

El fenómeno de destrucción ó anulación del movimiento sonoro, cuya posibilidad teórica acabamos de demostrar, es lo que se llama *interferencia*, por analogía con los fenómenos de interferencia luminosa.

En la figura 325 se ven gráficamente representados varios casos de interferencia sonora. Las ondas *aaa... bbb...* se agregan unas á otras y producen la onda resultante *AAA*. Las ondas *aaa... a₁a₁a₁* se componen dando por onda resultante la *aaa...*; por último, las ondas opuestas *aaa... bbb...* se destruyen en todos sus puntos y la onda resultante será nula, habiendo interferencia completa de sonidos.

Esto por lo que respecta á la teoría. Réstanos demostrar cómo se pueden realizar prácticamente estas consecuencias singulares de los principios de la acústica. Wheatstone se valió, para probar la interferencia del sonido, de un tubo sonoro de dos brazos

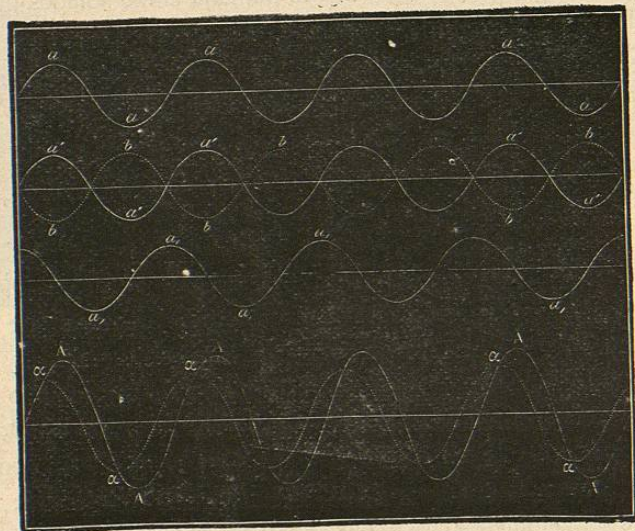


Fig. 325.—Interferencia de las ondas sonoras

bifurcados en forma de Y; poniendo sus aberturas sobre una placa vibrante que hacía resonar, obtenía á beneplácito, ó un refuerzo del sonido producido, ó el silencio del tubo. Había refuerzo, es decir, entrada en vibración de la columna de aire del tubo, cuando las dos aberturas correspondían con dos vientres alternos de la placa que tuvieran movimientos del mismo sentido; el tubo permanecía silencioso, si se colocaba á las dos aberturas enfrente de dos vientres consecutivos ó dotados de movimientos de sentido contrario.

El sabio físico inglés hacía otro experimento no menos concluyente con un aparato en el que los dos tubos, situados paralelamente, estaban enlazados por otro tubo puesto en ángulo recto con ellos; en los extremos de los tubos laterales había dos aberturas situadas frente á frente, si los tubos eran paralelos entre sí. En esta posición, se interponía entre ellos una placa sonora poniéndola en vibración, con lo cual la abertura de cada tubo se hallaba delante de una misma región de la placa, aunque una á un lado y otra á otro lado de ella, de suerte que los movimientos vibratorios comunicados á la columna de aire de uno de los tubos eran exactamente opuestos á los que recibía la columna del otro. Propagándose ambas ondas en el mismo instante en sentido inverso, se destruían, oyéndose solamente el sonido de la placa. Pero si entonces se hacía girar uno de los tubos, de modo que una sola de dichas aberturas resultara enfrente de la

superficie vibrante, la interferencia cesaba, el tubo entraba en vibración, y al punto se oía el refuerzo del sonido de la placa.

Tomemos ahora de Helmholtz otros dos ejemplos en los que ocurre el fenómeno de la interferencia, esto es, en que el sonido destruye al sonido:

„Figurémonos, dice, dos tubos ó cañones de órgano exactamente semejantes, acordados al unísono, y montados en el mismo secreto, muy cerca uno de otro. Cada uno de ellos, herido separadamente por el aire, da un sonido intenso; pero si se hace llegar el viento á ambos á la vez, el movimiento del aire se modifica de tal modo que la corriente entra en uno de los tubos mientras sale del otro; así es que no llega sonido alguno al oído de un observador distante, y sólo percibe entonces el sonido del aire.

