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 $^9/_{10}$ 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

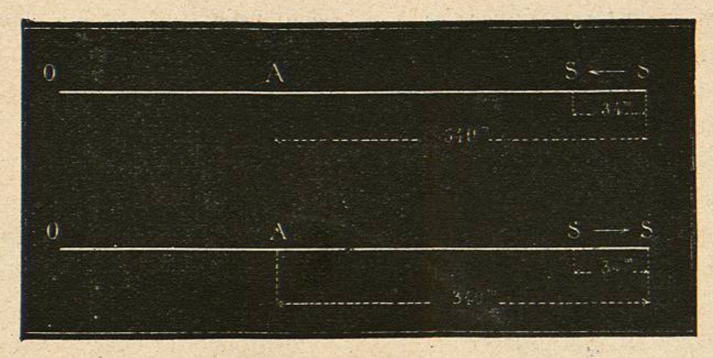

Fig. 298.—Influencia del movimiento en la altura del sonido

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 comprenderemos 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 diminución de la altura ó tono, y recíprocamente. En vez de 80 vibraciones, llegarían 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 Dopler.

M. Kœnig 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 diapasón 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 Dopler 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? Templa más ó menos, apretando ó aflojando las clavijas, las cuerdas que no dan los sonidos deseados; si las templa 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 sonidos emitidos por un instrumento, y las longitudes, grosores, tensiones y materias de las cuerdas; y como esos tonos dependen á su vez del número de las vibraciones ejecutadas, resulta forzosamente que este número está unido por ciertas leyes á los elementos enumerados más arriba. Los filósofos antiguos, y en especial los pitagóricos, habían adivinado alguna de dichas leyes; pero los geómetras del siglo pasado, entre ellos Taylor, Bernouilli, d'Alembert, Eulero y Lagrange, fueron los que dieron su explicación completa, deducida de la teoría. La experiencia ha confirmado la exactitud de sus cálculos.

Estas leyes son las que ahora vamos á definir. Hoy es fácil comprobarlas con un instrumento particular llamado *sonómetro*, al cual va unido alguno de los aparatos que sirven para contar las vibraciones de los sonidos. El sonómetro ó monocordio (fig. 299) consiste en una caja que tiene por objeto reforzar los sonidos; sobre ella hay una ó varias cuerdas sujetas en sus extremos por pinzas de hierro y tirantes por medio de pesas que sirven para medir las sensaciones de cada una de ellas. Por debajo de las

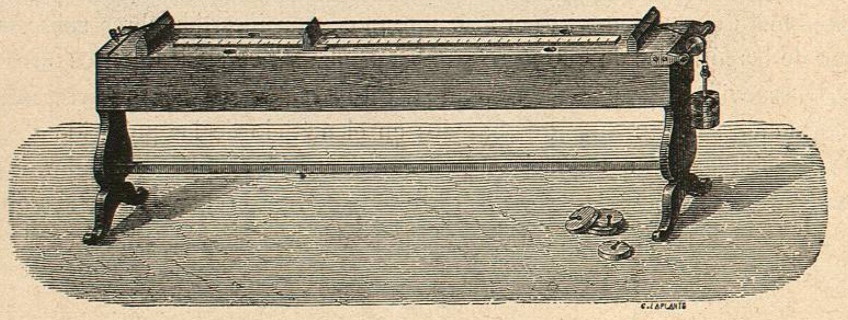

Fig. 299.—Sonómetro

cuerdas hay una regla graduada, la cual sirve para valuar las longitudes de las partes vibrantes, longitudes que se pueden cambiar con un caballete movible que corre á lo largo de la regla y debajo de las cuerdas.

Consideremos una cuerda cualquiera, de intestinos ó metálica: estirémosla con una pesa lo suficiente para que, pulsada ó frotada con un arco, dé un sonido perfectamente puro y cuyo tono sea apreciable al oído. Supongamos que su longitud total medida con la regla es de $1^{m},20$ y que el sonido que emite corresponde á 440 vibraciones por segundo, comprobadas con la sirena. Pongamos el caballete movible sucesivamente á la mitad, al tercio, al cuarto, al duodécimo, etc., de la longitud total, y en cada una de estas posiciones hagamos vibrar la porción más corta de la cuerda. Valuando los diferentes sonidos resultantes, tendremos los siguientes números de vibraciones por segundo: 880, 1,320, 1,760 y 5,280.

