras. En una atmósfera perfectamente homogénea, pero cuyas capas estén á temperaturas diferentes y que varíen de continuo, las ondas sonoras emanadas de una señal situada á mayor ó menor altura van á rasar el horizonte, bien sea éste un llano ó la superficie del mar, á cierta distancia. Allí se levantan bruscamente, dejando más lejos un espacio en el que no penetran y al cual da el citado ingeniero el nombre de *sombra del silencio*. Para percibir los sonidos en este espacio sería preciso elevarse verticalmente á alturas que crecieran con la distancia. Así pues, pudo muy bien haber sucedido que el buque en que iba Tyndall al hacer sus experimentos hubiese penetrado en dicho espacio, y que el físico inglés atribuyera á falta de homogeneidad lo que era consecuencia de una ley geométrica de la propagación de las ondas.

“Por ejemplo, dice Bretón, si le sucedió al alejarse del instrumento ó aparato de señales que dejara de oír de pronto el sonido, en lugar de notar una aminoración gradual y continua, debió consistir en que en el momento de la cesación brusca de la audición atravesara el observador la superficie de la sombra acústica, penetrando de improviso en la sombra del silencio: lo repentino de la extinción aparente debió ser tanto más notable y claro cuanto más completa era la transparencia acústica del aire.”

Sea lo que quiera de las varias teorías propuestas para explicar las anomalías que la observación ha reconocido ya en el alcance variable de las señales sonoras, la necesidad de efectuar nuevos experimentos se desprende de los hechos que acabamos de mencionar. La importancia práctica de la cuestión no dejará, por otra parte, de excitar el interés y la solicitud de los físicos.

CAPITULO V

LAS VIBRACIONES SONORAS

I

VIBRACIONES DE LOS SÓLIDOS, DE LOS LÍQUIDOS Y DE LOS GASES

El sonido es un movimiento vibratorio.

Los cuerpos sonoros son cuerpos elásticos, cuyas moléculas ejecutan, mediante la percusión, el roce ú otros modos de conmoción, una serie de movimientos de vaivén alrededor de su posición de equilibrio. Estas vibraciones se comunican sucesivamente á los medios circundantes, gaseosos, sólidos y líquidos, en todas direcciones, y van á parar al órgano del oído. Una vez en éste, el movimiento vibratorio actúa en los nervios especiales de dicho órgano, y si la velocidad y amplitud de las vibraciones tienen valores convenientes, produce en el cerebro la sensación del sonido.

Merced á algunos sencillos experimentos se hace evidente la existencia de las vibraciones sonoras.

Estas son desde luego y con frecuencia perceptibles al simple tacto. Si con un pedazo de metal ó de madera se da un golpe en los brazos de unas tenazas de chimenea suspendidas, se percibe un sonido, y al aplicar los dedos á dichos brazos se nota una especie de temblor muy fácil de distinguir del movimiento de oscilación visible. Lo propio sucede si se hace resonar una campana, un timbre ó un instrumento de música de suficiente volumen, ó si se ponen, por ejemplo, los dedos sobre la mesa armónica de un piano mientras se toca este instrumento. Un tambor, una corneta que pasa por delante de una casa hace retremblar los cristales de las vidrieras, sucediendo lo propio, y

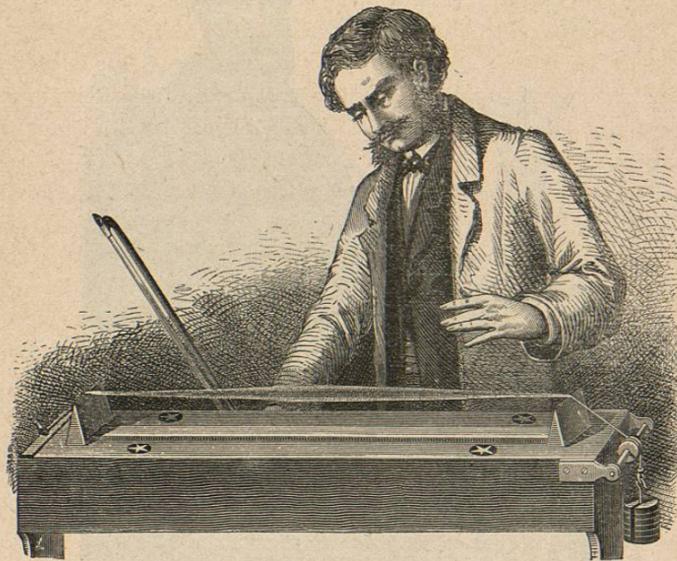


Fig. 260.—Vibraciones transversales de una cuerda sonora

á mucha mayor distancia, con la detonación de un cañonazo. Si se le disparara muy cerca, el estampido rompería los cristales, pero en este caso el efecto producido se complica con el movimiento de transporte de las capas aéreas y con el vacío causado en la atmósfera por la explosión.

