

mente la experiencia. En el Museo de antigüedades del Louvre hay una sala de esta clase en la que dos personas situadas en los dos extremos opuestos pueden hablar en voz baja, sin temor á la indiscreción de las personas que pudieran escucharlas colocadas en una posición intermedia. Utilízase la reflexión del sonido en muchos instrumentos que tendremos ocasión de describir cuando nos ocupemos de las aplicaciones de la acústica á las ciencias y á las artes.

IV

REFRACCIÓN DEL SONIDO

Hemos visto que el sonido se propaga por intermedio de todos los medios elásticos, pero en cada uno de ellos con desigualdad y con velocidades que dependen en cierto

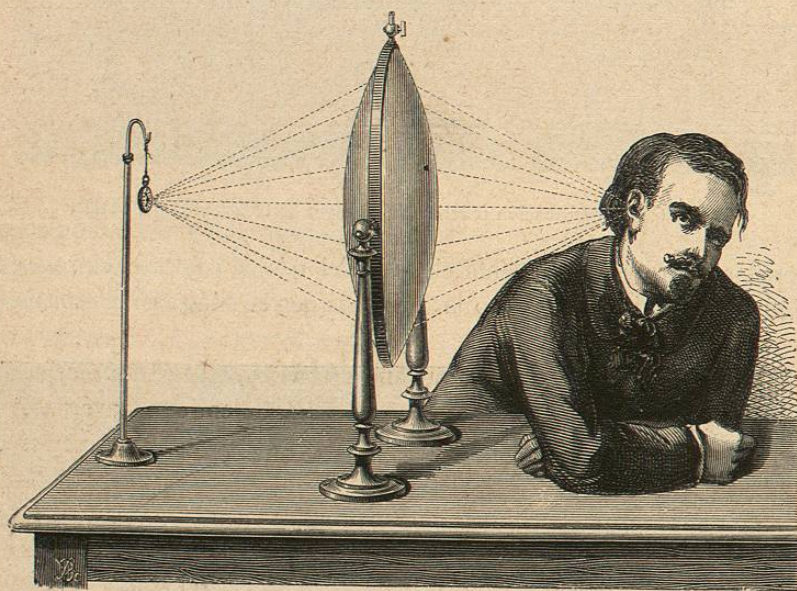


Fig. 258.—Refracción de las ondas sonoras. Lente de Sondhaus

modo de la densidad del medio atravesado. Cuando el sonido pasa de un medio á otro, como cambia su velocidad, resulta una desviación del rayo sonoro, la cual lo aproxima á la perpendicular á la superficie de separación de los dos medios, si la velocidad es menor en el segundo que en el primero. Como la luz experimenta una desviación parecida, comprobada por la experiencia mucho antes de conocer su verdadera explicación teórica, y como ha largo tiempo que se conoce este fenómeno con el nombre de *refracción*, se ha dado el de *refracción del sonido* á la desviación de los rayos sonoros. Véase cómo M. Sondhaus ha hecho patente esta desviación.

Con membranas de colodión hizo un saco de forma lenticular y lo llenó de gas ácido carbónico. La velocidad del sonido es en este gas menor que en el aire. Los rayos sonoros que van á dar en la superficie esférica de la lente se refractan al pasar al través del gas, y cuando salen por la superficie opuesta deben converger en un punto único ó foco. Y en efecto, si se pone un reloj, por ejemplo (fig. 258), en el eje de esta lente biconvexa, reconócese que en el eje y al otro lado hay un punto en que el ruido

del volante se oye distintamente y mucho mejor que en cualquiera otra parte; por consiguiente, hay convergencia de ondas sonoras hacia el punto del eje de la lente de que se trata, y por lo tanto refracción del sonido.

Llenando de gas hidrógeno una lente bicóncava se podría también comprobar el fenómeno de la refracción del sonido. Hemos visto que la velocidad de éste en el hidrógeno es mayor que en el aire; en su consecuencia, las superficies convexas de separación de los dos medios deben producir el mismo efecto en la dirección de los rayos sonoros y desviarlos como la lente bicóncava llena de gas ácido carbónico.

