

y de los cuales nos ocuparemos más adelante, la forma de la vibración no será ya la de una vibración pendular, sino la resultante de las vibraciones pendulares correspondientes á cada uno de los sonidos componentes (1).

Si hubiésemos considerado una cuerda tirante, en lugar de tener un cuerpo elástico por sí mismo, hubiéramos tenido un cuerpo dotado de elasticidad por tensión; pero si se hace vibrar esta cuerda por flexión, pulsándola, dándole un golpe ó frotándola con un arco de violín, no por eso dejará de describir cada uno de sus puntos la misma clase de movimiento: sus vibraciones, simples ó compuestas, serán siempre análogas á las del péndulo. Por último, en vez de mover el cuerpo elástico en dirección perpendicular á su longitud, produciendo así las vibraciones *transversales*, se le podría imprimir un movimiento en el sentido de esta longitud, y así, por ejemplo, una barra metálica por la cual se pase el dedo mojado ó un pedazo de paño espolvoreado de colofonia, experi-

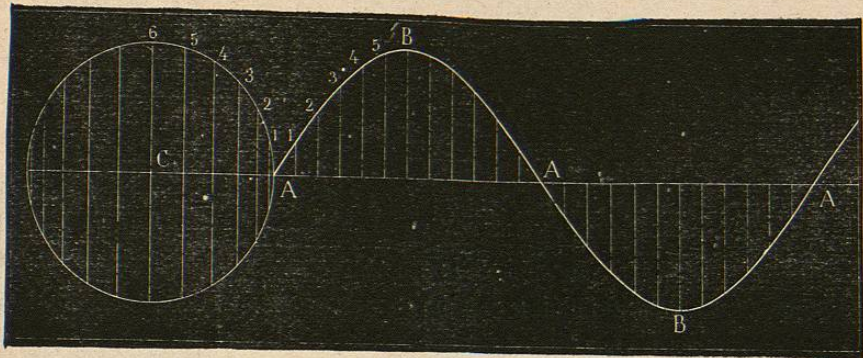


Fig. 270.—Forma de una vibración pendular simple

menta entonces en su longitud contracciones y dilataciones periódicas de las que resulta un sonido, y en este caso las vibraciones son longitudinales. Pero el movimiento elemental de cada una de estas moléculas puede descomponerse siempre en las mismas fases que hemos analizado anteriormente; siempre es un movimiento análogo al del péndulo, y las vibraciones compuestas, vibraciones pendulares.

Una campanilla ó un timbre, una membrana tirante, una placa sonora, etc., en una palabra, un sólido elástico susceptible de emitir sonidos por percusión, frotamiento, etc., vibra siempre del mismo modo; sólo que, según veremos después, mientras unas partes del cuerpo vibran, otras continúan en reposo; hay regiones en que el movimiento vibratorio llega al máximo de amplitud, y otras en que es nulo; es decir, que el cuerpo sonoro se divide en *vientres* y *nodos*, que varían con arreglo á ciertas circunstancias. Las leyes de estas vibraciones son más ó menos complicadas; pero cada molécula, considerada de por sí, sigue siempre la misma ley constante de oscilaciones isócronas.

(1) El ilustre geómetra Fourier ha demostrado la siguiente ley matemática: *Toda forma de vibración, regular y periódica, puede considerarse como la suma de vibraciones pendulares cuyas duraciones son una, dos, tres ó más veces menores que la del movimiento dado.* Aplicando Helmholtz la ley de Fourier á la acústica, ha traducido así su fórmula: *Todo movimiento vibratorio del aire en el conducto auditivo, correspondiente á un sonido musical, puede considerarse siempre, y siempre también de un solo modo, como la suma de cierto número de movimientos vibratorios pendulares, correspondiente á los sonidos elementales considerados.*

Más adelante veremos que el timbre, ó sea la tercera cualidad del sonido musical, depende de la presencia y del predominio de tales ó cuales sonidos armónicos en el sonido fundamental. El timbre está, pues, íntimamente unido á la forma de la vibración, al paso que el tono depende de su duración y la intensidad de su amplitud.

