

Pero también se han hecho otras mediciones directamente. Wertheim y Breguet midieron en 1851 la velocidad del sonido en los alambres de hierro telegráficos del ferrocarril de Versalles: el sonido recorrió en 1^s,2 la longitud de 4,067^m,2, lo cual corresponde á una velocidad de 3,485 metros por segundo, unas diez veces más que en el aire; mas por el método de Chladni resultaba dicha velocidad 16 veces mayor, y el de las vibraciones hubiera dado 4,634 metros, es decir, 14 veces: ignórase la causa de estas anomalías.

Terminaremos este capítulo con algunas cifras tomadas de Chladni y de Wertheim y que representan la velocidad del sonido en cierto número de cuerpos sólidos, tomando por unidad la misma en el aire (1); las tres últimas columnas la representan á diferente temperatura. Esta ejerce también su influencia en la velocidad del sonido en los metales; mas, al contrario de lo que sucede con los líquidos y los gases, el aumento de calor disminuye la velocidad, excepción hecha del hierro entre 20° y 100°. Y es que el calor disminuye por lo regular la elasticidad de los metales, al paso que aumenta la de los líquidos y gases. La excepción del hierro consiste probablemente en su estructura molecular especial, y así parece probarlo el que los hierros de varias procedencias, los alambres de hierro ó de acero, el acero fundido, no ofrecen el mismo carácter bajo este punto de vista.

La elasticidad de las maderas varía según la dirección de las fibras leñosas ó de las capas; es mucho mayor en la dirección de las fibras que en la perpendicular, y en este último sentido lo es aún más en dirección transversal á las capas que en la de las capas mismas. Lo propio acontece respecto de la velocidad del sonido, conforme lo demuestra el siguiente cuadro y según resulta de los delicados experimentos hechos por Wertheim.

VELOCIDAD DEL SONIDO EN VARIOS CUERPOS SÓLIDOS

	Según Chladni	Según Wertheim	A 20°	A 100°	A 200°
Plomo.	"	4,0	1230 ^m	1200 ^m	"
Oro.	"	6,4	1740	1720	1735 ^m
Estaño.	7,5	7,5	2550	"	"
Plata.	9,0	8,0	2710	2640	2480
Platino.	"	8,5	2690	2570	2460
Cobre.	"	11,2	3560	3290	2950
Zinc.	"	11,0	3740	"	"
Hierro.	16,6	15,4	5130	5300	4720
Acero fundido.	16,6	15,0	4990	4925	4790
Alambre de hierro.	"	15,5	4920	5100	"
Alambre de acero.	"	15,0	4880	5000	"

VELOCIDAD DEL SONIDO EN VARIAS MADERAS

	En dirección de las fibras	Transversal á las capas	En dirección de las capas
Abeto.	4640 ^m	1335 ^m	784 ^m
Haya.	3340	1840	1415
Roble.	3850	1535	1290
Alamo.	4280	1400	1050

(1) Las cifras de las dos primeras columnas son las velocidades expresadas en función de la del sonido en el aire; las otras columnas representan estas velocidades en metros.

VELOCIDAD DEL SONIDO EN ALGUNOS OTROS SÓLIDOS

Cristal de lunas.	19 veces la velocidad en el aire ó 5440 ^m
Cristal de tubos.	12 — — — — — ó 4080

Vese en resumen que de todas las substancias que pueden servir de vehículos al sonido, aquellas en que se propaga con mayor rapidez son: el hidrógeno entre los gases, el agua de mar entre los líquidos, el hierro entre los metales, y el vidrio y la madera de abeto entre los sólidos. Este último es el que predominaría si se adoptase la cifra de Chladni, el cual considera la velocidad del sonido en la madera de abeto equivalente á 18 veces la que tiene en el aire. Según los cuadros anteriores, el hierro es el que ocupa el primer lugar entre los sólidos por este concepto.