Las vibraciones sonoras son visibles en muchos cuerpos, y especialmente en las cuerdas y varillas metálicas.

Si se coge una cuerda de violín y se la pone bien tirante por sus dos extremos sobre una superficie de color obscuro—condición que vemos realizada en los instrumentos de cuerda,—y se produce entonces un sonido con un arco, ó pulsando la cuerda por su parte media, se verá cómo esta cuerda se dilata de los extremos al centro, presentando á la vista un ensanchamiento central aparente, originado por el rápido movimiento de vaivén que ejecuta (fig. 260). Vese la cuerda á la vez, por decirlo así, en sus posiciones extremas y medias, merced á la persistencia de las impresiones luminosas en la retina.

En vez de una cuerda, consideremos una varilla metálica sujeta por uno de sus extremos (fig. 261). Si se la separa de su posición de equilibrio, se la verá ejecutar una serie de oscilaciones cuya amplitud irá disminuyendo hasta anularse totalmente. Mien-

tras duran las vibraciones de la varilla se percibe un sonido que se debilita y se extingue á la par del movimiento.

Los brazos de un diapasón que se hace resonar oscilan visiblemente, de suerte que la vista no distingue con claridad los contornos del instrumento: el efecto de las vibraciones en el diapasón es el mismo que en el ejemplo de la cuerda sonora, y la visión confusa que de ellas resulta depende también de la duración de la sensación luminosa. El ojo ve simultáneamente cada rama ó brazo del instrumento en todas las



Fig. 261.—Vibraciones transversales de una varilla metálica

posiciones que las vibraciones le hacen ocupar á uno y otro lado de su posición de equilibrio.

Una campana de cristal, un timbre metálico, cuyo borde se frota con un arco de violín, emiten sonidos con frecuencia muy enérgicos, siendo fáciles de comprobar las vibraciones que los engendran. Una varilla metálica cuya punta toca ligeramente el borde de la campana de cristal, recibe golpes secos y repetidos de ésta, y el ruido que resulta se distingue claramente del sonido que produce el vaso (fig. 262). La bola de un péndulo puesta en contacto con el borde de la misma campana es despedida con fuerza y oscila mientras dura el sonido. Del propio modo, una bolita metálica, puesta en el interior de un timbre, da pequeños saltos cuando éste resuena (fig. 263), haciendo de este modo patentes las vibraciones de que están animadas las moléculas de los cuerpos sonoros.

Además de las vibraciones cuya dirección es perpendicular á su longitud, y á las cuales se da por esta razón el nombre de *vibraciones transversales*—que son las de que acabamos de tratar,—las cuerdas, las varillas metálicas, las de madera, cristal ú otras substancias elásticas ejecutan también *vibraciones longitudinales*, que se pueden

hacer perceptibles por medios parecidos á los que dejamos descritos. Tomemos por ejemplo una barrita de hierro ó un tubo de cristal, sujetando uno de sus extremos, y frotémoslo en el sentido de su longitud con un pedazo de lienzo untado de colofonia: en este caso resultará un sonido. Si ponemos previamente en contacto con el extremo libre de la barra ó del tubo una bolita que forme péndulo, se la verá lanzarse y oscilar en tanto que dure el sonido, efectuando su movimiento en la prolongación del eje de la barra ó del tubo: este movimiento será longitudinal, como las vibraciones que lo producen.