El físico M. Hajech se ocupó de nuevo de la refracción de las ondas sonoras en 1857, sirviéndose al efecto de prismas llenos de gases y líquidos de diferentes densidades, y averiguó que la refracción del sonido sigue las mismas leyes que la de los rayos luminosos, y que el índice de refracción (ó relación entre los senos de los ángulos de incidencia y de refracción) es igual á la relación de las velocidades del sonido en los medios experimentados y en el aire.

CAPÍTULO IV

PROPIEDADES DISTINTIVAS DE LOS SONIDOS

I

CARACTERES PROPIOS DE LOS DIFERENTES SONIDOS

Cuando dos ó más sonidos llegan simultáneamente á nuestro oído, ó se suceden con intervalos bastante cortos para que podamos compararlos entre sí, advertimos en ellos diferencias ó semejanzas que se pueden referir á tres propiedades particulares: *intensidad*, *tono* y *timbre*.

Un sonido puede ser más ó menos fuerte, más ó menos intenso, es decir, puede conmover el órgano del oído con mayor ó menor energía. Unas veces la impresión es tan débil que necesitamos prestar particular atención para percibirla, y tan fuerte otras que nos causa una sensación dolorosa, y aun las detonaciones de las piezas de artillería suelen lastimar los órganos en términos de producir una sordera temporal. Entre ambos extremos de la intensidad de los sonidos y de los ruidos figuran todos los grados posibles de sensación auditiva.

Pero no por esto son idénticos dos sonidos de igual intensidad. El uno puede ser más *alto*, más *agudo* que el otro, ó si se quiere, el segundo nos parece más *bajo* ó más *grave*. La relación de gravedad ó agudeza de dos sonidos se llama *tono* ó *altura*. En música, la altura de los sonidos empleados y que por su sucesión ó simultaneidad componen la melodía y la armonía, está sujeta á reglas especiales cuyos principios expondremos más adelante. No todos los sonidos son adecuados á este modo de comparación que permite asignar su tono; y de aquí resulta esa distinción entre *ruido* y *sonido musical*, aplicándose la primera denominación á los sonidos cuyo tono no puede apreciar un oído ejercitado, y la segunda á todo sonido regular que forma un grado cualquiera en la serie indefinida de los sonidos empleados en música.

Por último, aun cuando dos sonidos sean de tono é intensidad iguales, pueden diferir también por otro concepto, cual es el de tener cada cual un *timbre* particular. La

definición rigurosa del timbre exigiría que se conociera su causa: después veremos hasta qué punto es posible esta definición; mientras tanto, daremos una idea de él valiéndonos de ejemplos. Una flauta, un violín, un oboe, un fiscorno, que tocan la misma frase musical y que, por lo tanto, emiten los mismos sonidos con la misma intensidad e igual tono, producen á pesar de ello en el oído muy distinta impresión. Los del fiscorno son más llenos, más sonoros; los de la flauta más dulces; los del violín y del oboe más chillones y nasales; y por esto se dice que difieren de timbre. El timbre es el que en gran parte establece la diferencia entre las voces (1), y el que nos hace conocer á las personas sin que las veamos. ¿En qué se distinguen las vocales simples ó compuestas y los diptongos? En el timbre, que varía de unas á otros.

Sentadas estas definiciones, abordemos el estudio físico de las cualidades de los sonidos: intensidad, tono y timbre.

II

INTENSIDAD DE LOS SONIDOS

Para que haya sonido se requiere el concurso de tres elementos: un foco sonoro, es decir, que se ponga en vibración un cuerpo que es el cuerpo sonoro propiamente dicho; que haya un medio capaz de transmitir estas vibraciones; en una palabra, el órgano del oído que las percibe.

De aquí se siguen tres géneros de influencia de los cuales depende la intensidad de un sonido. El volumen, la forma del cuerpo sonoro, y la naturaleza de la materia que lo compone, el modo de conmoción que se emplea para hacerle entrar en vibración, la energía del movimiento que reciben así sus moléculas, son otras tantas circunstancias que hacen variar la amplitud de las vibraciones del cuerpo, y por consiguiente lo que se puede llamar *intensidad intrínseca* del sonido.

Tal es el primer género de influencia.

Pero la naturaleza del medio que transmite el sonido, su densidad, su temperatura, su estado de reposo ó de agitación, su extensión, es decir, la distancia del oído al cuerpo sonoro, son también circunstancias de las cuales depende dicha intensidad; pero aquí no se trata ya de la intensidad intrínseca.