CAPÍTULO III

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN SONORAS

I

ECOS Y RESONANCIAS

Sabemos que la luz y el calor se propagan á la vez, directamente por radiación, é indirectamente por reflexión. Además, cuando la propagación se efectúa en medios de diferente constitución molecular y densidad, la dirección de las ondas luminosas y caloríficas sufre una desviación particular, conocida por los físicos con el nombre de *refracción*.

En el sonido, lo mismo que en el calor y la luz, se presentan también los fenómenos de reflexión y refracción, obedeciendo casi á las mismas leyes.

Cualquiera puede cerciorarse mediante observaciones familiares de que el sonido se refleja cuando, al propagarse por el aire ó por cualquier otro medio, tropieza con un obstáculo. Y en efecto, los ecos y las resonancias son fenómenos ocasionados por la reflexión del sonido. Cuando estamos en una habitación de dimensiones algo grandes, y en cuyas paredes no hay objetos que apaguen el sonido, la voz resulta reforzada, y el ruido de los pasos ó el del choque de los cuerpos sonoros resuena con mayor intensidad. En un salón espacioso, las palabras parecen duplicarse, lo cual suele hacerlas confusas y difíciles de oír distintamente. Este refuerzo de los sonidos, originado en este caso por la reflexión en las paredes y en general por la del sonido en un plano ó en una superficie cualquiera, es lo que se llama *resonancia*.

Si la distancia del observador á la pared reflectora excede de 20 metros, percibe de nuevo con claridad cada una de las sílabas que pronuncia: este fenómeno es el del *eco sencillo*; pero cuando cada sílaba resulta repetida dos ó muchas veces, el eco es *múltiple*.

Veamos cuáles son las razones físicas de estos fenómenos.

Por breve que sea la duración de un sonido, persiste algún tiempo la sensación que produce en el oído del observador, $\frac{1}{10}$ de segundo poco más ó menos. Durante este tiempo, el sonido recorre unos 34 metros, de suerte que si la distancia A O del obser-

vador á la pared que refleja el sonido (fig. 253) no llega á 17 metros, la sílaba que ha pronunciado tiene tiempo de ir y volver á su oído antes que cese enteramente la sensación experimentada. El sonido reflejado se mezclará, pues, con el que el observador percibe directamente, y como emanará á la vez de una multitud de reflexiones parciales de puntos situados á diferentes distancias, resultará de aquí un zumbido confuso, ó sea lo que acabamos de llamar resonancia. La misma explicación es aplicable al caso en que dos personas que estén en la misma sala hablen una con otra ó bien cada cual de por sí: la confusión que de ello resulte será tanto mayor cuanto con más rapidez hable uno ú otro interlocutor.

Ahora, si la distancia OA es 17 metros mayor, cuando el sonido de la sílaba pronunciada vuelva al oído por reflexión, la sensación habrá terminado ya, y se oye una repetición más ó menos débil del sonido directo. Este es el eco. Cuanto mayor sea la distancia, mayor será también el número de sílabas ó de sonidos distintos repetidos de este modo. Supongamos, por ejemplo, que esta distancia sea de 180 metros, y que el observador pronuncia cuatro sílabas en un segundo, la palabra: *contestadme*. El sonido invierte poco más de un segundo en ir á la superficie reflectora y volver: la sensación directa ha pasado, y el oído percibe segunda vez distintamente: *contestadme*. Esto por lo que se refiere al eco *simple*, que en este caso es *polisilábico*.

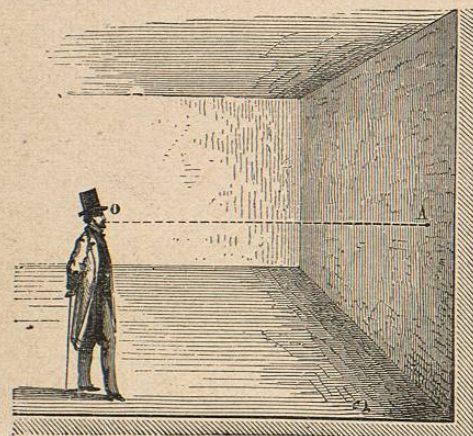


Fig. 253.—Reflexión del sonido: eco ó resonancia

Resulta el *eco múltiple* cuando se emite el sonido entre dos superficies paralelas reflectoras y bastante apartadas entre sí: entonces el sonido reflejado en una de ellas se refleja de nuevo en la otra, luego otra vez y otra, y así sucesivamente, aunque, como se comprenderá, perdiendo intensidad á cada nueva reflexión. Los edificios, las rocas, las arboledas y hasta las nubes producen el fenómeno del eco.

