

decir, la posición que el observador ocupa relativamente al punto del que parte el sonido, ejerce también gran influencia en la intensidad de éste. Si cuando un cazador hace resonar un cuerno de caza, vuelve el pabellón del instrumento en varias direcciones, la intensidad del sonido varía hasta el punto de que tan pronto parece que se acerca como que se aleja del sitio en que se encuentra el oyente: por lo general, todo obstáculo interpuesto, sobre todo tratándose de un cuerpo cuya masa transmite mal las vibraciones, impide que se propague el sonido; fórmase tras él á modo de una sombra sonora, y la intensidad del sonido resulta notablemente alterada.

IV

DEL ALCANCE DE LOS SONIDOS

El límite á que un oído de regular sensibilidad cesa de percibir un sonido es lo que se llama su *alcance*. La razón y la experiencia concuerdan para demostrar que este límite depende desde luego de la intensidad intrínseca de la conmoción sonora, así como de todas las demás circunstancias que modifican la intensidad del sonido á lo largo del trayecto que recorre para llegar hasta el oído. Así pues, el alcance de aquél debe variar con la naturaleza del medio en que se propaga, con la densidad de este medio, su temperatura, el estado de sosiego ó agitación del aire y probablemente también con la cantidad de vapor de agua que contiene, en una palabra, con la mayor ó menor homogeneidad de sus capas sucesivas. Conviene entrar por este concepto en algunos detalles, pues la cuestión tiene un punto de vista práctico de cierta importancia, en especial por lo que respecta á la eficacia de las señales sonoras de que se hace uso en la marina, en los ferrocarriles, etc., cuando á causa de las nieblas no se pueden hacer señales luminosas.

Las circunstancias capaces de modificar la intensidad de un sonido son muy varias, como lo prueban los casos anteriormente citados, siguiéndose de aquí que es muy difícil determinar la mayor distancia á que puede llegar. En los ejemplos notables de sonidos oídos á distancias considerables, que citan los físicos, es probable que el suelo, más bien que el aire, sirviese de vehículo á las vibraciones sonoras. Más arriba hemos mencionado lo que dice Humboldt acerca de las detonaciones producidas por los terremotos ó por las erupciones volcánicas, cuyas detonaciones se han propagado á distancias de 800 á 1200 kilómetros.

Chladni cita muchos casos que prueban que el estampido del cañón se propaga á veces á grandísimas distancias: en el sitio de Génova se le oyó á 90 millas italianas; en el de Manheim, en 1795, se le oyó en Nordlingen y Wallerstein, al extremo opuesto de Suabia; en la batalla de Jena, entre Wittenberg y Treuenbrietzen. "Yo mismo he oído, dice, el ruido de los cañonazos disparados en Wittenberg, á 17 millas alemanas (126 kilómetros) de distancia, no tanto por intermedio del aire como por las conmociones de los cuerpos sólidos, apoyando la cabeza contra una pared."

En el acta de la sesión de la Academia de Ciencias del 15 de enero de 1840 se hizo constar lo siguiente:

"M. Arago comunica ciertos informes, proporcionados por M. Hacqueville, acerca de las distancias hasta las cuales se propaga el sonido. El cañoneo que precedió á la toma de París á principios de 1814 se oyó por espacio de quince horas en toda la comarca que se extiende desde Lisieux hasta Alençon y en todos los valles circunve-

cinos (170 á 180 kilómetros á vista de pájaro). Elías de Beaumont añade en apoyo del aserto de Hacqueville que el cañoneo de 1814 se oyó distintamente en el distrito de Canón, entre Lisieux y Caén, á unos 126 kilómetros de París, en línea recta."

En estas circunstancias, que no son por cierto excepcionales, ¿se transmitía el sonido por intermedio del aire ó por el del suelo? La verdad es que aquél se propaga con frecuencia á gran distancia por el aire mismo, como lo prueba el fragor del trueno y más especialmente las detonaciones de los bólidos que á veces estallan á enormes alturas. Chladni habla de meteoros cuya explosión no se oyó sino á los diez minutos de verse el globo luminoso, lo cual supone una altura de 200 kilómetros cuando menos. El bólido observado en el Mediodía de Francia el 14 de mayo de 1864 presentó la misma particularidad, notándose que transcurrieron hasta cuatro minutos entre la aparición del meteoro y la percepción del ruido de la detonación. M. Daubrée dice con este motivo:

"Para que una explosión producida en capas de aire tan enrarecidas ocasione en la superficie de la Tierra un ruido de semejante intensidad y en una extensión horizontal tan considerable, se requiere que su violencia en las altas regiones exceda á todo cuanto conocemos."

La duración de la detonación de ciertos bólidos es un fenómeno no menos notable; probablemente hay en él un efecto de repercusión del sonido en las capas de desigual densidad del aire, análoga al fragor del trueno en las tormentas.

