sonidos forman una sucesión melódica ó un acorde agradable, cuando los números de sus vibraciones están en la relación más sencilla posible. Representando la tónica ó primer grado de la escala por 1, se obtendrán los intervalos más agradables combinando 1 con los números simples 1, 2, 3, 4 y 5... (es decir, con la sucesión de los armónicos del sonido fundamental): $^1/_1$ ó el unísono, $^2/_1$ ó la octava, $^3/_1$ la dozava, que, transportada á la octava inferior, da la quinta, etc. Así resultaría constituída naturalmente la gama. Mas, aparte de que el principio formulado nos parece cuando menos arbitrario, se deducen consecuencias que distan mucho de concordar entre sí y menos aún con la práctica musical (1). Pero este no es el lugar de entrar en esta discusión. Limitémonos á comparar los dos sistemas de gamas.

El principio de la de los pitagóricos es el siguiente: siendo 2 y $^3/_2$, como en la primera, los números que representan la octava y la quinta, todos los intervalos se forman de éstos procediendo por quintas sucesivas. Así la quinta de *sol* será $^3/_2 \times {}^3/_2$ ó $^9/_4$: es el re_2. Luego el re_1 está representado por $^9/_8$. Del *re* se pasa al *la* que es su quinta; después al *mi* que es la quinta del *la*, y así sucesivamente. La gama que resulta de este modo de formación difiere numéricamente de la de los físicos, como se juzgará por el cuadro siguiente:

Grados de la gama ó intervalos	Gama de los físicos	Gama de los pitagóricos
do_1 ó unísono.	1	1
re ó segunda mayor.	$^9/_8$	$^9/_8$
mi ó tercera mayor.	$^5/_4$	$^{81}/_{64}$
fa ó cuarta.	$^4/_3$	$^4/_3$
sol ó quinta.	$^3/_2$	$^3/_2$
la ó sexta.	$^5/_3$	$^{27}/_{16}$
si ó séptima.	$^{15}/_8$	$^{243}/_{128}$
do_2 ú octava.	2	2

Como se ve, de ocho intervalos, cinco son idénticos en las dos gamas; los intervalos diferentes están representados por números menos simples en la gama pitagórica, que, por otra parte, tiene la ventaja de proceder por series de segundas mayores y de segundas menores que son respectivamente iguales entre sí. Mientras que la serie de los sonidos está representada en la gama de los físicos por los números

$$^9/_8 \quad ^{10}/_9 \quad ^{16}/_{15} \quad ^9/_8 \quad ^{10}/_9 \quad ^9/_8 \quad ^{16}/_{15}$$

en la gama pitagórica es mucho más regular:

$$^9/_8 \quad ^9/_8 \quad ^{256}/_{243} \quad ^9/_8 \quad ^9/_8 \quad ^9/_8 \quad ^{256}/_{243}$$

En todo caso, las diferencias son de poca monta; la relación del *tono mayor* $^9/_8$ con el *tono menor* $^{10}/_9$ es igual á $^{81}/_{80}$. Es decir, que el exceso de tono del primer intervalo

(1) El principio estético que considera la belleza ó el adorno, en arquitectura, en las demás artes y en música, como elementos enlazados con la sencillez de las relaciones numéricas, es el generalmente adoptado por los matemáticos y los físicos; pero jamás ha sido formalmente discutido, que sepamos, y por nuestra parte tendríamos muchas objeciones que hacerle. Para no citar más que un ejemplo, ¿quién no ve que sería preciso considerar la octava como la consonancia más agradable (nada decimos del unísono, que no es un acorde hablando con propiedad)? Luego seguirían la quinta, la cuarta, la tercera mayor, etc.—Pues bien, ¿cuál es el músico á cuyos oídos no produzca la tercera mayor y aun la menor un efecto más armonioso que la cuarta?

sobre el segundo está marcado por el exceso de una sola vibración sobre 80, dándose á este intervalo el nombre de *coma*. La misma diferencia existe entre los intervalos de la segunda menor $^{16}/_{15}$ en la gama de los físicos y de la segunda menor $^{256}/_{243}$ en la de los pitagóricos. Teóricamente, cada una de las escalas musicales así constituídas puede justificarse por ciertos conceptos y atacarse por otros. A nosotros no nos incumbe decidir la cuestión (1).