„El diapasón presenta también fenómenos de interferencia que dimanar de que sus dos brazos ejecutan sus movimientos en sentidos contrarios (fig. 326). Si al golpear un diapasón lo acercamos al oído haciendo girar sobre su eje, se ve que hay cuatro regiones en que se percibe distintamente el sonido, que, en las cuatro regiones intermedias, es imperceptible. Las cuatro primeras (*a b c d*) son aquellas en que uno de los dos brazos, ó bien uno de los dos planos laterales del diapasón, se presentan de frente al oído. Las otras están situadas en posiciones intermedias, casi en planos (*mn, mn*) trazados por el eje del diapasón á 45° sobre los planos de los brazos. En este último caso, la interferencia ocurre en todos los puntos en que se anulan los movimientos en sentido contrario de los dos brazos del diapasón que actúan á la vez sobre las mismas regiones del aire ambiente. La reunión de estos puntos en un mismo plano perpendicular á los brazos da una hipérbola equilátera.

¿No deberán atribuirse á interferencias las desigualdades de intensidad que se notan al voltear una campana (1)? Tan pronto llega la onda al oído con toda su fuerza como aparece anulada, de donde resultan esas alternativas singulares que hacen creer que la campana se acerca ó se aleja. Cualquiera que sea el modo de división del cuerpo sonoro en partes vibrantes y en líneas nodales, sucede sin duda que las partes diametralmente opuestas actúan simultáneamente sobre el aire en sentido contrario, como los brazos de un diapasón, pareciéndonos muy plausible que las variaciones de intensidad del sonido en el último caso convengan también con el que acabamos de citar. Hay que agregar que, como el badajo de la campana no siempre da rigurosamente en los mismos puntos, debe resultar una desviación de los vientres y líneas nodales de aquella.

(1) Tal es la opinión de Tyndall, que atribuye las intermitencias de que tratamos á la falta de simetría de la campana: „Esta, dice, vibra más rápidamente en una dirección que en otra, y la coexistencia de estas dos series en vibración de periodos diferentes produce necesariamente pulsaciones. (El Sonido.)

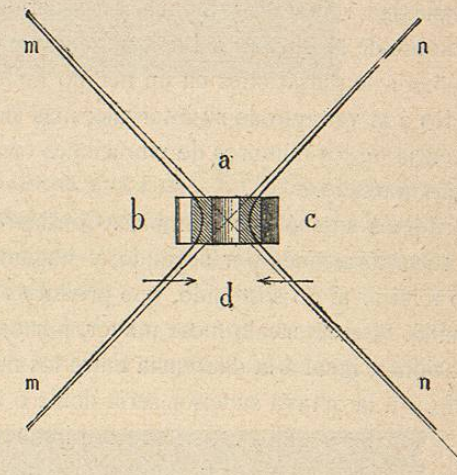


Fig. 326.—Interferencia de un diapasón

VIII

PULSACIONES Y SONIDOS RESULTANTES

Para que dos ondas puedan destruirse con su interferencia, es preciso que los sonidos que concurren estén exactamente al unísono y tengan la misma intensidad. Cuando no se ha llenado la primera condición, el concurso de los dos sonidos produce también en ciertos casos fenómenos muy interesantes, como los de las *pulsaciones* y de los *sonidos resultantes*.

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

Cuando dos sonidos que no difieren mucho de tono resuenan simultáneamente, percibe el oído, además de la impresión particular de la disonancia que resulta de su simultaneidad, refuerzos y atenuaciones periódicas. A estos refuerzos del sonido se les da el nombre de *pulsaciones*. La experiencia y el cálculo concuerdan para demostrar que el número de pulsaciones en un tiempo dado depende de la altura absoluta de los dos sonidos á la vez que de su intervalo; más claro, el número de pulsaciones es igual á la diferencia de los números de vibraciones completas que los dos sonidos ejecutan en el tiempo marcado.

