

Así pues, los experimentos que acabamos de describir demuestran que las llamas pueden desempeñar el mismo papel que las corrientes de aire ó de líquido con las cuales se conmueven los tubos sonoros; sustituyen por sí mismas los agujeros de la flauta y las boquillas de otros instrumentos, sin las cuales no se producirían las vibraciones. Por consiguiente, se las designa con razón con el nombre de *llamas sonoras ó cantantes*, ó también con el de *manométricas*; sólo que aisladas no producirían una vibración bastante intensa para que la percibiera el oído, siendo indispensable el tubo puesto sobre ellas para reforzar el sonido y hacerlo perceptible.

El tono de un sonido emitido por un tubo sonoro depende, como pronto veremos, de la longitud de éste. Lo propio sucede con las llamas sonoras. Si, después de tomar el unísono de la nota musical que se obtiene con un tubo de longitud determinada, por ejemplo de un metro, se hace resonar la misma llama en otro de dos metros, el nuevo sonido es precisamente la octava grave del anterior. Con tubos más cortos resultarían sonidos más agudos. Tyndall, al hacer sus amenos experimentos sobre las llamas sonoras, colocó una serie de ocho tubos cuya respectiva longitud había calculado de modo que al resonar dieran los sonidos de una gama, de la octava grave á la aguda. Con otro tubo movable ó con una corredera de papel que ponía sobre uno de dichos tubos, influía á su albedrío en el tono del sonido, que era más grave cuando la corredera subía, es decir, cuando prolongaba el tubo, y más agudo cuando bajaba.

Pero si se comparan los sonidos de las llamas cantantes con los que dan los tubos de órgano de la misma longitud, nótese que éstos son más graves. La razón es muy sencilla: la presencia de las llamas eleva la temperatura de las columnas de aire puestas en vibración, y ya sabemos que el número de vibraciones crece con la velocidad del sonido y por consiguiente con la temperatura, en una misma longitud de onda.

Por lo demás, la altura del sonido depende también del tamaño de la llama. "Disminuyendo la cantidad de gas, dice Tyndall, hago cesar el sonido que la llama emite ahora. Pero, tras un momento de silencio, la llama produce un nuevo sonido que es precisamente la octava del anterior. El primero era el sonido fundamental del tubo que rodea la llama, el segundo es el primer armónico de este tubo." He aquí, según el mismo físico, otro modo de mostrar la influencia de las dimensiones de las llamas en el tono de los sonidos que producen. Se hace emitir el mismo sonido á dos llamas, y en seguida, cerrando un poco la espita del gas, se reduce un tanto la dimensión de una de aquéllas. Al punto se altera el unísono y se oyen golpecitos á modo de latidos. También se toma un tubo de dos metros de largo, haciéndolo resonar con una gran llama de hidrógeno: si se le sustituye con otro tubo la mitad menos largo, ya no se oye el sonido musical. "La llama es demasiado grande en este caso, dice Tyndall, para que pueda acomodarse á los períodos de vibración del tubo más corto. Pero tan luego como se disminuye la altura de la llama, despide un sonido intenso, la octava del sonido del primer tubo. Quitemos ahora el corto y cubramos de nuevo la llama con un tubo largo; éste despedirá entonces, no ya el sonido fundamental que le es propio, sino el del tubo más corto. Para acomodarse la larga columna de aire á los períodos vibratorios de la llama acortada, se divide como en un tubo de órgano abierto, que emite su primer armónico. Se pueden variar las dimensiones de la llama para obtener con este mismo tubo una serie de notas cuyas velocidades de vibración estén en la relación de los números 1 : 2 : 3 : 4 : 5, es decir, el tono fundamental y sus cuatro primeros armónicos."

V

LLAMAS SENSIBLES

Hemos visto que la forma de una vena líquida que desagua se modifica tan luego como las vibraciones de que es causa son susceptibles de engendrar un sonido, observándose además la misma modificación cuando, en la inmediación de la vena, se produce un sonido de tono casi igual al del sonido que por sí sola emitiría. Aquí hay una sensibilidad que se advierte también en las llamas cantantes.