IV

ESTUDIO ÓPTICO DE LOS SONIDOS Y DE LOS INTERVALOS MUSICALES

Hemos descrito varios métodos gracias á los cuales se puede contar el número de las vibraciones ejecutadas por un cuerpo sonoro en el momento de emitir un sonido

Fig. 312.—Diapasón con su caja de resonancia

determinado: la sirena, la rueda dentada, el vibroscopio ó fonautógrafo son los aparatos usados con tal objeto. En el último de estos instrumentos, las vibraciones mismas se inscriben en una superficie en la que se puede examinar fácilmente su amplitud y su número, constituyendo el método gráfico del estudio de los sonidos.

(1) Cornu y Mercadier, que han hecho con cuidado una larga serie de experimentos comparativos sobre estas dos escalas, han llegado á deducir que cada una de ellas tiene su razón de ser en la música moderna; la una, la pitagórica, la exigen los intervalos melódicos, al paso que en los armónicos es menester emplear la de los físicos. Pero ¿cómo conciliar esta doble exigencia, puesto que en la gran mayoría de las composiciones musicales modernas se hace tanto uso de la melodía como de la armonía?

No hace aún muchos años que al físico francés Lissajous se le ocurrió la idea de estudiar *de visu* los movimientos vibratorios de los cuerpos sonoros, sustituyendo el órgano del oído con el de la vista para apreciar las relaciones de los sonidos; de aquí

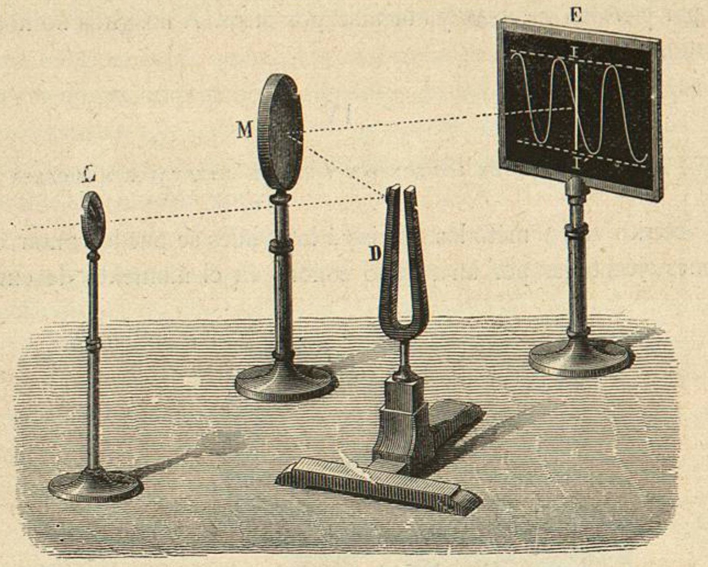

Fig. 313.—Método óptico de M. Lissajous: proyección de las vibraciones sonoras

procede el nombre de *método óptico* dado al procedimiento de que dicho físico se valió y que vamos á describir someramente. Con el método óptico, hasta un sordo puede hacer indagaciones sobre el tono comparado de los sonidos.