Como, después de todo, los sonidos producidos por los cuerpos sólidos vibrantes no son perceptibles sino en tanto que sus vibraciones se comunican al oído por un medio

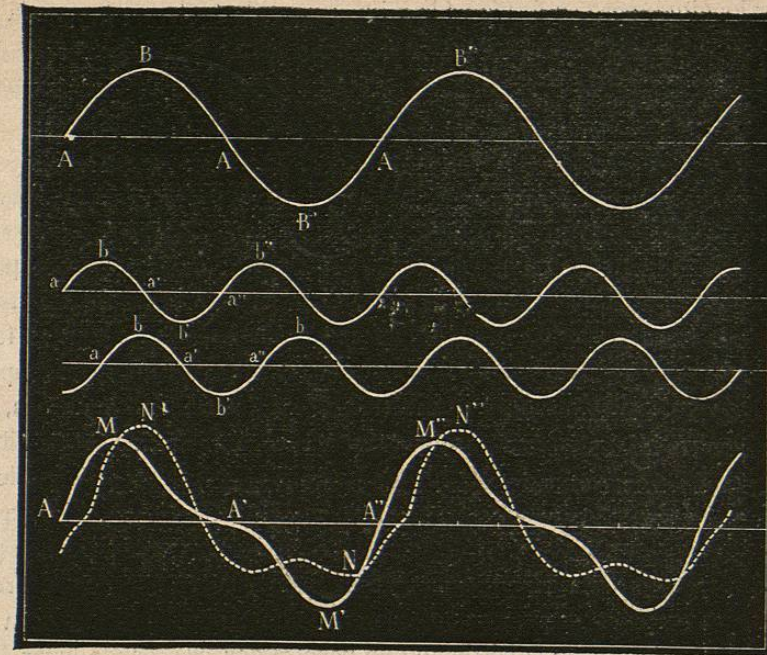


Fig. 271.—Vibraciones compuestas

fluido, líquido ó gaseoso, y como, según la experiencia nos lo enseña, las cualidades del sonido dependen del número ó de la amplitud de las vibraciones del foco, puede

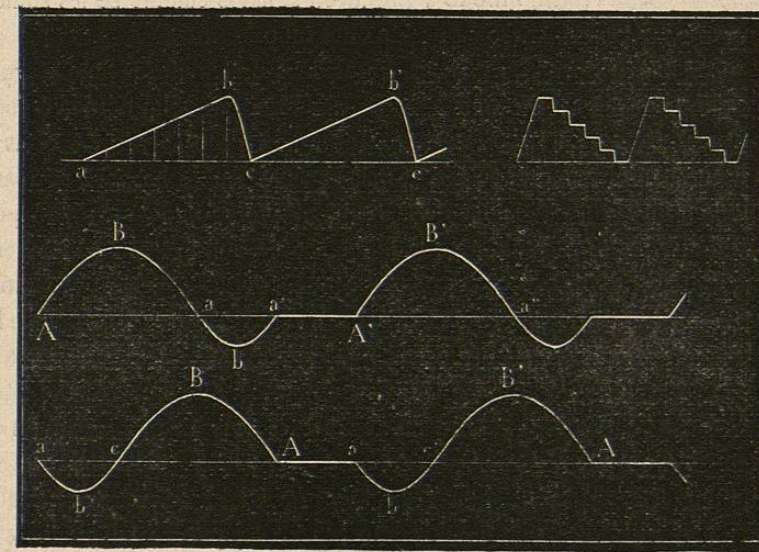


Fig. 272.—Vibraciones periódicas discontinuas

admitirse ya por analogía que las vibraciones de los medios elásticos tales como el agua, el aire, etc., son idénticas á las de los sólidos. Y en efecto, hemos visto que el movimiento que constituye las ondas aéreas, el cual consiste en condensaciones y dila-

taciones sucesivas, es análogo al movimiento pendular que hemos estudiado más arriba. Sábese que los sonidos se propagan en el agua como en el aire, aparte de la diferencia en la velocidad de propagación. Para un mismo sonido, las ondas sonoras líquidas tienen mayor longitud, pero su forma es la misma; y por lo tanto, no hay nada que cambiar en la explicación dada con respecto á las ondas aéreas.