Consistiendo el sonido en la impresión que produce en el órgano del oído la sucesión de las vibraciones ó de las ondas sonoras, puede suceder, como sucede en efecto, que la impresión cese antes que el movimiento vibratorio, causa de esta impresión, haya cesado á su vez. Regnault comprobó perfectamente esta distinción en sus experimentos sobre la velocidad del sonido. "Cuando la onda, dice, no tiene ya suficiente intensidad, ó se ha modificado lo bastante para no producir ya en nuestro oído la sensación del sonido, todavía es capaz, aun después de un trayecto muy prolongado, de marcar su llegada en nuestras membranas." El ilustrado físico observó que una pistola, cargada con un gramo de pólvora, produce al dispararse una detonación que deja de percibirse después de recorrer el sonido trayectos de

1150 metros en un tubo de	108 milímetros de diámetro
3810 — — — de	300 — — —
9540 — — — de	1100 — — —

El alcance del sonido es sensiblemente proporcional al diámetro del tubo ó de la columna de aire que lo propaga; pero la onda que, á las distancias que acabamos de indicar, no da ya sonido perceptible, sigue caminando sin extinguirse casi completamente hasta recorrer las distancias siguientes:

4056 metros en la cañería de	108 milímetros
11430 — — — de	300 — — —
19851 — — — de	1100 — — —

El alcance del sonido perceptible y el alcance limitado de las ondas silenciosas deben de ser mucho menores en el aire libre que en un espacio limitado, porque en el primero disminuye rápidamente la amplitud de las vibraciones á consecuencia de la intensidad del sonido: teóricamente hemos dicho ya que esta disminución es proporcional al cuadrado de las distancias. Creíase que la intensidad era constante en una columna ci-

líntrica, lo que habría dado al alcance un valor infinito; pero los experimentos de Regnault prueban que no es así: las ondas se debilitan poco á poco hasta que se extinguen por la influencia de las paredes de los tubos. Por lo que hace á las ondas sonoras propiamente dichas, véase que el límite de percepción ó alcance es bastante reducido.

V

DE LA TRANSPARENCIA Y OPACIDAD ACÚSTICAS DE LA ATMÓSFERA

Llegamos ya á los experimentos de Tyndall sobre el alcance de las ondas sonoras, experimentos interesantes por cuanto en muchos puntos se hallan en contradicción con las ideas generalmente admitidas por los físicos acerca de este asunto. Ya hemos visto que hasta ahora se había considerado un tiempo claro y sereno como muy favorable para la propagación del sonido; también se creyó que el alcance era mayor si el viento soplabá en dirección del movimiento de las ondas, con tal que aquél fuese una brisa ligera. Véase, pues, cómo los hechos desmienten esta opinión.

La corporación de Trinity House había dado al físico inglés el encargo de "determinar la distancia á que podían oírse en el mar las señales que comúnmente se hacen en casos de niebla, como la bocina ó portavoz, las trompetas marinas, los silbatos de vapor y los cañonazos, y además, de averiguar las causas de las variaciones en esta distancia, dependientes de las mudanzas en las condiciones atmosféricas. Habiéndose preparado convenientemente las señales en lo alto de las peñas del South Foreland, cerca de Dover, M. Tyndall pasó á bordo de un vapor que el gobierno había puesto á su disposición, y se fué alejando ó acercando á la costa hasta que las señales eran perceptibles. Llamáronle desde luego la atención las variaciones singulares y al parecer inexplicables que se presentaron en breve. Por ejemplo, siendo favorable el 25 de junio la dirección del viento, se oyó distintamente en el mar á $5\frac{1}{2}$ millas inglesas de distancia, ó sean 8750 metros en números redondos, el sonido de la trompeta marina así como el estampido de una pieza de á 18 disparada desde las peñas de Dover. Al día siguiente, 26, estos mismos sonidos eran perceptibles á 17 kilómetros de la costa, á pesar de ser el viento directamente contrario. El 1.º de julio, aunque soplabá viento contrario y la bruma era muy densa, percibiéronse los sonidos á $20\frac{1}{2}$ kilómetros de distancia, ó sea vez y media más de la que mediaba cuando se oyeron con tiempo claro y viento favorable. El 2 de julio sobrevino de pronto en la atmósfera una opacidad acústica verdaderamente extraordinaria; el estampido de los cañonazos apenas fué perceptible á 6750 metros de la costa, sin causa meteorológica aparente. El 3, haciendo un tiempo sereno y caluroso, y estando el mar perfectamente tranquilo, hubo precisión de acercarse hasta 3500 metros de la costa para que se oyera el ruido del cañón de á 18. El observador divisaba muy bien el humo de los fogonazos, pero no percibía el más leve ruido. Parece, pues, demostrado que la atmósfera clara y despejada no es en modo alguno favorable para la propagación del sonido, y que la concordancia entre la transparencia óptica y la acústica, consignada por el doctor Derham en las *Transacciones filosóficas* para 1708, y admitida generalmente desde entonces, carece de fundamento.