Con el instrumento de Trevelyán, del que hemos hablado anteriormente y con el

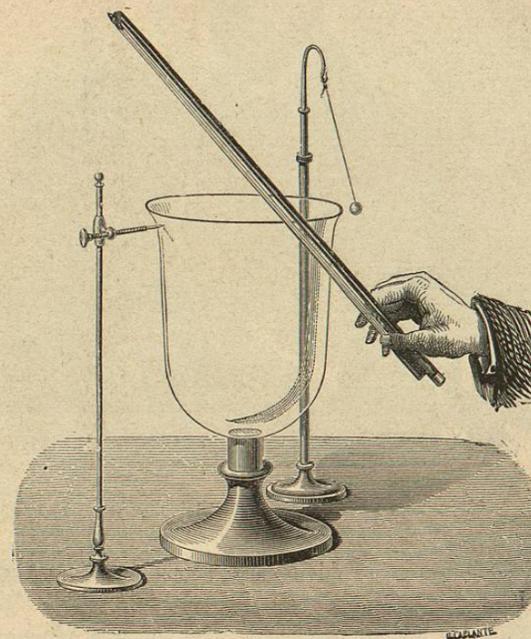


Fig. 262.—Vibraciones de una campana de cristal

cual se obtienen sonidos mediante el contacto de dos cuerpos sólidos de temperaturas desiguales, se pueden también hacer perceptibles á la vista las vibraciones sonoras (figura 264). Colocando de través en la caja metálica una barra terminada en dos bolas, el peso de esta barra hace las vibraciones más lentas, siendo fácil de observar el balanceo alternado que ejecutan la barra y las bolas.

Tyndall ha ideado un medio muy ingenioso de hacer visibles las vibraciones en este instrumento. Para ello fija en el centro de la cuna ó caja metálica un pequeño disco de plata bruñida, sobre el cual dirige un haz de luz eléctrica. La luz reflejada en este espejo va á caer en una pantalla, y tan luego como el hierro caliente se halla en contacto con la masa fría del plomo, se ve cómo balancea ú oscila en la pantalla el reflejo de la luz.

Estudiando los efectos del calor se puede probar que la causa de las oscilaciones en el instrumento de Trevelyán está en la dilatación momentánea del plomo en los puntos en que este metal se pone sucesivamente en contacto con el hierro caliente; esta dilatación brusca da lugar á la formación de burbujillas que nacen al contacto, y que des-

aparecen tan luego como este último cesa y que hacen oscilar la caja metálica á derecha ó izquierda (fig. 265). De aquí resulta una serie de pequeños choques bastante repetidos para producir un sonido.

Puede hacerse también el experimento con una pala ó badila, calentando el man-



Fig. 263.—Vibraciones de un timbre sonoro

go y poniéndola en equilibrio sobre dos láminas de plomo sujetas en un torno de cerrajero (fig. 266).

Cuando describamos los medios empleados para medir el número de vibraciones

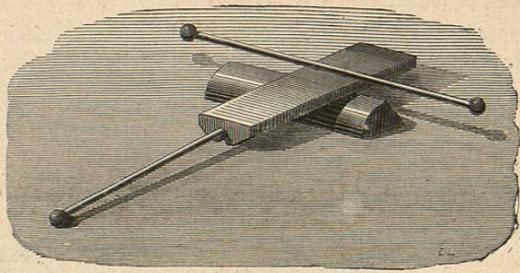


Fig. 264.—Instrumento de Trevelyán

tendremos ocasión de ver nuevas pruebas de la existencia de estos movimientos moleculares.

En otra parte hemos dicho que cuando un cuerpo sólido produce un sonido, las más de las veces se hace ostensible el movimiento vibratorio por el estremecimiento que experimenta la mano al tacto.

Hasta aquí no hemos considerado más que las vibraciones de los cuerpos sólidos para ponerlas en evidencia. Pero también se puede hacer visibles las que ocasiona la producción ó la transmisión del sonido en las masas líquidas y en los gases. Un vaso medio lleno de agua vibra como la campana de cristal de que hemos hablado, cuando se frota sus bordes con un arco de violín ó con el dedo mojado. Entonces se ve además en la superficie líquida una multitud de estrías que se dividen en cuatro y á veces en seis grupos principales y que son tanto más compactas cuanto más agudo es el sonido (fig. 268). Si se fuerza la intensidad de éste, la amplitud de las vibraciones es tan viva que el agua salta de cada grupo á modo de finísima lluvia.