Schaffgotsch hizo la primera observación de este último fenómeno. Habiendo puesto sobre una llama de gas un tubo de escasa longitud, observó que si se emitía un sonido, ya al unísono, ya á la octava superior de la nota dada por la llama sonora, ésta empezaba á agitarse, á vibrar, y hasta se apagaba, cuando el sonido emitido adquiría cierto grado de intensidad. ¿Cuál era la causa de tan rara agitación?

El siguiente es otro caso descubierto casi simultáneamente por Tyndall. Si al introducir en el tubo una llama silenciosa todavía, se eleva convenientemente el sonido de la voz, la llama se pone á cantar: se interrumpe si se interrumpe la voz, y vuelve á cantar al unísono si ésta empieza de nuevo su canto. Véase, según Tyndall, las condiciones del experimento: "Cubro la llama con un tubo de 30 centímetros de largo, de modo que quede á 3 ó 4 centímetros de distancia del extremo inferior. La emisión de la nota conveniente hace temblar la llama, pero no cantar. Bajo el tubo de modo que la distancia de la llama al extremo inferior sea 7 centímetros, y al punto comienza su canto. Entre estas dos posiciones hay otra en que la llama no rompe el silencio espontáneamente, sino tal, que, cuando ha sido excitada por la voz, canta y continúa así indefinidamente."

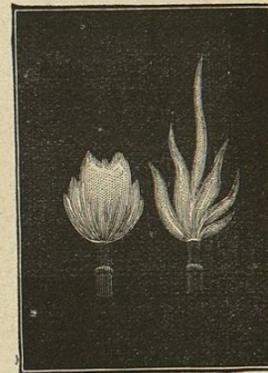


Fig. 295.—Influencia del sonido en las llamas

Esta sensibilidad de las llamas que, además del nombre de *llamas sonoras ó cantantes*, ha hecho que se les dé también el de *sensibles*; esta facultad de experimentar movimientos vibratorios de cierta periodicidad y de resonar al unísono con las voces que se emiten cerca de ellas, permite, por decirlo así, utilizarlas en el análisis de los sonidos compuestos.

Las llamas desnudas, es decir, las que arden al aire libre sin que las cubra ningún tubo, están sometidas á la misma influencia y manifiestan igual sensibilidad: el profesor Leconte hizo la primera observación de este caso nuevo. Tyndall y Barret han hecho experimentos muy variados sobre este curioso asunto. Limitémonos á citar algunos.

Hagamos observar desde luego que no todas las llamas son sensibles. Leconte había notado ya que la llama de los mecheros de gas en que hizo sus observaciones no se ponía á vibrar hasta que la presión creciente la hacía llegar al punto en que está próxima á zumbar. "Tenemos una bujía encendida, dice Tyndall; podemos gritar, palmotear, tocar un silbato, dar martillazos en un yunque, ó hacer que estalle una mezcla explosiva de oxígeno é hidrógeno, sin agitar su llama. Aunque, en cada uno de estos casos cru-

zan el aire ondas sonoras muy enérgicas, la bujía es absolutamente insensible al sonido, no advirtiéndose movimiento alguno en su llama. Pero con este pequeño soplete lanzo contra ella una tenue corriente de aire, que produce un principio de temblor al mismo tiempo que disminuye su resplandor. Y ahora, tan luego como hago resonar el silbato, la llama salta visiblemente.,,

Como la llama en forma de cola de pescado de un mechero de gas ordinario es insensible á todos los sonidos que se emiten cerca de ella, basta dar vuelta á la llave y aumentar la presión para que se agite al punto al resonar un silbato; su forma de abanico se torna entonces en una llama de seis ó siete lenguas separadas (fig. 295).