III

VIBRACIONES DE LAS MASAS FLUIDAS

Réstanos decir cómo ocurren las cosas cuando el sonido, en vez de propagarse simplemente por los líquidos y los gases, como sucede cuando el cuerpo sonoro es un líquido elástico, tiene origen en el fluido mismo. Pero antes describamos el fenómeno.

Para ello nos limitaremos á recordar, puesto que los describiremos más ampliamente, los que ocurren en los tubos sonoros. En éstos, una columna gaseosa, aérea, de longitud determinada, encerrada en las paredes de un tubo sólido, entra en vibración y produce sonidos cuando se hace penetrar por su boca una rápida corriente de aire. La entrada en vibración de la columna de aire puede efectuarse de dos distintos modos. Ora está provista la boca del tubo de una lámina elástica, tenue y flexible (*lengüeta* batiente ó libre), que entra en vibración á impulso de la corriente de aire, resultando de aquí un paso periódico de este fluido, que engendra el sonido; ora la boca del tubo está cortada en bisel y divide la corriente que penetra por ella, dando lugar á compresiones y dilataciones alternadas, á vibraciones que se comunican á la columna de aire del tubo y la hacen vibrar á su vez. La vibración de las boquillas de los instrumentos de música que, como la trompa, son tubos terminados en una embocadura hemisférica ó cónica, conmueve la columna de aire haciéndola vibrar al unísono. Por último, los tubos vibran también del mismo modo y producen sonidos cuando se les sumerge en el agua y llega una corriente líquida por la boca del tubo.

En todos estos fenómenos, en que las vibraciones de las masas fluidas producen los sonidos, hay una circunstancia común, y es la salida de una vena líquida ó gaseosa por un orificio. Era por tanto interesante estudiar el modo cómo se forman estas vibraciones cuando se reduce el hecho á su forma más sencilla. Así lo ha hecho Savart en una serie de experimentos sobre la salida de las venas líquidas que se escapan por un orificio abierto en una pared delgada bajo la influencia de una presión más ó menos grande. El sabio acústico ha logrado comprobar así muchos y muy curiosos fenómenos que esclarecen sobre manera el asunto, antes bastante obscuro, de la generación de los movimientos vibratorios en el seno de los líquidos y de los gases. Para dar una idea de sus investigaciones, lo mejor será transcribir el resumen de que han sido objeto en una conferencia dada en 1869 por M. Maurat en la "Sociedad de los amigos de las ciencias."

"Empecemos, dice, por recordar cuál es, en concepto de Savart, la constitución de una vena líquida vertical que sale por un orificio practicado en una pared delgada. La parte más inmediata al orificio es límpida y transparente; parece (al menos cuando no se la examina con precauciones particulares) inmóvil como una varilla de cristal. Tras ella se ve una segunda parte enturbada y con dilataciones y reducciones alternadas, cuya posición es casi constante, aun cuando son producidas por porciones de líquido que se renuevan continuamente. Este aspecto de la vena está reproducido fielmente en el primer dibujo de la izquierda de la figura 273.

„Hagamos constar desde luego que la segunda parte de la vena debe su apariencia á su discontinuidad. Y en efecto, está formada de gotas separadas, las cuales dejan además entre sí intervalos bastante grandes proporcionalmente á su diámetro. Para cerciorarse de ello, se puede pasar con rapidez el dedo por la parte turbia, y á menudo sucede que no se moja. También es posible, después de colorar bastante el líquido con una infusión de añil, tender detrás de la vena en sentido vertical un hilo suficientemente iluminado. Este hilo quedará oculto por la primera parte de la vena que es continua, pero se le verá con facilidad al través de la segunda. El experimento será más concluyente si se emplea un líquido enteramente opaco, como el mercurio. Por último, basta observar los movimientos de las gotas, mirando la vena de arriba abajo, para verlas perfectamente distintas (fig. 273, segundo dibujo). ¿Cuál puede ser la causa de tan notable fenómeno?„

M. Maurat recuerda á continuación los experimentos de Plateau sobre las figuras de equilibrio de las masas líquidas, cuando están sometidas únicamente á las acciones mutuas de las moléculas. Estas figuras son la esfera, el cilindro y el plano. El equilibrio de un cilindro es inestable cuando la altura excede del triple del diámetro; entonces la forma cilíndrica se destruye, y el cilindro se resuelve en gruesas esferas separadas por esferillas de dimensiones mucho más reducidas.