Fig. 265.—Oscilaciones de la cuna en el instrumento de Trevelyán

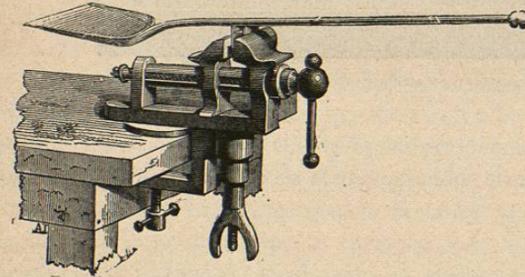


Fig. 266.—Experimento de Trevelyán simplificado por Tyndall

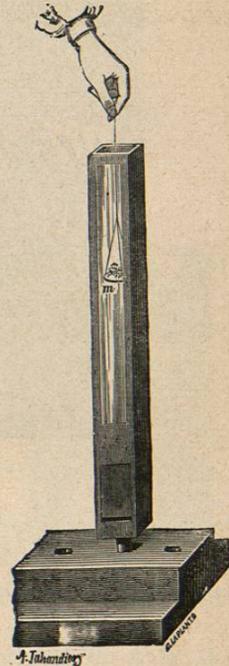


Fig. 267.—Vibraciones de la columna gaseosa de un tubo sonoro

Por último, si se adapta á un fuelle un tubo sonoro que tenga una de sus caras transparente, se pueden ver las vibraciones de la columna de aire interior del modo siguiente: suspéndese de un hilo un pequeño marco cubierto con una membrana estirada en el interior del tubo. Cuando éste resuena, se ven los granos de arena, que se habían puesto previamente en la membrana, saltando en la superficie de ésta y probando así la existencia de las vibraciones de la columna gaseosa, transmitidas á la membrana misma y á los granos mismos de que está espolvoreada (fig. 267). Hemos visto que las vibraciones del aire tienen á veces gran energía, puesto que los vidrios retiemblan y hasta se rompen cuando resuena cerca de ellos una vibración algo fuerte, como la de un cañonazo.

Véase un hecho fundamental perfectamente demostrado por la experiencia. El sonido resulta de los movimientos vibratorios que ejecutan los cuerpos elásticos, sólidos, líquidos ó gaseosos, vibraciones que se transmiten al órgano del oído por conducto de

varios medios que lo separan del cuerpo sonoro. Compréndese, pues, por qué no se propaga el sonido en el vacío. El timbre golpeado por un martillo bajo el recipiente de la máquina neumática vibra á pesar de todo; pero sus vibraciones no se transmiten ya, ó

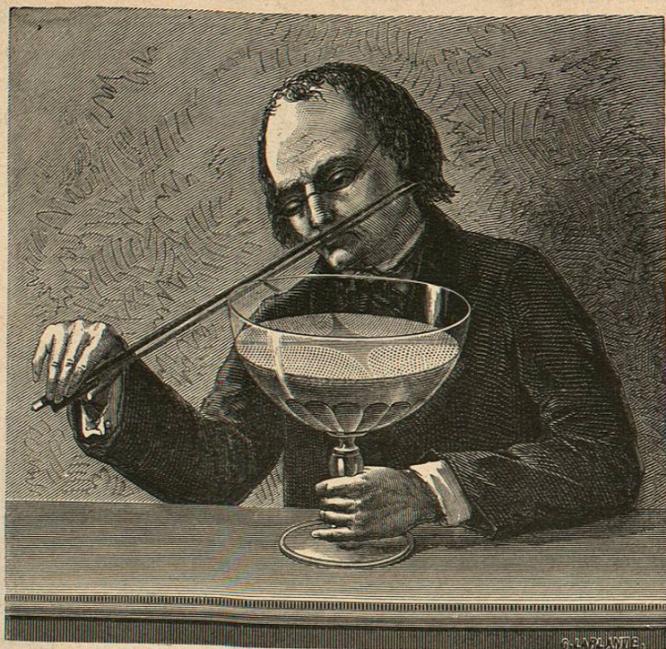


Fig. 268.—Vibraciones de las moléculas líquidas á causa de una conmoción sonora

á lo sumo se transmiten imperfectamente por intermedio de la almohadilla que soporta el aparato y de la escasa cantidad de aire que queda siempre, aun en el vacío más completo que se pueda hacer.

II

VIBRACIONES PENDULARES

Los experimentos que acabamos de describir han patentizado que el sonido es efecto de un movimiento vibratorio de los cuerpos ó de los medios elásticos.

Vamos ahora á estudiar más íntimamente la naturaleza de este movimiento, y las formas que presenta, según que se efectúe en un medio sólido, en un líquido ó en una masa gaseosa. Este estudio es objeto de una rama de la ciencia muy elevada, muy delicada y muy difícil, por lo cual procuraremos limitarnos á dar una idea de los hechos experimentales y de los principios en que descansa.