Antes de pasar adelante y de dar á conocer la explicación que propone Tyndall para estas anomalías, debemos decir que los hechos observados por él no son enteramente nuevos. Arago consigna en su dictamen sobre los experimentos hechos en 1822 en Villejuif y en Monthéry una diferencia singular entre la intensidad del sonido per-

cibido en cada estación. "El tiempo estaba sereno y casi enteramente tranquilo, dice; el escaso viento que hacía soplabá de Villejuif á Monthéry, ó hablando con más propiedad, del NNO. al SSE. En Villejuif oíamos perfectamente los cañonazos disparados en Monthéry, así fué que nos quedamos sorprendidos en alto grado al día siguiente cuando nos dijeron que las detonaciones de nuestra estación apenas llegaban á la otra., En Monthéry no se oyeron más que siete disparos de cada doce. Al otro día el resultado fué aún más sorprendente, pues sólo se oyó un disparo de cada doce. Arago no se ocupó en explicar estas singularidades, porque, según dice, sólo podía basarlas en conjeturas desprovistas de pruebas.

El hecho que acabamos de citar es tanto más curioso cuanto que en él se trata de sonidos casi simultáneos, que se propagan en el mismo medio en condiciones meteorológicas que casi se pueden considerar idénticas. Así, un mismo medio aéreo que, en un sentido, goza de la propiedad á que Tyndall da el nombre de *transparencia acústica*, resulta opaco para el sonido en el sentido opuesto.

Cuando Martins y Bravais midieron la velocidad del sonido entre la cumbre del Faulhorn y el lago de Brienz, notaron también que el sonido llegaba debilitado á la estación inferior; pero en este caso la causa de la disminución de intensidad podía y debía atribuirse á la gran diferencia de altitud, es decir, á la densidad del aire que era menor en el punto donde se producía el sonido. En Monthéry sucedía lo contrario, toda vez que las ondas sonoras emanadas de Villejuif se propagaban subiendo 30 y más metros hacia la estación opuesta.

La explicación propuesta por Tyndall no es otra sino la de Humboldt, esto es, la falta de homogeneidad de las capas de aire á través de las cuales se propagan las ondas sonoras. Cuando se hizo el 3 de julio la última experiencia anteriormente citada, el tiempo estaba sereno y caluroso. "Los rayos de un sol ardiente, al caer sobre el mar, debían producir forzosamente una copiosa evaporación: en concepto del sabio inglés, el vapor así formado no debía mezclarse con el aire de modo que formara con él un conjunto homogéneo, sino que los espacios desigualmente saturados de la atmósfera debían quedar separados por superficies aptas para la producción de ecos parciales por reflexión, resultando de aquí menor intensidad en las ondas y la consiguiente disminución en el alcance del sonido. Un hecho observado el mismo día confirmó á su parecer la verdad de esta explicación: presentóse una nube bastante densa para velar el sol, y la evaporación contenida un tanto, permitió que la mezcla de aire y de vapor ya formado fuese más homogénea; á los pocos minutos, el alcance del sonido se elevó de 3500 á 3750 metros; fué creciendo hasta el anochecer á medida que el sol se acercaba al horizonte, y cuando el astro se puso oíanse los cañonazos á doce kilómetros y medio de distancia.,

El efecto de un copioso aguacero fué análogo al de la interposición de la nube. "En la mañana del 8 de octubre, apenas se percibía el ruido de la explosión de la pieza de á 18 á 8750 metros de la costa inglesa. Al mediodía cayó un fuerte chubasco mezclado con granizo; al punto empezó á reforzarse gradualmente el sonido, y á medida que los observadores se fueron alejando de la costa, lo pudieron oír distintamente á 12 kilómetros de distancia. En este caso, la lluvia contuvo la evaporación del mar, devolviendo á la atmósfera su homogeneidad.,

¿Las nieblas y las brumas espesas son obstáculos para la propagación del sonido? ¿Disminuyen su alcance? Así se creía hasta ahora. Varios experimentos hechos por el mismo sabio parecen en contradicción con esta opinión. En efecto, en los días 10, 11 y

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

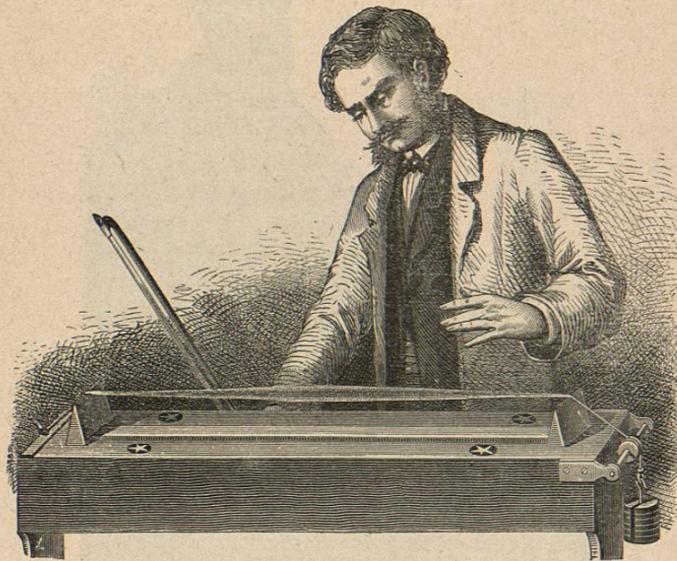


Fig. 260.—Vibraciones transversales de una cuerda sonora

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-