„Ahora bien, continúa, una vena no es otra cosa sino un cilindro líquido en movimiento en el sentido de su eje. La desigual velocidad de sus diferentes partes, que propenden sin cesar á disminuir de diámetro, puede modificar el fenómeno, pero no cambiar su naturaleza, porque esta desigualdad es muy insignificante si las moléculas están poco distantes. Así pues, á partir de un punto muy inmediato al orificio, la vena líquida debe empezar á sufrir la misma transformación que el cilindro de Plateau, siendo la rapidez del movimiento lo único que nos oculta las dilataciones y reducciones que en ella sobrevienen, y que ha comprobado Savart. La parte turbia no empieza hasta el momento en que se ha establecido la discontinuidad, es decir, cuando la transformación es completa. Pues bien, puesto que su duración es proporcional al diámetro, y la velocidad de salida es á su vez proporcional á la raíz cuadrada de la carga, la longitud de la parte límpida de una vena deberá ser también proporcional á estas dos cantidades, como así resulta en efecto de las medidas de Savart.

Así pues, el aspecto que presenta á la vista el chorro ó desagüe de una vena líquida se explica por la formación de gotitas, unas relativamente mayores que otras.

„Hablemos ante todo de las gotas gruesas. Sus diferentes moléculas no están animadas exactamente de la misma velocidad, por cuanto pertenecen á puntos de la vena situados á distancias desiguales del orificio. Estas diferencias de velocidad tienen indudablemente por efecto el deformarlas, y como siempre propenden á volver al estado esférico, ejecutarán vibraciones que tan pronto les darán la apariencia de elipsoides

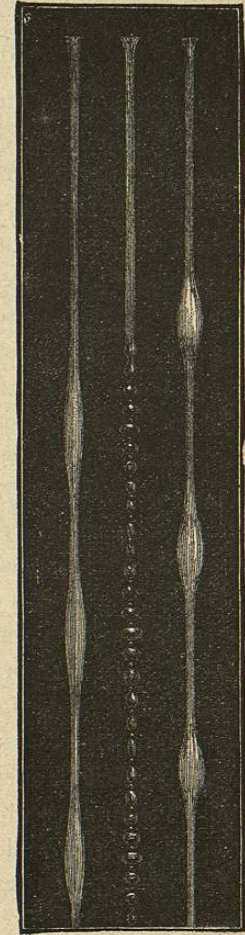


Fig. 273.—Constitución de una vena ó chorro líquido

prolongados en sentido vertical como aplanados en el mismo sentido. En su consecuencia, la vena presentará en su parte turbia henchimientos correspondientes á las gotas que se hallan en el primer caso y estrangulaciones ó reducciones correspondientes á las que están en el segundo, y siendo las vibraciones sensiblemente isócronas, las distancias de un vientre al siguiente deberían crecer como los espacios que recorre un cuerpo pesado en los segundos sucesivos de su caída, ó sea, como la serie de los números impares (1).

„Veamos ahora cuál debe ser el efecto en el medio ambiente de la vena constituida como acabamos de explicar. La sucesión regular de las gotas en un punto determinado comunica forzosamente al aire impulsos periódicos iguales, capaces de producir un sonido si son bastante rápidos. Así lo demuestra la experiencia en la mayoría de casos; verdad es que el sonido suele ser muy débil, y que para oírlo hay que aplicar el oído muy cerca de la vena; pero se puede conseguir que sea más intenso. Para ello se escogerá un orificio circular bastante ancho para que las gotas sean más gruesas; se hará salir el líquido bien verticalmente y con suficiente presión, para que los empujes sean más fuertes, y por último, convendrá atenuar en lo posible el ruido de la caída en el depósito inferior.„ Entonces resulta un sonido musical: tan luego como empieza, se observa un cambio notable en la vena, cuya parte líquida se reduce y cuyos vientres y nodos se hacen más marcados (fig. 273, tercer dibujo). Debe notarse que se observa este mismo cambio cuando se produce un sonido del mismo tono cerca de la vena líquida.