Bastará ahora comparar los números que marcan las varias longitudes de la cuerda con los que indican el número de vibraciones, para que resulte la ley:

Número de vibraciones.		120	60	40	30	10
	ó	1	1/2	1/3	1/4	1/12
Longitud de la cuerda. .		440	880	1,320	1,760	5,280
	ó	1	2	3	4	12

En virtud de este experimento, ¿no es evidente que los números de las vibraciones van creciendo de modo que están precisamente en razón inversa de la que forman entre sí las longitudes de las cuerdas?

Tal es la primera ley de las vibraciones de las cuerdas.

Ahora, si estiramos la cuerda con pesas diferentes, sin variar la longitud, y comparamos los sonidos obtenidos, veremos que para un número de vibraciones doble, triple, cuádruple, etc., las tensiones de las cuerdas deben ser 4, 9, 16..... veces más considerables. Como el número de vibraciones sigue el orden de los números simples, los pesos ó tensiones siguen el de sus cuadrados.

Las cuerdas son de forma cilíndrica: variemos el diámetro de los cilindros, y comparemos los sonidos producidos por dos cuerdas de la misma naturaleza, tensas con pesos iguales y de longitud idéntica, pero de distintos diámetros. Fácil será hacer esta comparación con el sonómetro, y entonces veremos que el número de las vibraciones

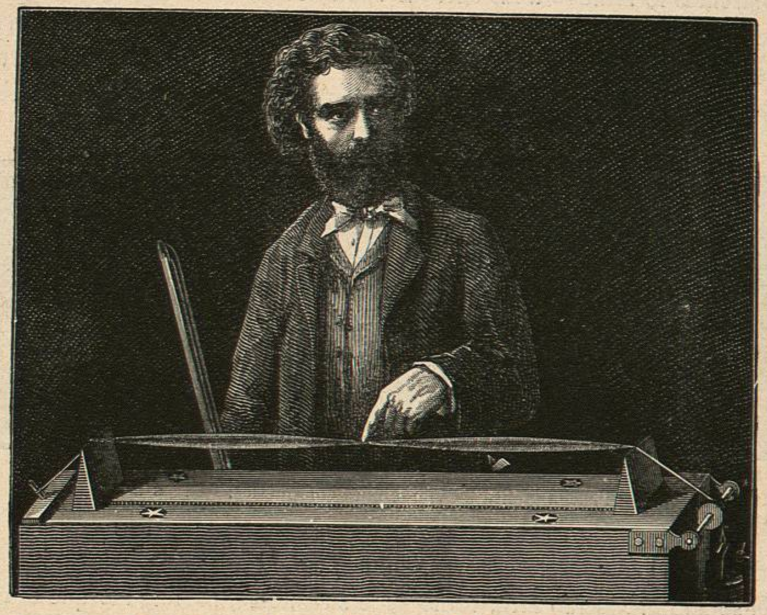

Fig 300.—Sonidos armónicos: producción de la octava

de estos sonidos disminuye cuando los diámetros de las cuerdas aumentan, siendo precisamente 2, 3, 4..... veces menor.

Esta es la tercera ley de las vibraciones transversales de las cuerdas.

Hay otra que, así como las anteriores, se puede comprobar con el sonómetro, y que se refiere á la densidad de la substancia de que está formada la cuerda vibrante. Por medio de pesas iguales se tensan sobre el aparato dos cuerdas, una de hierro y otra de platino, de diámetro y longitud iguales. Los sonidos que despidan serán tanto más graves cuanto mayor sea la densidad, de suerte que la cuerda de hierro emitirá el sonido más agudo y la de platino el menos alto; el oído bastará para apreciar estas diferencias.

Pues bien, valuando los números exactos de vibraciones que corresponden á los dos sonidos obtenidos, tendremos:

Para el hierro.	1,640
Para el platino.	1,000

Entiéndase que aquí no tratamos de los números en sí mismos, sino de sus relaciones. Ahora bien, si se multiplica cada uno de estos números por sí mismo, si se le eleva al cuadrado, tendremos 2.689,000 y 1.000,000 que expresan precisamente, en orden inverso, las densidades de dichos metales. La densidad del hierro es 7,8, la del platino 21,4, y estas densidades son entre sí como 1,00 es á 2,69. Tal es la ley: en igualdad de condiciones, los cuadrados de los números de vibraciones están en razón inversa de las densidades de las materias de que están formadas las cuerdas vibrantes.

En todo cuanto precede sólo nos hemos referido á las vibraciones transversales de las cuerdas, es decir, á los sonidos que resultan pulsándolas ó frotándolas con un arco de violín. Una cuerda frotada en el sentido de su longitud, por ejemplo con un pedazo de paño untado de colofonia, despedirá también un sonido, pero éste será mucho más agudo, de suerte que el número de vibraciones longitudinales es mucho mayor que el de las transversales.