Las llamas más sensibles deben tener bastante altura, de 25 á 30 y hasta 45 centímetros; mas, por otra parte, según las circunstancias, las vibraciones sonoras tan pronto

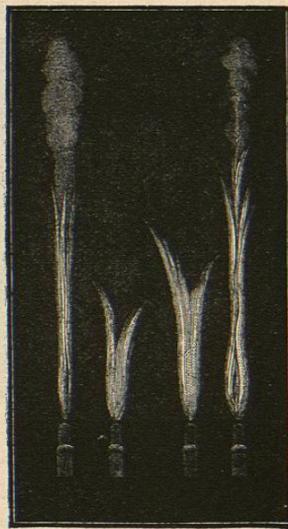


Fig. 296.—Llamas sensibles

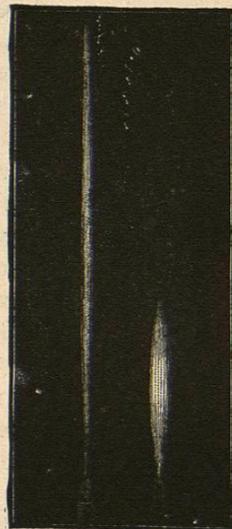


Fig. 297.—Llama sensible: experimento de Tyndall

las alargan como las acortan. Tyndall elige dos llamas, la una larga, derecha y humosa; la otra corta, bifurcada y brillante. El mismo silbido produce una transformación singular: la primera llama se convierte, por decirlo así, en la segunda, y recíprocamente (figura 296).

Terminemos lo referente á este asunto haciendo mención de otros dos experimentos notables que el célebre físico inglés ha reproducido en sus interesantes conferencias sobre el sonido.

“La llama más maravillosa de cuantas se han observado hasta aquí es la que tenéis á la vista. Sale del orificio de un mechero de esteatita y se eleva á 60 centímetros de altura. Un leve golpe dado en un yunque colocado á gran distancia, la reduce á 17 centímetros. Los choques de un manojo de llaves la agitan con violencia y se oyen sus fuertes zumbidos. Hagamos caer en la mano una moneda de 50 céntimos sobre otras gruesas de cobre, estando situados á 20 metros de distancia; este choque tan leve hace decaer la llama. No puedo andar por el pavimento sin agitarla. El crujido de mis botas la pone en conmoción violenta, produciéndose el mismo efecto si se arruga ó rasga un pedazo de papel, ó se roza una tela de seda. Una gota de lluvia que caiga parece so-

bresaltarla. Se ha puesto cerca de ella un reloj de bolsillo: ninguno de vosotros percibe el movimiento del volante; sin embargo, ved el efecto que hace en la llama: cada pulsación la abate; si se acelera el movimiento, conviértese en un espantoso tumulto para la llama. El canto de un gorrión colocado á bastante distancia basta para menguarla; el del grillo produciría sin duda el mismo efecto. Yo he siseado, situado á 30 metros de distancia, y al punto se ha acortado la llama zumbando (fig. 297).,,

Esto por lo que se refiere á la extraordinaria sensibilidad de ciertas llamas que arden al aire libre. Veamos ahora qué elección puede hacerse en ellas de las notas predominantes en los sonidos compuestos, que de este modo desempeñan el papel de las llamas manométricas de Koenig y de los resonadores de Helmholtz, de que nos ocuparemos más adelante.

Considerando una llama larga, recta y brillante, que el más leve ruido reduce al tercio de su longitud y su brillo al de un resplandor pálido apenas perceptible, Tyndall le da el nombre de *llama de vocales*. Y en efecto, no todas las vocales afectan del mismo modo su sensibilidad. La llama en cuestión es sensible, no por lo que respecta al sonido fundamental de cada vocal, sino al armónico predominante que constituye su timbre. “Articulo con voz fuerte y sonora el diptongo *ou* y la llama no se mueve; pronuncio la vocal *o* y tiembla; articulo la *e* y se estremece con fuerza. Pronuncio sucesivamente las palabras *boot* (pronúnciese *but*), *boat* (bot) y *beat* (bit), y la primera no produce efecto, la segunda agita la llama, y la tercera causa en ella una conmoción violenta. El sonido *ah!* es todavía mucho más poderoso. Esta llama es en particular sensible á la articulación de la consonante silbante *s*. Que la persona más lejana de las que me escuchan me haga el obsequio de sisear ó de pronunciar *hiss*, y verá la simpática acogida que le dispensa la llama. El silbido comprende los elementos más aptos para obrar enérgicamente sobre ella. Por último, pongo sobre esta mesa esta caja de música y la hago tocar cualquiera de sus piezas: la llama se porta como un sér sensible, saludando ligeramente á ciertos sonidos y acogiendo los otros con profunda reverencia.,,