Lo propio sucede si se tiene además en cuenta la mayor ó menor sensibilidad del oído, es decir, del órgano que recibe las ondas sonoras en la persona que percibe el sonido: el oído puede estar más ó menos ejercitado, y nadie ignora hasta dónde llega la aptitud de los salvajes para percibir los ruidos lejanos más leves. Pero la sensibilidad del oído puede depender en un mismo individuo de circunstancias puramente particulares, aumentándola notablemente la carencia completa de cualquier otro sonido distinto del que se escucha, y disminuyendo, por el contrario, á causa de una porción de ruidos simultáneos, que el oído se acostumbra á oír y que por último no distingue ya, por decirlo así, pero que menguan su facultad de audición.

Ocupémonos de todas estas causas modificadoras de la intensidad de los sonidos, por el orden en que las hemos enumerado.

La amplitud de las vibraciones da al sonido mayor ó menor intensidad, como se

(1) Hay otras causas de diferencias entre las voces de varias personas; mil modos, propios de cada cual, de acentuar las largas y las breves, de marcar el ritmo, sin contar esos ligeros matices en el tono de los sonidos, que aun en la prosa hablada forman una especie de melodía, ó por lo menos de recitado.

puede comprobar mediante gran número de experimentos familiares. Cuando se pulsa ó se frota con el arco la cuerda de un violín ó de cualquier otro instrumento análogo, el sonido va debilitándose á medida que el movimiento de vaivén de la cuerda es menos marcado. Cuanto más vigoroso es el frotamiento del arco, más marcadas son las oscilaciones y mayor también la intensidad del sonido. Pero como no por esto resulta modificado su tono musical (1), debe deducirse que cada oscilación de la cuerda se



Fig. 259.—Gruta della Favella, ú Oreja de Dionisio

efectúa con mayor rapidez, siendo más considerable el camino recorrido en un espacio de tiempo igual cuando la amplitud es asimismo más considerable.

Por lo demás, cuando un cuerpo elástico produce un sonido, no todas las moléculas de que se compone se separan por igual de su posición de equilibrio, pues, como veremos más adelante, no faltan algunas que continúen inmóviles. Por ejemplo, un timbre en cuya superficie se da un golpe, sufre en cada uno de los anillos circulares de que consta una deformación que le hace tomar formas elípticas opuestas y alternadas. Los anillos de la base propenden á ejecutar vibraciones más lentas y de mayor amplitud que

(1) Más adelante veremos que el tono está en relación directa del número de vibraciones efectuadas en un mismo espacio de tiempo, como, por ejemplo, en un segundo,

los anillos inmediatos al vértice. Pero la solidaridad de los anillos produce una compensación entre esas varias amplitudes y velocidades, resultando de aquí, por lo que respecta al sonido producido, un tono y una intensidad medias que dependen de las dimensiones y de la naturaleza del metal del timbre. Existe aquí evidente analogía con las oscilaciones del péndulo compuesto, cuya duración es, según sabemos, un promedio entre las de las oscilaciones de una serie de péndulos simples de longitudes diferentes.

En todo lo que acabamos de decir sólo se trata de la intensidad intrínseca del sonido, que depende únicamente de la amplitud de las vibraciones ejecutadas por las moléculas de los cuerpos sonoros. Pero como el sonido llega á nuestro oído por intermedio del aire, la intensidad parecerá tanto mayor cuanto más considerable sea el volumen de aire agitado a la vez, y por consiguiente, cuanto mayores sean las dimensiones del cuerpo sonoro. Una cuerda tendida sobre un pedazo de madera angosto produce un sonido menos fuerte que si lo está sobre una mesa ó caja resonante, como en el violín, el piano y otros instrumentos de música. Todos sabemos que si se hace vibrar un diapasón, primero al aire y luego apoyando este pequeño instrumento en una mesa ó en cualquier otro cuerpo elástico, el sonido primitivo adquiere mucha mayor intensidad á causa del mayor volumen del cuerpo vibrante.