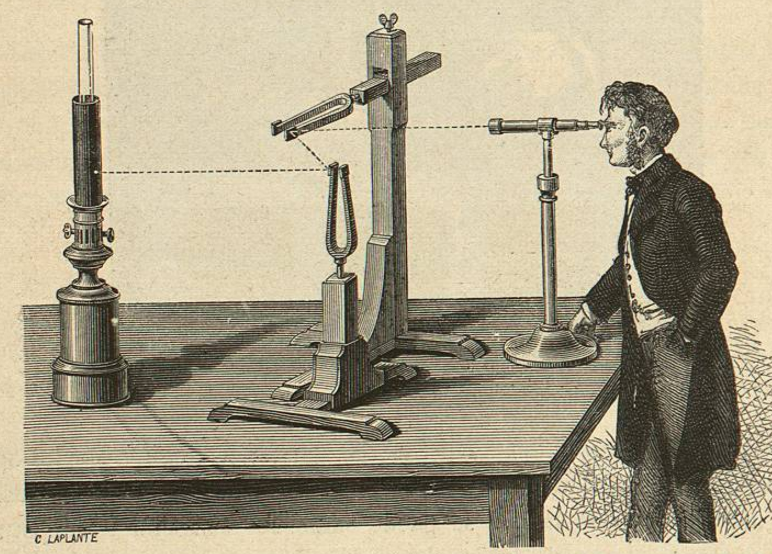

Fig. 314.—Estudio óptico de los movimientos vibratorios por el método de M. Lissajous

"Ninguno de nosotros, decía M. Lissajous en una lección en la que exponía este nuevo método, habrá dejado cuando niño de meter una varita en el fuego para removerlo con ella y observar con la curiosidad natural en la edad juvenil esas líneas brillantes producidas por la punta abrasada como por un pincel mágico cuya huella fugaz

se disipara en un momento. Tal es el experimento que ha servido de base para el método óptico.„

Nadie ignora que el diapasón es un aparatito que consiste en una varilla de acero encorvada á modo de herradura y sostenida en una columna cilíndrica que le sirve de pie (fig. 312). Con un cilindro de metal ó de madera más grueso que el espacio que media entre los extremos de sus dos brazos, se separan bruscamente éstos, y sus oscilaciones producen un sonido cuyo tono depende de la forma y dimensiones del instru-

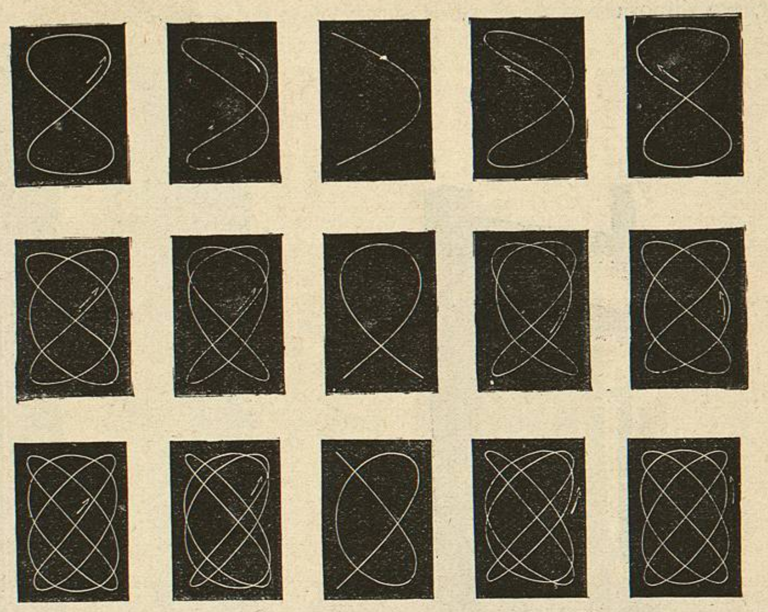

Fig. 315.—Curvas ópticas: la octava, la quinta y la cuarta

mento; los físicos lo hacen vibrar también frotando uno de los brazos con un arco. El diapasón sirve para regular el tono de los instrumentos ó el de las voces en las orquestas y teatros; en Francia, en España y en otros países, el diapasón normal es el que produce el segundo *la* del violín, que da 870 vibraciones simples por segundo.