Terminaremos lo relativo á las cuerdas vibrantes haciendo mención de un fenómeno de gran interés; nos referimos á la formación de los *nodos* y *vientres sonoros*, y de los sonidos particulares que los músicos y físicos llaman *armónicos*. Consideremos una cuerda tirante sobre el sonómetro ó sobre cualquier instrumento de música. Fijemos su

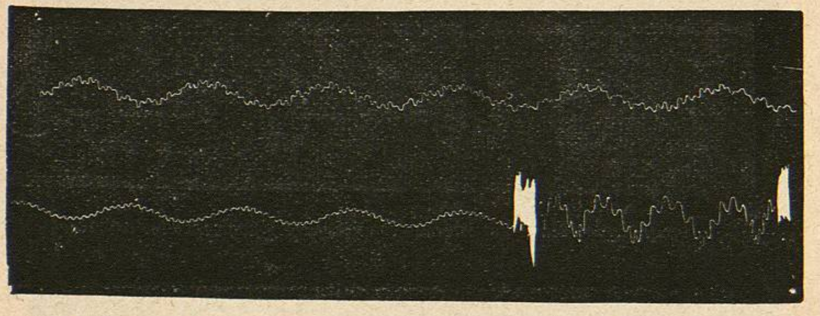

Fig. 301.—Prueba gráfica de vibraciones compuestas: sonidos armónicos

punto medio tocándola con el dedo y probemos con el arco una de las mitades que así resultan: el sonido producido será, como debe suponerse, más agudo que el fundamental, por haberse duplicado el número de vibraciones. Musicalmente hablando, es la *octava* del sonido fundamental. Pero lo más particular es que las dos mitades de la cuerda vibran al mismo tiempo, lo cual se puede comprobar de dos modos: haciendo cabalgar sobre la parte media de la mitad libre pedacitos de papel doblados que saltan y caen cuando se produce el sonido, ú observando á la simple vista el rehenchimiento de las dos mitades de la cuerda (fig. 300). Retirando el dedo sin dejar de frotar el arco, se observa también que el sonido persiste, así como la división de la cuerda en dos partes que vibran simultáneamente.

Hagamos ahora otro experimento, y pongamos el dedo en la tercera parte de la cuerda, frotando con el arco la parte más corta. El sonido producido será más agudo todavía, y veremos que la totalidad de la cuerda se subdivide en tres partes iguales, que vibran aisladamente, lo cual se comprueba poniendo papelitos doblados en los puntos de división, así como en medio de cada tercio de la cuerda. Los primeros no se mueven; los otros caen, lo cual indica que hay puntos inmóviles ó *nodos* y puntos vibrantes, cuya parte media es lo que se llama un *vientre*. Los nodos y los vientres sonoros se distinguen muy bien sobre un fondo obscuro. Los primeros presentan la cuerda blanca reducida á su propio espesor; los otros, dilataciones ó rehenchimientos parecidos á los que hemos indicado en medio de una cuerda que vibra en su totalidad.

De esta suerte se puede dividir una cuerda en 2, 3, 4, 5, etc., partes iguales, y los

sonidos progresivamente agudos que entonces emite son *sonidos armónicos*. Las personas de oído ejercitado llegan á distinguir algunos de los sonidos armónicos que se producen simultáneamente, del sonido fundamental de una cuerda pulsada al aire, lo cual demuestra que la división de la cuerda en partes vibrantes sobreviene aun cuando la fijación de un punto no sea su causa determinante. Ya veremos qué grado ocupan estos diferentes sonidos en la escala musical. Estudiando por el método gráfico las vibraciones sonoras que engendran los sonidos armónicos, se ve que estos son sonidos compuestos cuyas vibraciones simples se sobreponen (fig. 301). Los nodos y los vientres sonoros no son exclusivamente propios de las cuerdas vibrantes; también los encontraremos en las columnas de aire que vibran en el interior de los tubos, y hasta en las placas y en las membranas.

II

LEY DE LAS VIBRACIONES EN LOS TUBOS SONOROS

Los instrumentos de música llamados *instrumentos de viento* se componen de tubos sólidos, ora prismáticos ó bien cilíndricos, unos de forma rectilínea y otros más ó menos curvos. Por una embocadura, cuya forma y dimensión varían según los instrumentos, se pone en vibración la columna de aire contenida en estos tubos. Cuando nos ocupemos de las aplicaciones de la Acústica á las artes, tendremos ocasión de describir las principales clases de aquéllos; mas para conocer las leyes generales que rigen las vibraciones de las columnas gaseosas contenidas en los tubos, nos limitaremos á considerar aquí los rectos en forma de prismas ó de cilindros, como los que hay en los órganos.