Citemos uno ó dos ejemplos. Consideremos el do grave del violoncelo, que efectúa 128 vibraciones por segundo, y hagamos resonar al mismo tiempo el sonido, un poco inferior al do sostenido, que produce 133 vibraciones. Las pulsaciones serán 5 por segundo. Si el intervalo fuese mayor, por ejemplo el del mismo do al re, el número de pulsaciones, igual á la diferencia entre los números 128 y 144, sería igual á 16 por segundo. En la octava superior sería doble ó igual á 32; en la inferior quedaría reducido á 8. Si los dos sonidos estuviesen tan inmediatos que sólo hubiera una unidad de diferencia entre los números de vibraciones que aisladamente efectúan, no habría más que una pulsación por segundo.

Las pulsaciones no son otra cosa sino un fenómeno de interferencia, como fácilmente se comprende. Sean dos ondas sonoras de períodos poco diferentes, una de las cuales efectúa 8 vibraciones completas, al paso que la otra, que corresponde á un sonido más elevado, efectúa 9 en el mismo tiempo. Se las podrá representar mediante las dos curvas de la figura 327, cuyas sinuosidades marcan el estado de dilatación ó de condensación del aire en el trayecto común de las ondas, ó lo que es lo mismo, el estado del movimiento molecular debido á su transmisión. Al partir de un punto en que el movimiento de las dos ondas es opuesto y en que por consiguiente sus efectos se destruyen ó neutralizan, se ve que se separan poco á poco; á las cuatro y media vibraciones efectuadas por la primera, la segunda habrá efectuado solamente cuatro; desde este momento las fases, en lugar de ser opuestas, serán idénticas; los efectos de las ondas concurrirán, y por consiguiente su amplitud, la intensidad del sonido llegará á un máximo que decrecerá en seguida en toda la mitad inversa del período común. Así pues, á cada período de 9 vibraciones del primer sonido y de 8 del segundo habrá una atenuación y un refuerzo, y así sucesivamente. Por tanto, si en el curso de un segundo el número total de los períodos semejantes es 16, es decir, si el primer sonido, el más grave, verifica 128 vibraciones completas, al paso que el otro efectúa 144, el número de refuerzos del sonido ó de pulsaciones será 16, conforme lo da á conocer la ley antes enunciada.

Las pulsaciones se pueden hacer visibles merced al empleo de los métodos ópticos ó gráficos que sirven para inscribir los movimientos vibratorios. El fonautógrafo de Scott ya descrito (fig. 287) es un aparato que llena muy bien este objeto. Recordemos que es una paraboloides de revolución cortada en su foco, en el cual se extiende una membrana que vibra por efecto de las ondulaciones que recibe la superficie interior de la paraboloides, reflejándolas. Un estilete muy sutil, fijo á la membrana, traza en un cilindro giratorio una curva sinuosa que representa las vibraciones aéreas transmitidas. Tales son las curvas de la figura 328. La una representa las pulsaciones de dos sonidos cuyo intervalo es el de una nota á esta misma nota sostenida; la otra, las que proceden

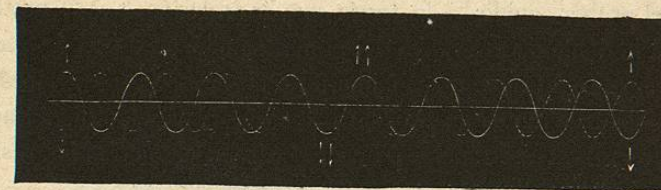


Fig. 327.—Curva representativa de dos sonidos que dan pulsaciones

del concurso de dos sonidos que tan sólo distan una coma. En dichas curvas se ven perfectamente marcados los períodos de refuerzo ó de atenuación del sonido.

Consíguese el mismo resultado con el método óptico de M. Lissajous, ó con las llamas manométricas y los espejos giratorios de Koenig.