La intensidad de un mismo sonido percibido por el oído á diferentes distancias decrece en razón inversa del cuadrado de éstas, siendo aquella á 10 metros cuatro veces mayor que á 20, nueve más que á 30, etc., con tal que las circunstancias de la propagación continúen siendo las mismas y que no haya cuerpos reflectores inmediatos que contribuyan á reforzar el sonido. De aquí resulta que si en dos puntos diferentes se producen dos sonidos, uno de los cuales tenga cuádruple intensidad que el otro, el observador que se coloque en el tercio de la línea que los separa, hacia el lado más débil, creará oír dos sonidos de igual fuerza. Por lo general, si el oyente se sitúa en un punto de la línea que reúne los dos cuerpos de donde emanan ambos sonidos y en el que le parezcan iguales sus intensidades, éstas serán en realidad proporcionales á los cuadrados de las distancias del punto intermedio á los dos cuerpos sonoros.

Véase cuál es la razón de esta ley. Al propagarse las ondas sonoras esféricamente alrededor del centro de conmoción, ponen en movimiento secciones esféricas sucesivas, cuyo volumen, en igualdad de espesor de las capas, está en razón directa de su superficie y crece por lo tanto como los cuadrados de sus distancias al centro. Como las masas de aire que forman las capas agitadas son cada vez mayores, el movimiento que la misma fuerza les comunica disminuye en la misma proporción.

En las columnas ó tubos cilíndricos, las secciones sucesivas son iguales, y por consiguiente la intensidad de los sonidos debería ser siempre la misma, cualquiera que fuese la distancia. Sin embargo, los recientes experimentos de M. Regnault prueban que en realidad hay cierta disminución de intensidad que crece con la distancia y que procede en gran parte de la reacción de las paredes del tubo que limitan la columna de aire. Con todo, á cortas distancias, la atenuación del sonido es muy poco marcada. M. Biot se cercioró, en los experimentos que hizo para averiguar la velocidad del sonido en los cuerpos sólidos, de que el transmitido por el aire en los tubos de las cañerías de París no se debilitaba de un modo apreciable sino después de recorrer un kilómetro próximamente.

“A esta distancia, dice Biot, se oía la voz más baja de modo que se podían distinguir perfectamente las palabras y seguir una conversación. Quise conocer el tono en que la voz dejaba de ser perceptible, y no pude conseguirlo. Se oían y discernían las

palabras pronunciadas en voz tan baja como cuando se habla al oído; de suerte que para que dos personas no se oyeran, no quedaba absolutamente otro medio sino el de no hablar.”

Digamos de paso que para hacer con éxito esta clase de experimentos es preciso elegir las horas más silenciosas de la noche, según lo aconseja el mismo Biot, por ejemplo de una á dos de la madrugada.

“De día, mil ruidos confusos agitan el aire exterior, hacen resonar los tubos é impiden distinguir y aun extinguen las tenues conmociones producidas por una voz baja en el extremo de la columna de aire. En estas circunstancias, ni siquiera se oyen los ruidos más fuertes.”

Estas propiedades de las cañerías cilíndricas explican ciertos efectos de acústica que se advierten en las salas ó en las bóvedas de varios monumentos. Las aristas de éstas ó de las paredes forman canales en los cuales se propaga el sonido con facilidad suma y sin perder nada de su intensidad primitiva. En París hay dos salas de esta clase: una, de forma cuadrada y abovedada, en el Conservatorio de artes y oficios; otra, exagonal, en el Observatorio. En una y otra los ángulos se reúnen en la bóveda y producen á modo de canales muy á propósito para conducir el sonido sin debilitarlo; de suerte que dos personas pueden hablar en voz baja, de un ángulo á otro, sin que las situadas entre ellas puedan percibir nada de su conversación.

La cúpula de San Pablo en Londres ofrece análoga disposición, citándose además la galería de Glocéster, la catedral de Agrigento en Sicilia y la famosa gruta de Siracusa conocida hoy con el nombre de *Grotta della Favella* y en la antigüedad con el de *Oreja de Dionisio* (fig. 259), porque, según se dice, el tirano de este nombre había hecho abrir una comunicación secreta entre su palacio y las cavernas donde tenía encerradas á sus víctimas, aprovechando la disposición particular de la gruta para espiar todas sus palabras.