Consideremos ante todo el movimiento en los cuerpos elásticos.

Figurémonos una varilla ó lámina tenue de metal, sujeta por uno de sus extremos. Separándola de su posición de equilibrio, lo cual convierte en línea curva la recta que formaba, y abandonándola en seguida á sí misma, ejecutará una serie de oscilaciones que producirán un sonido cuyo tono é intensidad dependerán del número de aquéllas y de su amplitud. ¿Cómo se efectúan estas oscilaciones ó vibraciones?

En el momento en que la mano que ha separado la varilla de su posición rectilínea de equilibrio la suelta, la velocidad de cualquiera de sus puntos, por ejemplo de su extremo, es nula (fig. 269); esta velocidad irá luego aumentando hasta que la varilla vuelva á su posición vertical, esto es, á su punto de partida, en el cual llega á su máximo, y por lo tanto es capaz de hacer que la varilla pase más allá de esta posición, sólo que, como entonces se ejerce la fuerza de elasticidad en sentido contrario, propenderá á hacer que disminuya la velocidad adquirida. La disminuye en efecto hasta anularla, lo cual sucede cuando la varilla se ha desviado á la izquierda una cantidad precisamente igual á aquella en que se había desviado á la derecha, ó sea en su origen. Empezará, pues, un movimiento en sentido opuesto, pero esta segunda excursión será en todo simétrica á la primera, de suerte que la varilla volverá á su posición de equilibrio y se apartará de ella á la derecha, y así sucesiva é indefinidamente. Síguese de aquí que si no hubiera ninguna resistencia, ninguna causa de perturbación, el movimiento oscilatorio duraría indefinidamente. El frotamiento, la resistencia del aire obran también para destruirlo y disminuyen á cada período la amplitud de la oscilación que acaba por ser nula, recobrando entonces la varilla elástica su posición de equilibrio y quedando en reposo.

Vese que el movimiento vibratorio debido á la elasticidad es semejante por todos conceptos, excepto por lo que se refiere á la velocidad, al movimiento de un péndulo que oscila bajo la acción de la gravedad. Por esto se caracteriza con el nombre de *vibración pendular* (fig. 269) la forma de vibración que resulta (1). En este ejemplo, como en el del péndulo, las oscilaciones tienen una duración independiente de la amplitud, pero que varía con las dimensiones, la forma de la varilla y la naturaleza de la substancia que la compone. Este isocronismo es una propiedad capital, tanto en acústica como en gravedad. En efecto, se ha visto que el número constante de las vibraciones ejecutadas en un segundo por un cuerpo determina el *tono ó altura* del sonido producido. Si el isocronismo cesa por cualquier causa, el número de vibraciones disminuirá ó aumentará, y el sonido será más grave ó más agudo.

Hemos presentado un ejemplo particular, el de una varilla rígida sujeta por uno de sus extremos, y hemos supuesto que desarrollábamos su elasticidad, ejerciendo cierta flexión en uno de sus puntos. Pero, cualquiera que sea el modo de acción, la forma del movimiento vibratorio es esencialmente la misma, siempre que el sonido musical sea un sonido simple, es decir, no vaya acompañado de sonidos parciales. En el caso de que el sonido fundamental vaya acompañado de esta clase de sonidos llamados *armónicos*,

(1) Dase el nombre de *oscilación ó vibración*, ya al período de movimiento comprendido entre la posición de equilibrio y el primer regreso á esta posición, ó ya al doble período comprendido entre dos regresos consecutivos de la varilla á la misma fase del movimiento. Los franceses distinguen estos períodos dando al primero el nombre de *vibración simple* y al segundo el de *vibración doble*, conforme al uso adoptado para los movimientos del péndulo. Los alemanes llaman *vibración* á lo que los franceses *vibración doble*, resultando que el número de vibraciones es para los primeros la mitad menor que para los segundos.

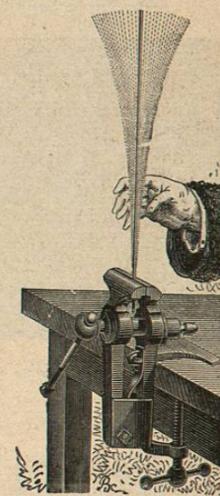


Fig. 269.—Vibraciones pendulares