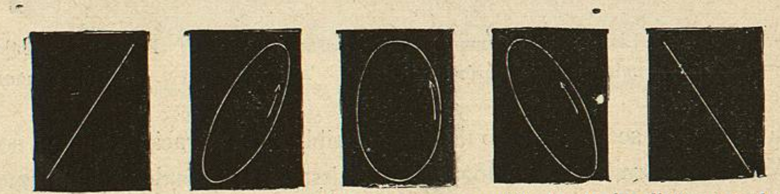

Fig. 316.—Curvas ópticas que representan las vibraciones combinadas de dos diapasones al unísono

Para hacer visibles las vibraciones de un diapasón, M. Lissajous fija en la superficie convexa y en el extremo de uno de los brazos un espejito metálico, y en el otro brazo un contrapeso para regularizar el movimiento vibratorio. "Miremos en ese espejo, dice, la imagen reflejada de una bujía colocada á algunos metros de distancia, y hagamos vibrar el diapasón: al punto veremos que la imagen se alarga en el sentido de la longitud de los brazos. En tal momento hagamos que el diapasón gire sobre su eje: la apariencia cambiará, y veremos en el espejo una línea brillante y sinuosa cuyas ondulaciones marcan por su forma misma la mayor ó menor amplitud del movimiento vibratorio.„

Sirviéndose de un segundo espejo M que proyecta la imagen en una pantalla E, se hace visible el fenómeno en toda la extensión de una cátedra (fig. 313). Cuando el diapasón vibra sin girar, la línea luminosa II' es vertical; pero no bien se le somete á los movimientos de rotación, esta línea se transforma en una curva, cada una de cuyas sinuosidades corresponde á una vibración. En este caso, se recurre á un foco de luz más viva, como la del sol ó la eléctrica, y se la hace llegar al espejo del diapasón por medio de una lente convergente L, haciendo además que el segundo espejo M dé vueltas alrededor de un eje vertical para obtener la transformación de la imagen rectilínea en una curva sinuosa.

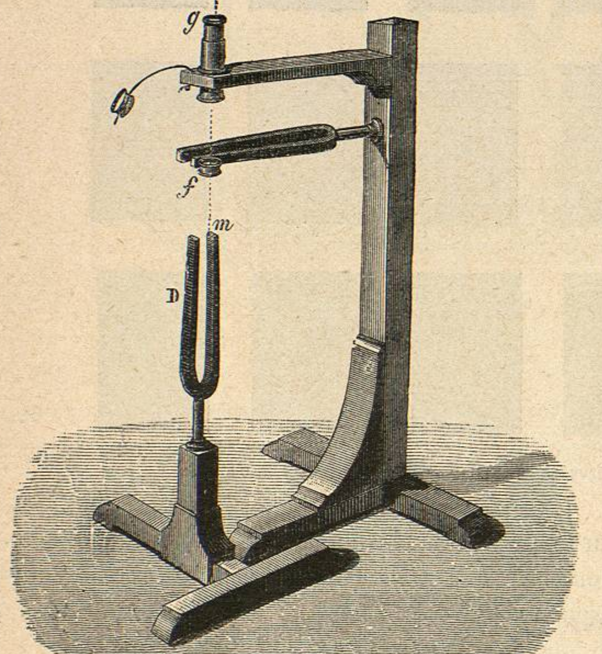

Fig. 317.—Aparato de M. Lissajous para completar los diapasones acordados al unísono del diapasón normal

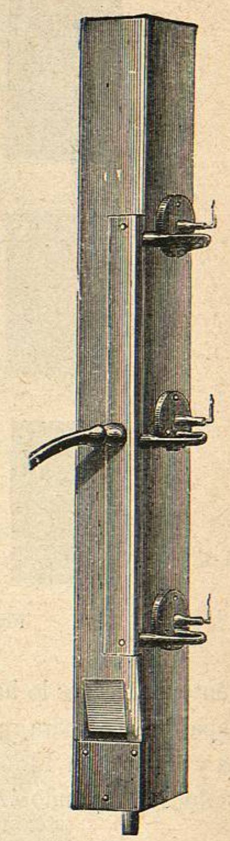

Fig. 318. — Tubo abierto de llamas manométricas

Hasta aquí sólo se ha tratado de hacer visibles las vibraciones de un solo cuerpo sonoro. Veamos ahora cómo ha logrado M. Lissajous, valiéndose del mismo método, apreciar el tono comparativo de dos sonidos, medir la relación de los números de vibraciones que á cada uno de ellos corresponden. Para ello se toman dos diapasones, ambos provistos de espejos (fig. 314); mas, al paso que el eje de uno de ellos es vertical, el otro está situado horizontalmente y de modo que los dos espejos estén frente á frente. A poca distancia del diapasón vertical se pone un quinqué rodeado de un tubo ó chimenea opaca con un agujerito por el que sale un rayo de luz que, dando en el primer espejo, va á reflejarse de él en el otro, que lo refleja á su vez en el eje de una lente, pudiendo el observador de esta manera seguir los movimientos de la imagen que se reduce á un punto, mientras los dos diapasones estén en reposo.