Vese, pues, que el desagüe de los líquidos va acompañado de movimientos vibratorios que pueden ser bastante rápidos é intensos para producir sonidos. Los experimentos de M. Massón prueban que ocurren fenómenos muy semejantes en la salida de las venas gaseosas. „Este físico, sigue diciendo M. Maurat, ha demostrado que resultan sonidos cuando se hace salir por orificios circulares adecuados el aire comprimido en un gran cajón por medio de un fuelle. El ruido que se oye es análogo á un silbido y está formado por una mezcla muy compleja de sonidos que difieren á la vez en tono é intensidad. Si se rodea la vena gaseosa producida de este modo de un tubo cilíndrico cuyo eje ocupe aquella, la columna de aire de este tubo recibirá la conmoción de los movimientos vibratorios de la vena que pueda reforzar, y se oír un sonido musical muy puro y fácil de discernir. El aparato será un verdadero tubo ó cañón de órgano.„

Más adelante describiremos otros fenómenos que tienen gran analogía con los anteriores: nos referimos á los sonidos producidos por llamas incandescentes, que han recibido los nombres de *llamas sonoras* y *llamas cantantes ó sensibles*.

IV

ONDAS SONORAS AÉREAS

Acabamos de ver cómo se pueden hacer perceptibles las vibraciones de los cuerpos sonoros: en breve diremos cómo se llega á contar su número y á comprobar práctica-

(1) Si las gotas no son visibles, consiste en la persistencia de las impresiones luminosas en la retina que hace que cada gota aparezca á la vez en todas las posiciones sucesivas y con todas las formas que adquiere. Este efecto desaparece cuando se aparta la vista verticalmente siguiendo el movimiento del líquido; entonces la imagen de la gota movable queda fija en el mismo punto de la retina y parece aislada, y la gota en reposo como lo está en realidad. Haciendo el experimento en la obscuridad, y alumbrando luego la vena con una chispa eléctrica, la duración sobre manera rápida de la iluminación permite ver la columna líquida en su forma verdadera, del propio modo que á la luz de un relámpago parecen inmóviles los rayos de una rueda animada del movimiento más rápido.

mente las leyes de sus variaciones en los sólidos de varias formas y en las columnas gaseosas, cilíndricas ó prismáticas. Pero, cuando un cuerpo resuena, las vibraciones que ejecuta no llegan á nuestro oído de modo que nos produzcan la sensación de un sonido sino agitando progresivamente la masa de aire interpuesta entre el centro de conmoción y nuestros órganos. A falta de este vehículo, el sonido no se percibe, ó por lo menos llega muy débil á nosotros, después de propagarse por los cuerpos sólidos que establecen una comunicación indirecta entre el cuerpo y el oído. El aire entra, pues, á su vez en vibración por el impulso de los movimientos que efectúan las moléculas del cuerpo sonoro. Sus capas pasan por condensaciones y dilataciones sucesivas que se propa-



Fig. 274.—Condensaciones y dilataciones que constituyen la onda sonora aérea

gan con velocidad constante, cuando la densidad y la temperatura subsisten, ó, si se quiere, cuando la homogeneidad de la mezcla gaseosa es perfecta. Procuraremos hacer comprender cómo se suceden las ondas sonoras en el aire ó en cualquier otro gas, y cómo se ha podido medir su longitud.

Supongamos que se pone el brazo de un diapason delante de un tubo prismático y que se le hace vibrar. Las vibraciones se propagarán por la columna de aire del tubo.