VI

INFLUENCIA DEL MOVIMIENTO EN EL TONO DEL SONIDO

Dopler fué el primero que se ocupó, en una Memoria publicada en 1842 *Sobre los colores de las estrellas dobles*, de la influencia que puede ejercer el movimiento en la sensación de un observador cuando el foco de las ondas sonoras ó luminosas se acerca ó se aleja de él en virtud de este mismo movimiento. Examinaba los dos casos en que, ó bien el observador está inmóvil y el foco se desvía aproximándose á él, ó aquél es el que se mueve en dirección de éste, permaneciendo el foco fijo.

Considerando por el momento las ondas sonoras únicamente, deducía que el tono de un sonido se eleva tan luego como disminuye la distancia entre el cuerpo sonoro y el observador, y que por el contrario baja cuando aumenta esta distancia.

Fácil es formarse idea de la variación de la tonalidad de un sonido á la par del movimiento del cuerpo sonoro ó del observador, variación que en cierto modo es tan sólo aparente, puesto que, por hipótesis, el cuerpo sonoro no deja de efectuar el mismo número de vibraciones por segundo.

Citemos un ejemplo á propósito para que se comprenda la explicación del fenómeno notado por Dopler.

Supongamos al observador inmóvil en O (fig. 298), y al foco sonoro en S. Admitamos que la velocidad del sonido sea en tal momento de 340 metros por segundo, y que el foco marcha hacia O con una velocidad diez veces menor, ó sea á razón de 34 metros por segundo. Al cabo de un segundo, la primera onda sonora emanada de S habrá recorrido la distancia SA igual á 340 metros, y el cuerpo sonoro se habrá situado á su vez en S', á 34 metros de su punto de partida. Para fijar las ideas, supongamos también que efectúa 80 vibraciones por segundo. Habrá, pues, enviado ante sí 80 ondas sonoras, y la última partirá de S' al principio del segundo siguiente. Mas para llegar á A no tendrá ya que cruzar sino la distancia S'A, que equivale á los $\frac{9}{10}$ de segundo, de suerte que en este espacio de tiempo el punto A habrá recibido 80 ondas sonoras, puesto que todas las ondas emanadas del foco habrán efectuado sucesivamente su paso hacia él. Sucederá lo propio en los segundos siguientes, y claro está que lo que decimos

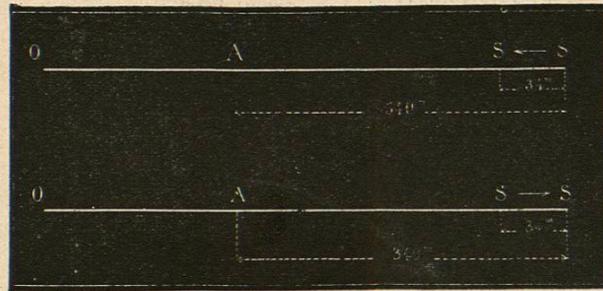


Fig. 298.—Influencia del movimiento en la altura del sonido

del punto A es aplicable á cualquiera otro de la dirección, y por consiguiente al observador mismo, situado en O.

Así pues, la tonalidad del sonido resultará aumentada en razón del número de vibraciones que el foco emite en un tiempo representado por 10 con el que emite en el tiempo 9; en lugar de 80, será en este caso $\frac{80 \times 10}{9} = 88,88$. En términos generales, el aumento en el número de vibraciones se mide por la relación entre la velocidad del foco sonoro por una parte y la diferencia entre esta velocidad y la del sonido por otra.

Fácilmente se comprende que, si el foco sonoro se aleja del observador, el número de vibraciones recibidas por éste disminuirá, y esto (en el ejemplo citado) en la relación de 10 á 11: le parecerá que el sonido ha bajado de altura ó tonalidad, como si el foco no efectuase más que 72,72 vibraciones en lugar de 80.