Pero tan luego como se hace vibrar el diapasón vertical, el movimiento de vaivén de la imagen da, en lugar de un punto, una línea luminosa, prolongada en sentido vertical. Si, mientras el diapasón vertical está en reposo, se agita el horizontal, la imagen se alarga en el mismo sentido. Por último, si se hace vibrar á la vez los dos diapasones, la imagen resultará animada de dos movimientos simultáneos, uno en sentido horizontal y otro en sentido vertical, y describirá una curva luminosa, cuya forma dependerá de la relación que existe entre las duraciones de los dos sistemas de vibraciones, de la amplitud de las oscilaciones y por fin del espacio de tiempo que media entre el respectivo principio de dos vibraciones consecutivas ejecutadas por uno y otro diapasón, constituyendo esta última duración ó intervalo lo que se llama *diferencia de fase.*

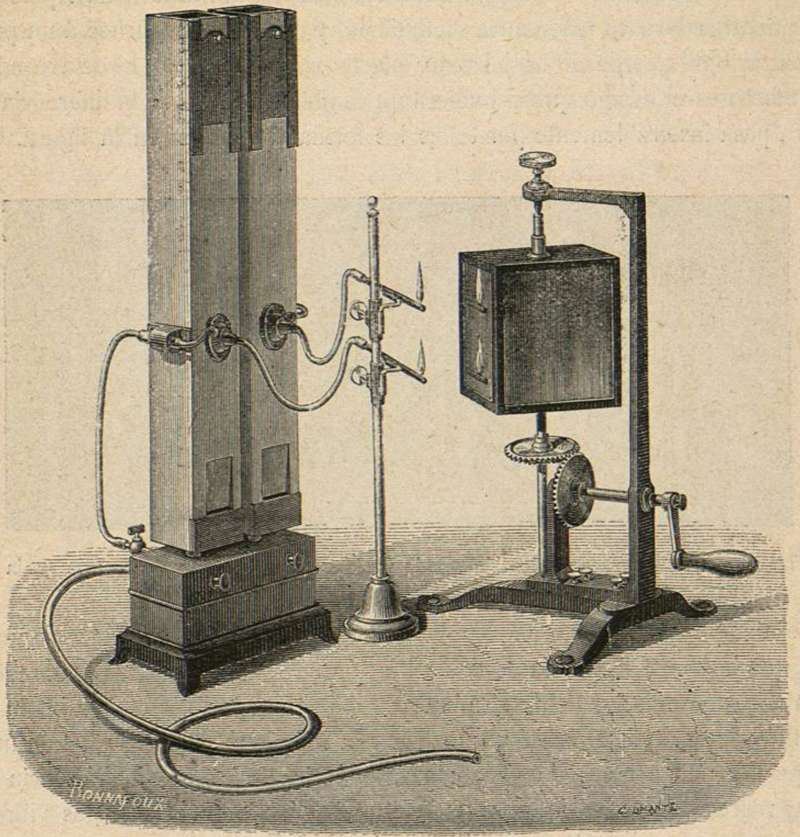

Fig. 319.—Aparato de M. Kœnig para la comparación de los movimientos vibratorios de dos tubos sonoros

M. Lissajous ha logrado representar de este modo las curvas luminosas dadas por diapasones acordados de modo que producen los intervalos de la escala, tal cual la adoptan los físicos. Si los dos diapasones suenan al *unísono*, sus números de vibraciones son entre sí como 1 es á 1: es decir, que las vibraciones efectuadas en tiempos iguales son también iguales en número. Si la diferencia de fase es nula, las vibraciones empiezan al mismo tiempo en los dos diapasones, resultando una línea recta luminosa oblicua, la diagonal de un rectángulo cuyos lados son de una longitud que varía con la amplitud de las vibraciones simultáneas. Esta línea recta se convierte en una elipse ú óvalo, cuando la diferencia de fase no es nula. La figura 316 presenta las curvas que dan las diferencias de fases iguales á $^1/_8$, $^1/_4$, $^3/_8$ y $^1/_2$.