II

ECOS NOTABLES

Entre los ecos más notables cítase el eco múltiple de la quinta de Simonetta en Italia, que repite hasta cuarenta veces las palabras pronunciadas entre las dos alas paralelas del edificio. En el parque de Woodstock, en Inglaterra, había un eco que, según dice el doctor Plott, repetía distintamente diez y siete sílabas de día y veinte de noche. La misma particularidad, pero más marcada todavía, se observa en el eco de Ormessón, población del valle de Montmorency, cuyo eco, según asegura Mersenne, repetía de noche catorce sílabas y de día tan sólo siete. No es presumible que estos casos particulares reconozcan por causa el influjo de la calma de la noche en la intensidad del sonido, puesto que se trata de ecos simples, y aunque polisilábicos, no múltiples. ¿Consistirá la verdadera causa en que la temperatura más baja de la noche dismi-

nuye la velocidad del sonido, lo cual equivale á un aumento en la distancia de la superficie reflectora? ¿No podría causar también la degeneración del eco la falta de homogeneidad de las masas de aire durante el día? Humboldt atribuía á esta causa la diferencia de intensidad que había notado en el ruido producido por la gran catarata del Orinoco, según que se le oía de día ó de noche.

“En los cinco días que pasamos cerca de la catarata, dice, observamos con sorpresa que el estruendo del agua era tres veces mayor de noche que de día. En Europa se nota la misma singularidad en todas las cascadas. ¿Qué causa podrá haber para ello en un desierto en que no hay nada que interrumpa el silencio de la Naturaleza? Probablemente habrá que atribuirla á la corriente de aire cálido ascendente que de día contiene la propagación del sonido, y que cesa de noche cuando se enfría la superficie de la Tierra.”

Entre la catarata y el sitio donde estaba Humboldt había un llano salpicado de pedradas rocas con alguna verdura entre ellas. Por efecto de la reverberación solar, resultaba que las rocas eran de día bases de columnas de aire caliente, separadas por otras de temperatura más baja, y por lo tanto más densas. Al atravesar el sonido esta atmósfera de densidad variable, experimentaba reflexiones sucesivas que no podían menos de amenguar su intensidad. Restablecíase la homogeneidad de noche, y el sonido llegaba al oído sin haber pasado por reflexión alguna, y por consiguiente sin debilitarse.

“Hay un eco notable junto á Rosneath, hermosa casa de campo de Escocia, al Oeste de un lago salado que comunica con el río Clyde, diez y siete millas más abajo de Glasgow; dicho lago está rodeado de colinas, algunas de las cuales son rocas áridas; las otras están cubiertas de arbolado. Un hábil corneta, situado en una punta de tierra que el agua deja á descubierto y vuelto hacia el Norte, ha dado un toque; al punto el eco ha reproducido fielmente este mismo toque, aunque un tono más bajo; cuando cesó este eco, otro repitió con tono todavía más bajo y con igual exactitud el mismo toque; al segundo eco ha seguido otro, tan fiel como los anteriores, pero más bajo aún, y luego no se ha oído nada más; se ha hecho varias veces la misma prueba, dando siempre el mismo resultado.” (*Suplemento á la Enciclopedia.*)