Hemos dicho que las pulsaciones resultan sobre todo cuando los sonidos emitidos son casi del mismo tono. Pero son tanto más sensibles cuanto más próximos están los

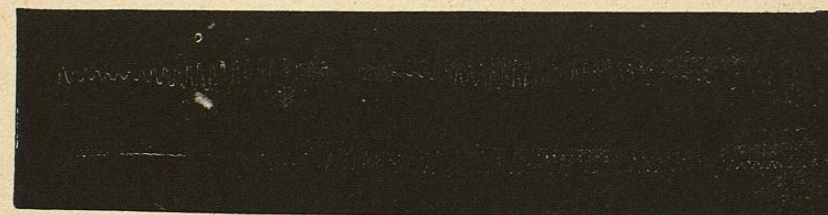


Fig. 328.—Pulsaciones producidas por dos sonidos cuyo intervalo es: 1.º, de una segunda menor; 2.º, de una coma

sonidos á ser simples, como sucede con los diapasones y los tubos cerrados; entonces las pulsaciones se hallan separadas por intervalos de silencio casi completo y por lo mismo más sensibles.

Cuando, á causa de fenómenos de interferencia, se anulan los sonidos fundamentales en los instrumentos que producen sonidos compuestos, todavía se oye resonar los armónicos, que á su vez dan origen á las pulsaciones. Hay un medio cómodo de obtener pulsaciones muy distintas, el cual consiste en servirse de dos tubos cerrados al unísono; tan luego como éstos hablan, se acerca el dedo á la embocadura de uno de ellos, lo cual produce una ligera atenuación en el tono del sonido, y al punto se perciben las pulsaciones. Acabamos de ver que los armónicos las producen también. He aquí lo que acerca de esto dice Helmholtz:

“Cuando dos sonidos complejos ejecutan pulsaciones, los armónicos las producen también; á cada pulsación del sonido fundamental corresponden dos del segundo sonido

elemental, tres del tercero, etc. Con armónicos de cierta intensidad sería fácil equivocarse al contar las pulsaciones, sobre todo si los golpes del sonido fundamental son muy lentos y separados por silencios de uno ó dos segundos: si en tales condiciones se quiere apreciar el tono de los sonidos que pulsan, es preciso recurrir á resonadores.,

El concurso de dos sonidos muy intensos, de distintos tonos, da asimismo lugar á un fenómeno particular que difiere á la vez de los sonidos primarios y de sus armónicos. Para valuar el tono de este sonido, llamado *resultante*, se restan los números de vibraciones de los sonidos componentes. Dos notas á la octava, cuyo intervalo expresa la relación de los números 1 y 2, producen un sonido representado por 1, es decir, al unísono del más grave; dos notas á la quinta (relación 2 á 3) dan el sonido resultante 1, octava grave del primer sonido; á la tercia mayor (relación 4 á 5) producen el sonido 1, que está á la doble octava grave del primer sonido, y así sucesivamente. Como se ve, la ley es semejante á la que da el número de pulsaciones, habiéndose deducido de ella que los sonidos resultantes no eran otra cosa sino el sonido engendrado por el concurso de pulsaciones bastante rápidas para producir en el oído la impresión de un sonido musical.

Pero esta teoría no era exacta, según lo ha demostrado Helmholtz práctica y analíticamente.

Y en efecto, este físico ha probado que, además de los sonidos resultantes diferenciales que acabamos de definir, hay sonidos resultantes cuyo tono se mide por la suma de los números de vibraciones de los componentes.

Un organista alemán, Sorge, fué el primero que observó los sonidos resultantes; pero el célebre músico italiano Tartini llamó antes que nadie la atención de los físicos hacia tan curioso fenómeno, en 1754.

CAPITULO IX

EL OÍDO Y LA VOZ

I

EL ÓRGANO DEL OÍDO EN EL HOMBRE

Todos los fenómenos físicos se revelan al hombre por la impresión que producen en sus órganos. Ante todo son para él sensaciones simples ó compuestas, según que tomen parte en su producción uno ó varios sentidos; así, por ejemplo, percibimos la luz por mediación del órgano de la vista, del ojo; por el tacto tenemos la sensación del calor; el esfuerzo que hacen nuestros músculos para levantar un cuerpo pesado, la vista de una piedra que cae, son para nosotros una demostración de la gravedad, y por último, el oído nos da la sensación del sonido.