Dos diapasones que resuenan á la *octava* uno de otro dan una serie de curvas representadas en la figura 315, y que demuestran que uno de ellos ejecuta una vibración en sentido horizontal, mientras el otro verifica dos en el vertical. Si los números de vibraciones están en las relaciones 3 : 2, 4 : 3, 5 : 4, 5 : 3, 9 : 8 y 15 : 8, los diapasones están afinados á los intervalos de quinta, cuarta, sexta, segunda mayor y séptima. En la figura 315 se puede ver las curvas ópticas obtenidas en los casos de octava, cuarta y quinta, con las variaciones de forma que proceden de las diferencias de fases. Examinando estas curvas, se puede contar el número de excursiones hechas por el punto luminoso en sentido vertical, y como unas y otras se efectúan al mismo tiempo, se tiene por esto mismo la relación numérica de los dos sonidos.

Cuando los diapasones están rigurosamente acordes, la misma curva persiste en la pantalla mientras dura su resonancia simultánea, y acaba por reducirse á un punto. Si, por el contrario, el acorde no es del todo exacto; si, por ejemplo, la octava no es perfecta, el efecto es el mismo que si hubiera un cambio continuo en la diferencia de fase, y la curva pasa insensiblemente por todas las formas indicadas en la figura. Una vez

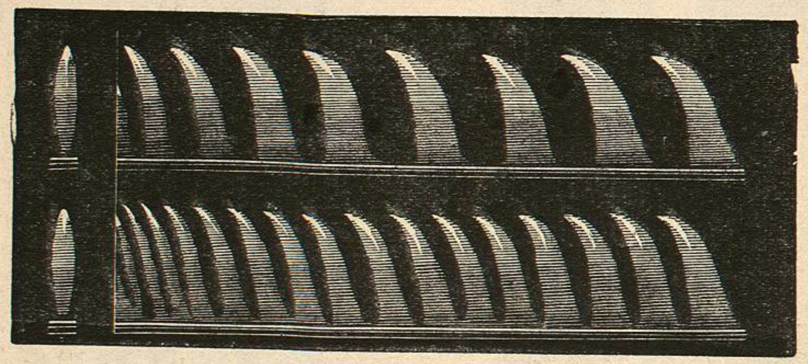

Fig. 320.—Llamas manométricas del sonido fundamental de un tubo y su octava aguda

anotado el tiempo que invierte en completar el círculo entero de estas transformaciones, dedúcese que hay una diferencia de una vibración en el diapasón grave y de dos vibraciones en el agudo, relativamente al número que hubiera dado la octava justa.

Este método es de tal precisión, que hasta la más leve diferencia queda marcada. Supongamos dos diapasones al unísono: la curva óptica será, según la diferencia de fase, una de las representadas en la figura 316, y persistirá mientras duren las vibraciones. Si se calienta ligeramente la rama de uno de los diapasones, resultará disminuído el sonido, alterado el unísono, y al punto se verá en la pantalla la variación de forma de la curva óptica que marca la cesación del acorde.

Con el método óptico no tan sólo se puede determinar las relaciones entre los números de vibraciones, sino también contar el número absoluto de las que corresponden á un sonido dado. Habiéndose construído así un diapasón que da el *la* normal adoptado por las orquestas, ha sido fácil servirse en seguida de este tipo para construir diapasones que suenan al unísono. La figura 317 representa la disposición del aparato empleado para esta comprobación: el diapasón normal está provisto de una lente objetivo *f*; un ocular *g* puesto encima forma con ella un microscopio, merced al cual se puede observar la imagen de una raya *m* trazada en el brazo del diapasón D que se ha de comprobar. Poniendo simultáneamente los dos diapasones en vibración, se verá en seguida si están ó no al unísono, conforme acabamos de decirlo anteriormente.