III

VARIACIONES DE INTENSIDAD DEL SONIDO CON LA ALTURA, EL DÍA Y LA NOCHE

La intensidad del sonido percibido varía según la densidad del medio que lo propaga ó, mejor dicho, del medio en que tiene origen; y así lo hemos indicado ya al hablar del experimento hecho bajo la campana de la máquina neumática, en la que, según se recordará, el sonido del timbre disminuye á medida que se hace el vacío. Lo contrario sucedería, según lo ha comprobado Hauksbee, si se comprimiese el aire en el recipiente en que está colocado el cuerpo sonoro. Las personas que se elevan á las altas regiones del aire, ya á las cumbres de las montañas ó bien en globo, advierten una disminución en el sonido, producida por la de la densidad del aire atmosférico. Hemos citado ya la observación de Saussure y la de Tyndall sobre la escasa intensidad de la detonación de una pistola en la cima del Monte Blanco.

“En los experimentos que se hicieron en Quito para medir la velocidad del sonido entre dos estaciones situadas á 3,000 y 4,000 metros sobre el nivel del mar, el estampido de un cañón de á 9, á 25,500 metros de distancia, hacía tan poco efecto como el estampido de una pieza de á 8, á 31,300 metros, en los llanos de las inmediaciones de París.” (Daguín.)

Véanse otros hechos curiosos entresacados de los relatos de varios aeronautas: estos

hechos prueban que si los sonidos nacen muy débiles en los medios enrarecidos de las altas regiones, se propagan con dificultad por las capas inferiores menos densas; y por el contrario, los sonidos de abajo se oyen fácilmente en las alturas. Sin embargo, el camino recorrido es el mismo en ambos casos, como también son las mismas, aunque en sentido inverso, las densidades de las capas atravesadas por las ondas sonoras. Así pues, la intensidad del sonido depende principalmente, por lo que respecta á la densidad del medio, de la del medio en que está inmediatamente sumergido el cuerpo sonoro, lo cual se explica, pues á igualdad de amplitud de las vibraciones del cuerpo la masa aérea agitada en el punto de partida es mayor en un medio denso que en otro enrarecido.

El célebre aeronauta Glaisher llegó en su primera ascensión, en 1862, á 3,500 metros de altura. "El silencio es allí absoluto, dice, semejante al que reinaba en el abismo cuando la tierra fué separada de las aguas. De pronto oigo una armonía subterránea; no es un eco de la voz de los ángeles, sino una música humana que llega hasta estas regiones en que el aire, menos denso, parece que sólo desea vibrar." El mismo aeronauta oyó en otra ascensión el ruido del trueno, y eso que el globo se cernía en un espacio absolutamente despejado, á 7,000 metros de altura. La tormenta bramaba muy lejos, á sus pies y en el seno de unas nubes que estaban 5,000 metros más bajas que él. Otra vez oyó el silbido de la locomotora hallándose á 5,000 y 7,600 metros de altura. Las voces humanas se perciben muy bien desde las altas regiones del espacio, al paso que los aeronautas con dificultad pueden hacerse oír, aun desde escasas alturas. "Mientras oímos, dice Flammarión, una voz que nos habla á 900 metros debajo de nosotros, no se oyen con claridad nuestras palabras así que nos remontamos á más de 100 metros."

Las ondas sonoras se transmiten con mayor intensidad en el agua que en el aire, siempre y cuando el cuerpo sonoro vibre con la misma energía en uno y otro medio. Acabamos de ver que en los cuerpos sólidos, de forma cilíndrica ó prismática, se propaga el sonido sin debilitarse tanto como en el aire ó en los gases. Todos conocemos el experimento que consiste en aplicar el oído al extremo de un largo madero, oyéndose así distintamente los ruidos más leves, por ejemplo el que produce el roce con un alfiler. Los salvajes aplican el oído al suelo para percibir los ruidos lejanos, que el aire no podría transmitir á la misma distancia.

Un hecho conocido generalmente y de fácil observación es que el sonido se oye mejor de noche que de día. Anteriormente hemos tenido ocasión de citar lo que acerca de este hecho dice Humboldt con motivo del ruido de las cataratas del Orinoco, ruido que le pareció tres veces más intenso de noche que de día. M. Daguín atribuye la causa, en su *Tratado de física*, á la falta de homogeneidad del aire calentado con desigualdad por el Sol. Tyndall da la misma explicación.

