

La máquina de Bourbouze es la de Atwood ligeramente modificada en lo que atañe á la caída del cuerpo grave, el cual es una masa adicional unida al sistema de dos pesas que se equilibran en todas las fases de la caída. Pero la polea ó rueda de garganta, alrededor de la cual se enrolla el hilo que sostiene las dos pesas, está montada en el mismo eje que un cilindro forrado de papel, tiznado de negro de humo (fig. 35).

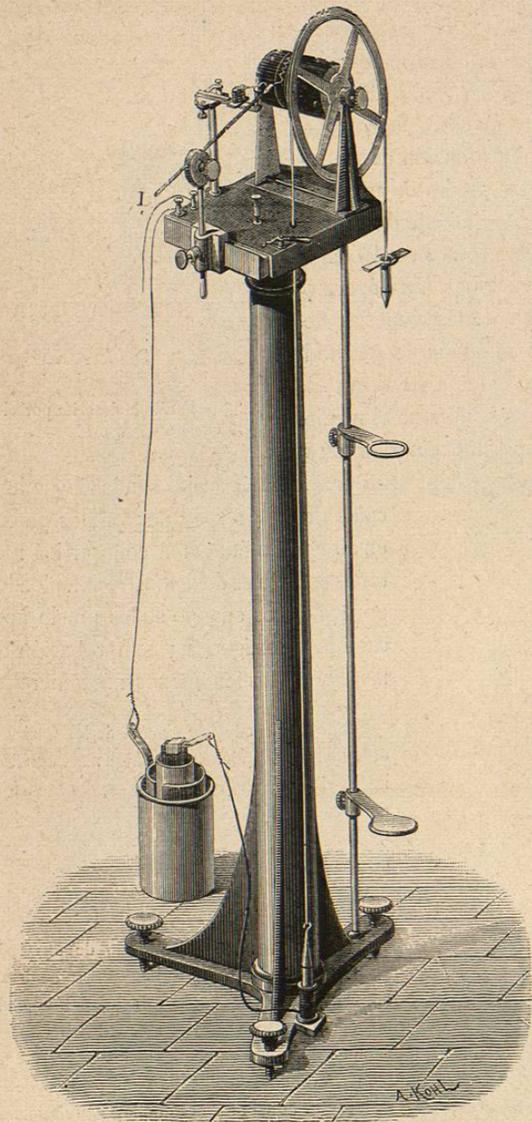


Fig. 35.—Máquina de Bourbouze para comprobar la ley de la caída de los cuerpos

Una lengüeta elástica de hierro dulce L está doblada en su extremidad inferior de modo que pueda vibrar horizontalmente cuando quede por un momento separada de su posición de equilibrio; en este caso es sabido que estas oscilaciones, todas isócronas, pueden servir por su número para medir el tiempo. La otra extremidad de la lengüeta lleva un punzón fino y flexible que traza también alternativamente de derecha á izquierda y de izquierda á derecha líneas horizontales que quedan impresas en blanco en el cilindro. Si éste gira alrededor de su eje, las líneas de que hablamos formarán en su superficie una serie de sinuosidades continuas, cuyo número será igual al de las oscilaciones: por consiguiente, un mismo número cualquiera de estas sinuosidades corresponderá siempre al mismo tiempo transcurrido.

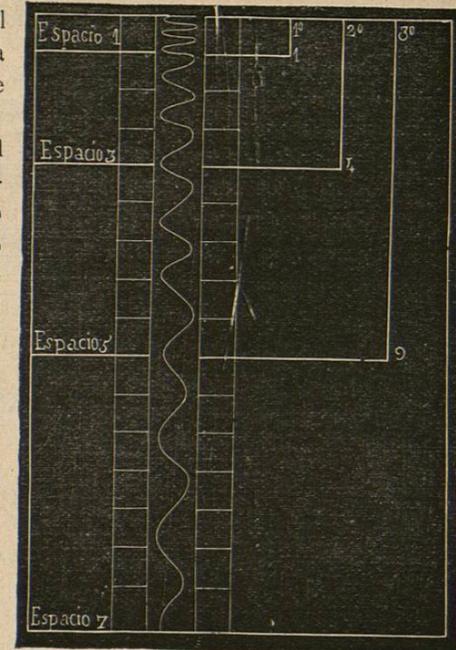
Si el cilindro tiene un movimiento de rotación uniforme, las sinuosidades estarán á distancias iguales, ó si se quiere, todas ellas tendrán la misma amplitud. Si, por el contrario, este movimiento no es uniforme, si se acelera, la desviación de las sinuosidades aumentará, pero sin dejar de ser proporcional á la rapidez de rotación del cilindro. Pero esta rapidez es la misma que la de la polea, la cual varía á su vez con la velocidad del móvil al que pone en movimiento. Los espacios recorridos por un punto de la circunferencia del cilindro estarán así en la misma relación que los recorridos por el cuerpo en su caída, y las leyes de los dos movimientos serán idénticas.