Las reflexiones múltiples se explican muy bien, según hemos dicho anteriormente, así como la aminoración de la intensidad del sonido, que es su consecuencia. Por lo que hace al cambio de tono, es una singularidad más difícil de comprender. Al enumerar D'Alembert las condiciones en que se produce el sonido, indica en los siguientes términos la solución de la cuestión: “Por último, dice, se pueden disponer los cuerpos que producen *eco* de modo que de uno solo resulten muchos ecos que difieren tanto *por lo que respecta al grado del tono* como con relación á la intensidad ó fuerza del sonido; para lo cual basta hacer que produzcan ecos cuerpos propios para dar la tercia, la quinta y la octava de una nota que se haya emitido con un instrumento.” El ilustre geómetra no se explica más, por lo cual estamos en el caso de dudar si se puede aplicar esta última condición como se quiera. De todos modos, la descripción del fenómeno observado en Rosneath no parece dar materia para distintas interpretaciones. Nosotros nos inclinamos á creer que el cambio del tono no era más que una ilusión ocasionada por la disminución de intensidad.

En el *Curso de física* de Boutet de Monvel vemos mencionado un caso curioso del que pueden convencerse cuantos visitan el Panteón. En uno de los sótanos del monumento “basta que el guardián que guía á los visitantes dé un golpe seco en el faldón de su gabán, para que resuene en aquellas bóvedas sonoras un estampido comparable

con el de un cañonazo. Este es un fenómeno de resonancia y de concentración del sonido.

He aquí un fenómeno análogo:

“Colocándose, dice Tyndall, en lo alto del muro superior del Coloseum de Londres, edificio circular de 43 metros de diámetro, Wheatstone notó que cada palabra pronunciada era repetida gran número de veces. La más sencilla exclamación producía como una carcajada, y al rasgar un pedazo de papel parecía oírse una granizada.”

En las obras antiguas y modernas se hace mención de un gran número de ecos múltiples, cuyos efectos más ó menos sorprendentes merecerían comprobación, si bien se explican todos sin dificultad atribuyéndolos á reflexiones sucesivas del sonido. Entre estos ecos figura el que había, según se dice, en la tumba de Metela, hermana de Craso, cuyo eco repetía hasta ocho veces un verso entero de la *Eneida*. Adisson hace mención de un eco que reproducía hasta cincuenta y seis veces el estampido de un pistoletazo; estaba situado, como el de Simonetta, en Italia. El eco de Verdún, formado por dos grandes torres que distaban 52 metros entre sí, repetía doce ó trece veces la misma palabra. En la gran pirámide de Egipto hay salas subterráneas precedidas de largos pasadizos, en que el eco repite diez veces los sonidos.

“Las vibraciones, dice M. Jomard, repercutidas sucesivamente, recorren todos aquellos pasadizos de superficies lisas, dan contra todas aquellas paredes, y llegan lentamente hasta la salida exterior, debilitadas y parecidas al lejano estampido del trueno. En el interior, el ruido decrece con regularidad, y su extinción gradual, en medio del profundo silencio que reina en aquellos lugares, no deja de llamar la atención y de excitar el interés del observador.”

Finalmente, Barthius habla de un eco situado cerca de Coblenza, orillas del Rhin (entre Coblenza y Bingen, donde el Nahe desemboca en dicho río), que repetía diez y siete veces la misma sílaba, con la particularidad de que, al paso que no se oía casi á la persona que hablaba, las repeticiones producidas por el eco formaban sonidos muy distintos y con variaciones sorprendentes; ora parecía alejarse el eco, ora se acercaba, unas veces se percibía con toda claridad el sonido y otras era casi imperceptible; esta persona no oía más que una sola voz, mientras que aquella oía muchas, y el eco estaba á la derecha para unos y á la izquierda para otros. Análogas particularidades se observaban en un eco descrito en las Memorias de la Academia de Ciencias para 1692, y que estaba situado en Genetay, á dos leguas de Rouén, cerca de la abadía de San Jorge, eco formado en un patio semicircular, cercado de paredes semicirculares también. D'Alembert da en la *Enciclopedia* una explicación muy sencilla de los fenómenos que quedan descritos, todos los cuales se deducen, con arreglo á las leyes de la reflexión, de la forma circular del recinto y de las posiciones respectivas ocupadas en medio del patio por la persona que emitía sonidos y por sus oyentes.