Las figuras 302 y 303 representan la vista exterior y la sección ó vista interior de dos tubos de esta clase. En la parte inferior de cada uno de ellos se ve el conducto por donde penetra el aire emitido por un fuelle acústico: la corriente entra primeramente por una caja, y luego se escapa por una abertura angosta que se llama *luz*, yendo á romperse contra la arista de una placa cortada á bisel. Una parte de la corriente sale por la boca al exterior del tubo, mientras que la otra parte penetra en el interior. La rotura de la corriente da lugar á una serie de condensaciones y dilataciones que se propagan por la columna gaseosa; el aire de esta columna entra en vibración y produce un sonido continuo, cuya altura varía, según veremos, con arreglo á ciertas leyes.

La embocadura que acabamos de describir es la llamada *de flauta*. La experiencia demuestra que si en unos mismos tubos se ponen sucesivamente embocaduras de diversas formas (por ejemplo, las de lengüeta, batientes ó libres, que describiremos más adelante), sólo se modifica el timbre del sonido sin alterar su tono. Tampoco depende éste de la materia de que está formado el tubo, bien sea madera, marfil, metal, vidrio, etcétera, de donde debe deducirse que el sonido resulta únicamente de las vibraciones de la columna de aire.

La acústica es deudora al Padre Mersenne y á Daniel Bernouilli del descubrimiento de las leyes á que obedecen las vibraciones de los tubos sonoros. Vamos á indicar sucintamente las más sencillas.

El Padre Mersenne hizo ver que si se comparan los sonidos emitidos por dos tubos semejantes, aunque de distintas dimensiones, es decir, que todas las de uno de ellos sean dobles, triples, etc., que las del otro en todos sentidos, los números de las vibraciones del primero serán 2, 3, etc., veces menores que los de las vibraciones del otro; por consiguiente, el tubo más pequeño de los representados en la figura 304 dará doble número de vibraciones que el más grande, y el sonido que emita será la octava del

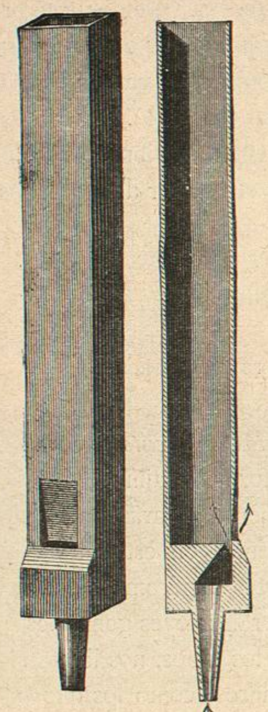

Fig. 302.— Tubos sonoros prismáticos de embocadura de flauta

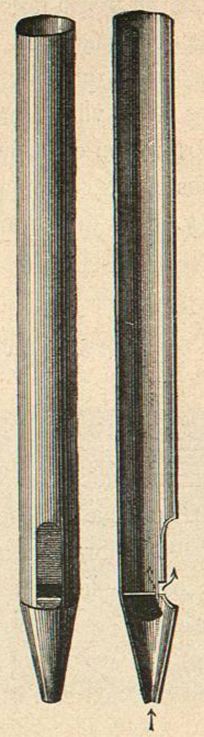

Fig. 303.—Tubos sonoros cilíndricos de embocadura de flauta

emitido por el tubo mayor. El descubrimiento de esta ley se debe al Padre Mersenne.

Los tubos están unas veces abiertos y otras cerrados por su parte superior; pero la ley que vamos á enunciar es tan aplicable á unos como á otros con tal que su longitud sea grande comparativamente á sus demás dimensiones.

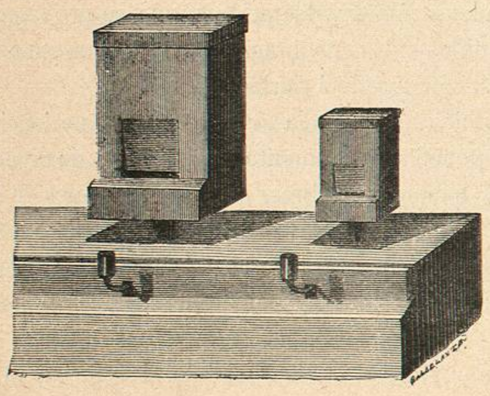

Fig. 304.—Ley de las vibraciones en tubos semejantes

Ante todo conviene observar que cada tubo puede emitir muchos sonidos, que serán tanto más agudos ó elevados cuanto mayor sea la velocidad de la corriente de aire. Dase el nombre de *sonido fundamental* al más grave de ellos; los demás son los *armónicos*, y para que resulten basta forzar progresivamente la corriente de aire. Finalmente, cuando se hace resonar tubos de varias longitudes, se reconoce que los más largos despiden los sonidos fundamentales más graves, de suerte que los números de vibraciones están precisamente en razón inversa de las longitudes de los tubos. Por ejemplo, mientras el menor de los tubos representa-