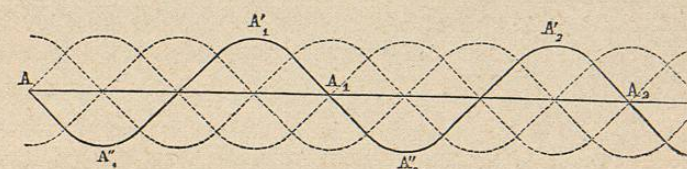


Fig. 275.—Representación gráfica de las fases de una onda sonora

Veamos lo que ocurre en las capas gaseosas cuando la lámina metálica ejecuta una vibración entera, es decir, cuando se separa de su posición a'' para ir á a' y volver en seguida á a'' , pasando cada vez por su posición media a (fig. 274). Este movimiento de vaivén es análogo al del péndulo, de suerte que la velocidad de la lámina es alternativamente creciente y decreciente, según que se acerca á la posición a ó se aleja de ella. Durante el movimiento de a'' á a' , las capas de aire del tubo reciben los impulsos de la lámina y experimentan por tanto condensaciones sucesivas y desiguales que se transmitirán de una á otra, sin que por esto haya transporte de moléculas. Estas condensaciones, al principio crecientes, llegarán á un maximum, á partir del cual disminuirán hasta que la lámina ó brazo vibrante del diapason vuelva á la posición a' .

Al volver la lámina metálica de a' á a'' , las mismas secciones gaseosas, vueltas á su densidad normal, se dilatarán al contrario en virtud de su elasticidad, para llenar el vacío dejado delante de la columna de aire por la segunda excursión de la lámina vibrante. Resultará la misma propagación de las dilataciones en las capas gaseosas, cada una de las cuales oscilará á cada lado de su posición de equilibrio, transmitiendo á la capa siguiente los movimientos sucesivos de que á su vez está animada.

A cada vibración completa del brazo del diapason corresponde, pues, una serie de condensaciones, ó sea la *semi-onda condensada*; luego una serie de dilataciones, la *semi-onda dilatada*. Su conjunto forma una onda sonora completa que recorre toda la extensión del tubo y que, como se ve, es resultado de una doble vibración de la lámina elástica.

Para representar gráficamente el estado de la columna de aire en toda la extensión de la onda sonora, conviene figurar los diferentes grados de condensación por medio de perpendiculares situadas por encima de la dirección de la onda, y por medio de otras trazadas debajo de esta dirección las dilataciones que siguen (fig. 275); una y otra li-

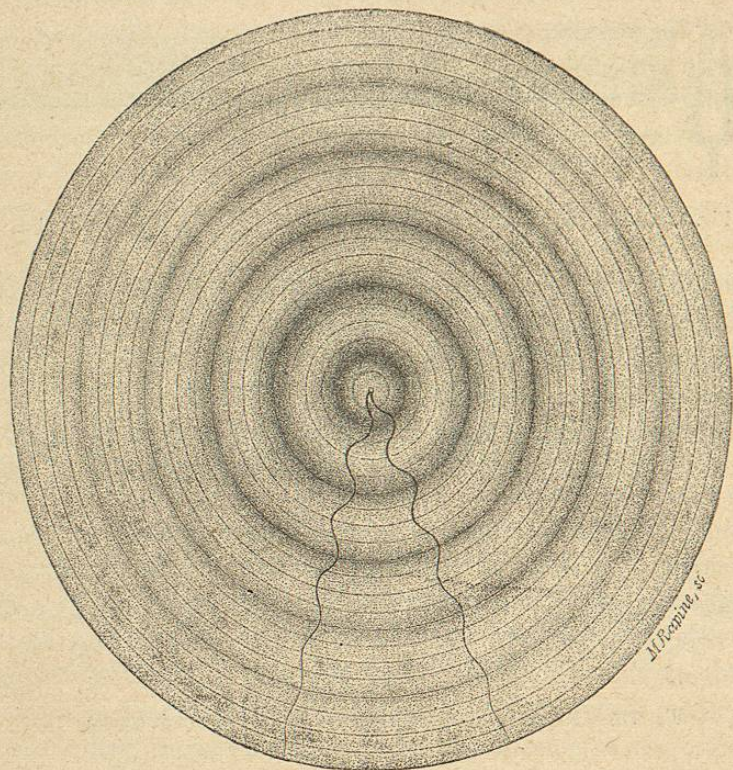


Fig. 276.—Propagación esférica de una onda sonora en un medio indefinido

nea son de longitud nula cuando la densidad es la normal; sus longitudes máximas corresponden á las condensaciones y dilataciones máximas.

La curva AA'' , A' , A_1 representa entonces el estado de las capas sucesivas del tubo en el momento en que la lámina metálica ha ejecutado una vibración; la recta AA_1 es el camino recorrido durante este tiempo, es decir, la longitud de la onda sonora.