"El aumento de intensidad del sonido de noche, dice Daguín, era cosa conocida ya por los antiguos: Aristóteles la menciona en sus *Problemas* y Plutarco en sus *Diálogos*. Se ha pretendido ver la explicación de ella en los mil ruidos confusos que llegan al oído durante el día y que cesan de noche, pero esta explicación no puede ser aplicable á las selvas del Orinoco, en las cuales una multitud de animales, de insectos nocturnos, llena el aire con sus gritos ó con sus zumbidos. Humboldt ha dado con la verdadera explicación, haciendo notar que durante la noche el aire es homogéneo y está en calma, lo cual favorece la propagación del sonido, al paso que de día está agitado y compuesto de partes de densidad desigual á causa de la acción del Sol, que caldea el suelo de muy

distinto modo según la naturaleza y el estado de su superficie. Resulta de aquí que el aire en contacto con él adquiere temperaturas diferentes, y que elevándose las partes más dilatadas y mezclándose imperfectamente con las menos calientes, el aire inmediato á la superficie de la Tierra es poco homogéneo. En virtud de esto un rayo sonoro experimenta una reflexión parcial al pasar de una masa de aire á otra de diferente densidad, de suerte que la porción de dicho rayo que pasa más allá de esta masa ha perdido parte de su intensidad.

"Aristóteles había sospechado ya esta explicación, pues atribuía á la calma de la noche la mayor intensidad del sonido, y también Plutarco, que, yendo más lejos, veía la causa de la debilidad del sonido durante el día en el *movimiento temblón* del aire, ó en la acción del Sol. Vese también por qué el cambio de intensidad del sonido en el mar, entre el día y la noche, es menos notable que en tierra, lo cual consiste en que la temperatura de la superficie del agua es mucho más uniforme que la del suelo."

La razón de esta diferencia es otra, según Nicholson; en concepto de este físico, está en que durante el día impresionan el oído á la vez una multitud de ruidos, cada uno de los cuales debe distinguirse con menos facilidad. "El silencio de la noche, dice, da reposo á nuestros órganos, haciéndolos más aptos para recibir tenues impresiones: el silencio exalta el oído como la obscuridad aguza la vista." No nos parece dudoso que el concurso de estas diferentes causas influya para que de noche sea mayor que de día la intensidad de los sonidos, y por consiguiente su alcance. Más adelante haremos mención de experimentos interesantes, debidos á Tyndall, los cuales prueban que el asunto dista mucho de estar dilucidado.

Según las observaciones de Bravais y de Martins, la distancia á que puede llegar un sonido depende también de la temperatura del aire, siendo mayor durante los fríos del invierno, en las regiones glaciales del polo ó de las altas montañas; débese atribuir la causa de esto á la homogeneidad del aire más bien que á su densidad, toda vez que ésta es menor en la montaña que en el llano. Por otra parte, allí también está más exaltada la sensibilidad del oído; en las regiones polares, lo mismo que en las altas montañas y que en las capas elevadas del aire á las que se ha podido llegar en globo, reina siempre un silencio casi absoluto, y los mil confusos ruidos de las regiones habitadas no contrarian allí la audición de un sonido único. Esos ruidos innumerables deben actuar en nuestro oído del mismo modo que actúa de día la luz difusa del aire, la cual nos impide ver las estrellas, tan fáciles de distinguir en la obscuridad.

La intensidad de los sonidos transmitidos depende sin duda del reposo ó agitación del aire. Estos se oyen distintamente á gran distancia cuando el tiempo está en calma; el viento los debilita, aun cuando procedan del punto en que resuena el cuerpo sonoro, y así lo comprobó Derham en Porto-Ferrajo (isla de Elba), donde se oían mejor los cañonazos disparados en Liorna estando la atmósfera tranquila que cuando el viento soplabá, aun siendo su dirección la de Liorna á Porto.

Así pues, el viento debilita el sonido, disminuye su alcance tanto más cuanto más opuesta es la dirección en que sopla, llegando su influencia al *mínimum* cuando su dirección está en ángulo recto con el movimiento de las ondas sonoras. Por último, la disminución es más marcada en los sonidos débiles que en los fuertes. Quizás no dependa enteramente de la agitación de las moléculas del aire la influencia del viento en el alcance de los sonidos, inclinándonos á creer que el ruido mismo del viento entra por algo en ello. Tan luego como sopla con alguna fuerza, produce el efecto de un bajo continuo que debe hacer menos viva la sensibilidad del oído. La dirección de las vibraciones, es