dos en la figura 305 da 12 vibraciones, los otros tres darán en el mismo tiempo 6, 4 y 3, es decir, 2, 3 y 4 veces menos, siendo, por el contrario, sus longitudes 2, 3 y 4 veces mayores. Repetimos que esta ley es tan aplicable á los tubos abiertos como á los cerrados.

Pero en los de igual longitud el sonido fundamental de un tubo cerrado es diferente del mismo sonido dado por un tubo abierto. Las vibraciones sonoras son en él dos veces

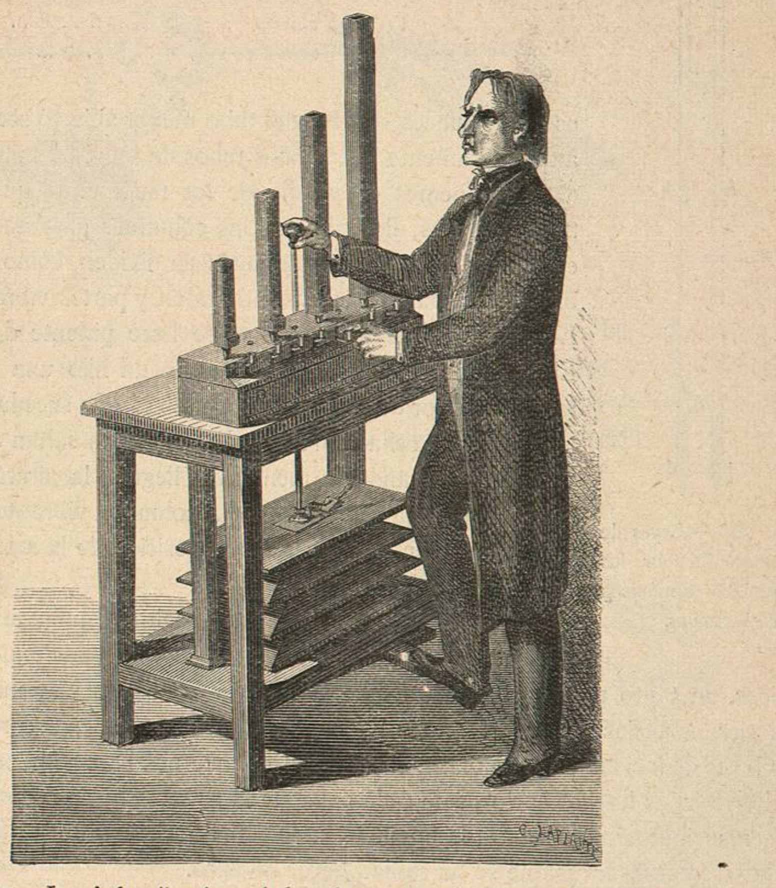

Fig. 305.—Ley de las vibraciones de los tubos sonoros de diferentes longitudes

menos numerosas, lo que equivale á decir que el sonido fundamental de un tubo cerrado es el mismo que el de uno abierto de doble longitud.

Réstanos decir cuál es la sucesión de los sonidos armónicos en unos y otros, debiendo antes advertir que Bernouilli fué quien descubrió las leyes que rigen los de los tubos abiertos ó cerrados.

Prodúcense estos sonidos poniendo sobre el fuelle acústico, representado en la figura 305, tubos cuya longitud es grande relativamente á las dimensiones transversales (figura 306). Si se abre gradualmente la llave adaptada á cada uno de estos tubos, se oye primeramente el sonido fundamental y después, sucesivamente, los sonidos armónicos.

Calificándolos por el orden del más grave al más agudo, á partir del fundamental, se ve que los números de vibraciones de los tubos abiertos crecen con arreglo á la serie de los números 1, 2, 3, 4, 5, 6..... etc. En los tubos cerrados estos números crecen según la serie de los impares 1, 3, 5, 7..... etc., resultando de aquí que si se toman tres tubos,