Hace unos veinte años vivía yo á orillas del mar en las islas Hyeres, y tuve ocasión de oír uno de los ecos más asombrosos de que he sido testigo. Toda una mañana estuvieron repercutiendo las detonaciones de la artillería de un buque fondeado en la rada, en los costados de la montaña de la costa, produciendo ecos tan prolongados que al pronto me hicieron creer que había cerca toda una escuadra: parecían estampidos de truenos. Una sola descarga duraba casi un minuto. Es probable que las nubes contribuyeran entonces á la prolongación de esos efectos extraordinarios de reflexión del sonido.

Y en efecto, las nubes reflejan el sonido como los edificios, las rocas, las piedras y

los árboles, siendo probable que el fragor del trueno reconozca por causa las reflexiones sucesivas del sonido, del suelo á las nubes y viceversa, así como de las nubes entre sí. La detonación propiamente dicha que acompaña á la descarga eléctrica de las nubes es un fenómeno instantáneo como la chispa misma; cuando menos es brevísima la duración de dicha detonación, aunque tal vez exceda á la del relámpago. Para convencerse de ello basta observar que el trueno parece tanto más seco y breve cuanto más pronto sucede al relámpago, es decir, cuanto á menor distancia del observador estalla. En este caso, el fragor que le sigue y que parece cada vez más débil es indudablemente una sucesión de ecos.

Hay sin embargo que tener en cuenta la circunstancia de que el relámpago ocupa una extensión considerable, que puede calcularse en centenares de metros y á veces en uno ó dos kilómetros; que traza curvas sinuosas y que las diferentes partes que lo forman se hallan á distancias notablemente variables del observador. Si se admite que la detonación tiene origen á lo largo del surco luminoso, y, por decirlo así, en el mismo instante de un extremo á otro, claro está que el sonido llegará sucesivamente al oído, y además con muy diferente intensidad, de suerte que al parecer durará de cinco á seis segundos, después de los cuales se percibirán los sonidos engendrados por la reflexión en las nubes ó en el suelo, es decir, por el fenómeno del eco, resultando entonces lo que constituye el fragor del trueno.

Al enumerar D'Alembert los cuerpos propios para reflejar el sonido y formar eco, cita las nubes, y añade: “De aquí proceden esos terribles estampidos del trueno que brama, y cuyos ecos repetidos retumban en el aire.”

Arago apunta en su dictamen sobre la velocidad del sonido la circunstancia de que todos los cañonazos disparados en Montlhéry iban acompañados de un fragor semejante al del trueno y que duraba de 20 á 25 segundos. En Villejuif no se observaba otro tanto: sólo cuatro veces, y con menos de un segundo de intervalo, se oyeron dos estampidos distintos del cañón de Montlhéry. Por último, “en dos circunstancias siguió á la detonación un fragor prolongado: estos fenómenos no se han presentado jamás sino en el momento de aparecer algunas nubes; cuando la atmósfera estaba completamente despejada, el ruido era único é instantáneo.” ¿No será permitido deducir de esto que los disparos múltiples del cañón de Montlhéry que se oían en Villejuif resultaban de ecos formados en las nubes, y considerar esta circunstancia como un argumento favorable para la precedente explicación del fragor del trueno?

III

LEYES DE LA REFLEXIÓN DEL SONIDO

Estos son los hechos: veamos ahora á qué leyes obedece la reflexión del sonido, leyes sencillísimas que, según se demuestra rigurosamente, son consecuencia natural del movimiento vibratorio que constituye el sonido, y que se comprueban experimentalmente sin necesidad de recurrir á hipótesis.

Dase el nombre de *rayo sonoro* (1) á una línea recta que se supone partida del

(1) La expresión *rayo sonoro* es una abstracción. En realidad, el movimiento vibratorio de un foco produce en el medio gaseoso en que se propaga el sonido una sucesión de ondas esféricas, formadas de capas alternativamente dilatadas y condensadas. En los fenómenos de reflexión y refracción cuyas leyes vamos á enunciar, estas ondas son las que en realidad se reflejan contra un obstáculo, ó se rompen al pasar á un me-