Mas para estudiar los fenómenos en sí mismos, para hallar las condiciones y las leyes de su modo de producirse, interesa que discernamos, entre las sensaciones experimentadas, lo que corresponde á nuestros órganos de lo que les es extraño, exterior, única condición mediante la cual es accesible á nuestra inteligencia la naturaleza peculiar de los fenómenos. A decir verdad, esta abstracción nunca es completa, por cuanto

no hay una observación, una sola experiencia que no requiera la presencia del hombre y la intervención de alguno de sus sentidos para comprobar los resultados. ¿Cómo, pues, lograremos abstraernos de nosotros mismos, por decirlo así, en el estudio de los fenómenos físicos?

La verdad se abre paso poco á poco y los fenómenos se nos presentan en toda su independencia, variando de todas las maneras posibles sus modos de producirse así como los métodos de que nos valemos para observarlos, y comparando unas con otras las sensaciones que experimentemos.

Gracias al empleo de estos métodos, sabemos ahora lo que es el sonido; sabemos que consiste en un movimiento particular de las moléculas de los cuerpos elásticos, só-

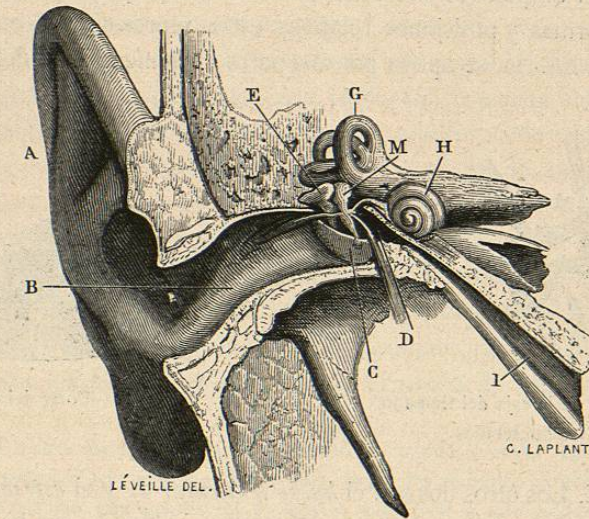


Fig. 329.—El oído humano

A, Pabellón de la oreja; B, conducto auditivo; C, membrana del tímpano; D, caja del tímpano; E, yunque; M, martillo; H, caracol; G, canales semicirculares; I, trompa de Eustaquio

lidos, líquidos y gaseosos. Hemos comprobado la existencia de las vibraciones y estudiado sus leyes. Réstanos ahora saber cómo se comunican estas vibraciones á nuestros órganos, hasta el momento en que, formando parte integrante, por decirlo así, de nuestro ser, la conmoción que producen en nuestros nervios se transforma en una sensación particular, que es la del sonido.

El oído es el aparato especial del hombre y de todos los animales encargado de recoger las vibraciones sonoras y de transmitir las al nervio auditivo. Procuremos hacer comprender, según los anatómicos, la disposición y funciones de las varias partes de este órgano.

Todos conocemos el oído externo ó oreja, situado á cada lado de la cabeza y compuesto de dos partes, el *pabellón* y el *conducto auditivo*. El pabellón A (fig. 329) consiste en una membrana cartilaginosa cuya forma varía según los individuos, pero que por lo común presenta el contorno de un óvalo irregular más estrecho en su parte inferior. En el centro una especie de embudo redondeado, ancho de boca, la *cuenca*, forma la entrada del conducto auditivo B, especie de tubo sonoro que termina á cierta profundidad, en el mismo punto en que empieza el oído medio. Allí, separado del conducto auditivo por una membrana tenue y delicada C, llamada tímpano, hay una espe-