El espacio recorrido por esta onda será doble, triple, etc., después de las dos, tres, etcétera, primeras vibraciones.

Ahora ya es fácil de comprender cómo se ha podido calcular la longitud de onda de un sonido de tono determinado. Sea, por ejemplo, uno que ejecute 450 vibraciones por segundo. Siendo en el mismo espacio de tiempo de 340 metros la velocidad de propagación á la temperatura de 15° —si tal es en este momento la temperatura del aire,—claro está que en el momento en que el sonido llegue á dicha distancia de 340 metros ha habido en el aire tantas ondas sucesivas como vibraciones completas desde el centro de emisión, esto es, 450. Así pues, la longitud de cada una de ellas será la 450^a

parte del espacio recorrido, es decir, de 340 metros; la longitud de onda será en este caso de $0^m,755$.

Si pasamos ahora del caso en que el sonido se propaga por una columna prismática á aquel en que la propagación se efectúa en todos sentidos alrededor de un punto, las condensaciones y dilataciones sucesivas de las capas de aire se distribuirán á distancias iguales del centro de emisión. Las ondas serán esféricas, sin que cambien su velocidad de propagación ni su longitud; tan sólo disminuirá la amplitud, y por lo tanto la intensidad del sonido, como lo hemos observado ya. La figura 276 da idea del modo cómo se distribuyen las ondas sonoras en torno del centro de emisión. Vese en ella la serie de las semi-ondas condensadas y dilatadas, mostrando las curvas onduladas que parten del centro que las condensaciones y dilataciones pierden de su amplitud conforme crece la distancia; la degradación de la tinta tiene por objeto indicar el mismo decrecimiento de amplitud.

Para comprender cómo se propagan las ondas sin que haya transporte de moléculas se suele comparar las ondas sonoras con el movimiento de una cuerda á la cual se imprime una brusca sacudida. Las ondulaciones recorren la cuerda de un extremo á otro; si ésta está sujeta por uno de ellos, la onda retrocede. En uno y otro caso se transmite el movimiento sin que haya verdadero cambio en la distancia de las moléculas al punto del que parte el impulso. Del propio modo, si se echa una piedra al agua, la conmoción producida en la masa líquida se transmite con arreglo á una serie de ondas concéntricas que se van extinguiendo con la distancia, pero sin que haya verdadero arrastre de las moléculas líquidas, de lo cual es fácil cerciorarse observando la posición fija que conservan los cuerpecillos que flotan en la superficie. Con todo, en ambos ejemplos, que por lo demás son muy á propósito para dar una idea de la propagación de las ondas sonoras, hay una diferencia esencial que no debe olvidarse. Las condensaciones y dilataciones del aire motivadas por las vibraciones de los cuerpos sonoros se efectúan en el mismo sentido del movimiento de propagación, y paralelamente á la dirección de cada rayo sonoro, al paso que las ondulaciones de la cuerda ó las de la superficie del agua se verifican en sentido perpendicular al movimiento de propagación. Luego veremos que sucede precisamente lo mismo con las ondas que caminan por un medio llamado éter y que tienen por origen las vibraciones de los focos luminosos.

V

SUPERPOSICIÓN DE LAS ONDAS SONORAS

Todo esto nos explica perfectamente la transmisión de un solo sonido que el aire transporta, por decirlo así, á nuestro oído. Pero si el aire es el vehículo de las vibraciones sonoras, ¿en qué consiste que propaga, sin perturbarlas, las de muchos sonidos simultáneos? Asistimos á un concierto, en donde muchos instrumentos emiten á cada instante sonos que difieren de intensidad, tono y timbre. Los centros de emisión están distribuidos de distintos modos en la sala: ¿cómo es que la masa de aire encerrada en la estancia transmite á la vez tantas vibraciones, sin que haya completa cacofonía?

Supongamos también que está amaneciendo, y que cae una lluvia menuda y compacta cuyas gotitas, al llegar al suelo, producen una porción de ruidos leves, pero muy perceptibles; los cantos de las aves, despiertas á la llegada de la primavera, resuenan en los aires y parecen atravesar la ligera niebla que la lluvia extiende por el horizonte.