M. Lissajous ha aplicado su método al estudio de las cuerdas vibrantes, y aun al de los sonidos propagados por el aire. Para ello ilumina la cuerda en uno de sus puntos,

dirigiendo sobre ella un haz luminoso delgado, y recibe los movimientos del aire en una membrana en cuya superficie fija una perlita brillante (1).

Olvidábasenos decir que, si en todos estos experimentos las curvas trazadas por los puntos luminosos son visibles á la vez en todos sus puntos, consiste en que ha terminado una evolución entera antes de cesar la persistencia de la impresión luminosa en la retina: como la duración de esta persistencia viene á ser de un décimo de segundo, esto supone que tal es el tiempo máximo invertido por la imagen del punto en recorrer la sinuosidad entera de la curva.

Tal es en resumen el método original empleado por M. Lissajous para hacer visibles los movimientos vibratorios de los cuerpos sonoros y las particularidades más delicadas de estos movimientos. Vese por esta reseña que teníamos razón en decir que una persona privada de la facultad de oir podía comparar los sonidos con mayor precisión de lo que podría hacerlo el oído más sensible con una sola audición.

En estos últimos tiempos, M. Kœnig, sabio acústico de París, ha discurrido otro pro-

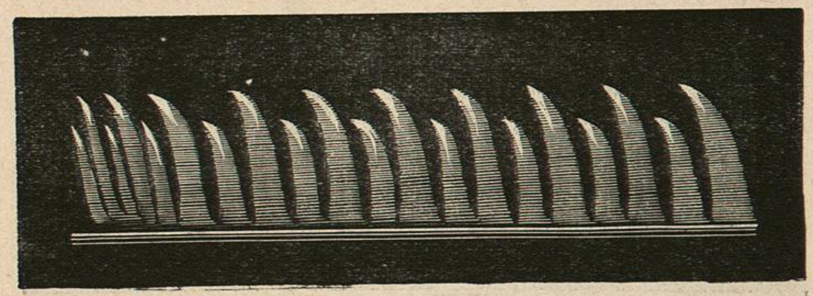

Fig. 321.—Llamas manométricas dadas simultáneamente por dos tubos en la octava

cedimiento no menos ingenioso para estudiar las vibraciones de las columnas gaseosas en los tubos. Veamos en qué consiste.

Una de las paredes del tubo sonoro (fig. 318) lleva cierto número de orificios, tres por ejemplo, que corresponden al nodo del sonido fundamental y á los dos nodos de su octava; cada uno de ellos está cerrado por una cápsula de la cual sale un mechero que comunica con un tubo por el que llega á la cápsula y al mechero gas del alumbrado. La parte de la cápsula que está en el interior del tubo sonoro, en el seno de la columna gaseosa vibrante, es de caucho y está ligeramente hinchada por el carburo de hidrógeno; por consiguiente, es eminentemente elástica y cede al menor aumento de presión. Supongamos encendido el mechero: si la presión interior del aire del tubo aumenta, la membrana de caucho se comprime, de suerte que la capacidad de la cápsula disminuye y la llama se alarga; por el contrario, se acorta si, llegando á disminuir la presión, aumenta la capacidad interior de la cápsula. Como se ve, el mechero de gas es un verdadero manómetro indicador de los cambios de presión, por lo cual M. Kœnig ha dado á las llamas que se desprenden de las cápsulas el nombre de *manométricas*.

Supongamos ahora que el tubo sonoro está adaptado á un fuelle acústico y que se pone en vibración el aire que contiene. Sabemos que la columna gaseosa entra entonces en vibración, y que la propagación de las ondas sonoras la condensan y dilatan alternativamente. Si el sonido emitido por el tubo es el fundamental, se forma un nodo

(1) M. Wheatstone empleaba hacía mucho tiempo este modo de hacer visibles los movimientos vibratorios.