Si suponemos ahora que, estando el foco sonoro inmóvil, es el observador el que se acerca en su dirección, deben resultar fenómenos semejantes, conforme lo comprendemos apelando al mismo raciocinio. Hay, sin embargo, una diferencia y es que el aumento en la tonalidad se medirá en este caso por la relación que indicaba más arriba la disminución de la altura ó tono, y recíprocamente. En vez de 80 vibraciones, llegarán á oídos del observador 87,27 en el primer caso y sólo 71,11 en el segundo.

Creemos suficiente cuanto precede para mostrar cómo puede tener influencia el movimiento, ya proceda del foco sonoro ó bien del observador, en la altura del sonido, en su tonalidad. Réstanos indicar algo acerca de los experimentos hechos para comprobar estas previsiones de la teoría.

Ya en 1845 hizo M. Buys Ballot en Holanda y en el ferrocarril de Utrecht á Maarsen una serie de experimentos: el silbato de una locomotora producía el sonido, y varios músicos de oído experto, situados en la vía, delante y detrás de la locomotora, apreciaban las variaciones del tono á medida que la máquina se acercaba ó se alejaba con velocidad determinada. M. Vogel hizo en 1876 experimentos análogos.

M. Fizeau y M. Mach instalaron, en 1848 y en 1860 respectivamente, ciertos aparatos que tenían por objeto la comprobación de los fenómenos descritos por Doppler.

M. Koenig ha discurrido otro método de comprobación, que consiste en hacer vibrar simultáneamente dos diapasones afinados de modo que dieran cierto número de pulsaciones por segundo. Al principio se los coloca uno junto á otro, y luego se aproxima el más grave al oído casi á la distancia de una longitud de onda, notándose que hay una pulsación menos por segundo: si se hubiera acercado el diapason más agudo habría una pulsación más. M. Schüngel ha hecho numerosos experimentos por este método. Con todos ellos se ha conseguido poner en evidencia los fenómenos que Doppler estudió por vez primera en su Memoria; pero siempre quedaban incertidumbres sobre la conformidad de las fórmulas de este físico con los resultados obtenidos por los otros físicos citados. Quesneville emprendió últimamente el estudio completo de esta interesante cuestión, efectuando sus experimentos, basados en el método de las pulsaciones, con un aparato de su invención que, gracias á la inscripción gráfica de los resultados, los daba rigurosamente exactos. No podemos entrar en la descripción detallada de sus observaciones, por lo cual remitimos á su Memoria al lector deseoso de profundizar el estudio de este asunto.

CAPÍTULO VII

LEYES DE LAS VIBRACIONES SONORAS EN LAS CUERDAS, TUBOS Y PLACAS

I

VIBRACIONES DE LOS CUERPOS ELÁSTICOS

La música es hoy un arte tan definido, que cualquiera conoce el mecanismo de los instrumentos de cuerda, como, por ejemplo, el violín.

Entre dos puntos fijos se ponen tirantes por medio de clavijas cuatro cuerdas de grueso desigual y de diferente naturaleza, las cuales emiten sonidos de varios tonos cuando se las pulsa ó se las frota transversalmente con un arco. Los sonidos despedidos por las cuerdas *en vacío* (es decir, vibrando en toda su longitud) deben tener entre sí ciertas relaciones de altura, de las que en breve trataremos. Cuando desaparece esta relación, el instrumento no está á tono. ¿Qué hace entonces el músico? Templá más ó menos, apretando ó aflojando las clavijas, las cuerdas que no dan los sonidos deseados; si las templá más, el sonido será más agudo; si menos, será más grave. Como con cuatro sonidos no habría bastante para emitir las muchas notas de que consta un trozo de música, el ejecutante los multiplica á su albedrío, poniendo los dedos de la mano izquierda sobre este ó el otro punto de cada una de las cuerdas, con lo cual reduce á distintas longitudes las partes de las mismas que el arco hace vibrar.

Estos hechos demuestran que median ciertas relaciones entre los tonos de los varios