Si el cilindro tiene un movimiento de rotación uniforme, las sinuosidades estarán á distancias iguales, ó si se quiere, todas ellas tendrán la misma amplitud. Si, por el contrario, este movimiento no es uniforme, si se acelera, la desviación de las sinuosidades aumentará, pero sin dejar de ser proporcional á la rapidez de rotación del cilindro. Pero esta rapidez es la misma que la de la polea, la cual varía á su vez con la velocidad del móvil al que pone en movimiento. Los espacios recorridos por un punto de la circunferencia del cilindro estarán así en la misma relación que los recorridos por el cuerpo en su caída, y las leyes de los dos movimientos serán idénticas.

Digamos una palabra acerca del modo cómo se debe proceder cuando se quiere comprobar las leyes de la caída de los cuerpos, y de los resultados gráficos que los presentan claramente marcados, y merced á los cuales se pueden conservar sus huellas.

La corriente de una pila pasa por dos electro-imanés (fig. 35), uno de ellos situado en la parte superior del aparato, y el otro en la inferior. En este último se apoya la pieza de hierro, que es una de las dos pesas equilibradas y pendientes del hilo enrollado en la garganta de la polea. La atracción de este electro-imán retiene la pesa, impidiéndole obedecer al movimiento común que la masa adicional imprimiría al sistema. El otro electro-imán mantiene la lengüeta vibrante separada de su posición de equilibrio.

Cuando se quiere dar principio al experimento, hay que interrumpir bruscamente la corriente, y entonces, como por una parte el electro-imán inferior no retiene ya la masa, el sistema se pone en movimiento por la acción que en él ejerce la pesa adicional, y comienza la caída bajo el influjo de la gravedad disminuída. Por otra parte, la lengüeta vibrante vuelve á su posición de equilibrio, va más allá de ella y ejecuta la serie de sus oscilaciones; el tiempo resulta medido, según hemos dicho, por la distancia que media en el cilindro entre el origen y el fin de cada oscilación marcada.



Supongamos el experimento hecho de modo que, obedeciendo la caída á la acción perenne del peso adicional, se haya efectuado en toda la altura del aparato. Desenrollado entonces el papel del cilindro, será fácil comprobar la ley de los espacios en vista de la línea sinuosa trazada en él por la lengüeta vibrante, como lo representa la figura 36. Adviértese en ella que, respecto de las duraciones sucesivas de la caída, correspondiente cada una de ellas á tres vibraciones enteras de la lengüeta, los espacios recorridos son como los números 1, 3, 5, 7.... Luego estos espacios, contados ó sumados desde el origen del movimiento, son como los números 1, 4, 9, 16...., es decir, proporcionales á los cuadrados de los tiempos.

Si se trata de comprobar la ley de las velocidades ó de su proporcionalidad á los tiempos, entonces se hace uso del procedimiento de Atwood, interponiendo en el punto apetecido la corredera anular que recibe el peso motor adicional. Desde este momento, todas las vibraciones anotadas conservan la misma amplitud, lo cual indica que el cilindro adquiere un movimiento de rotación uniforme. Comparando las series obtenidas así después de algunos tiempos de caída, se ve que los espacios correspondientes á un mismo número de vibraciones son proporcionales á estos tiempos. Púedese además reconocer que el espacio recorrido con uniformidad durante un tiempo igual al de la caída, es precisamente doble del recorrido por el cuerpo pesado durante su movimiento acelerado.

En una palabra, la velocidad adquirida en un momento dado es constantemente doble que el espacio recorrido desde el origen de la caída hasta este mismo instante.

M. Buignet resume del modo siguiente las ventajas de este medio ingenioso de comprobación de las leyes de la caída de los graves.

“El aparato de M. Bourbouze, dice en sus *Manipulaciones de física*, difiere de la máquina de Atwood y de los demás aparatos en cuatro puntos esenciales que le hacen sumamente precioso desde el punto de vista práctico:

„1.º Establece una coincidencia tan perfecta como pueda desearse entre el origen del tiempo y el origen del espacio;

„2.º Permite variar como se quiera la unidad de tiempo marcando siempre el espacio recorrido que corresponde á la unidad escogida. De este modo se obtienen, en un mismo experimento y en el trazado de un mismo surco, dos, tres y hasta cuatro demostraciones de la ley que se trata de comprobar;

„3.º Como proporciona al operador el medio de reducir la unidad de tiempo, le permite por esto mismo disminuir la altura del aparato, circunstancia que hace á éste más práctico y manejable;

„4.º Por último, no se limita á dar la demostración experimental de las leyes de la caída de los cuerpos, sino que también inscribe por sí mismo estas leyes en el papel destinado á recibir las impresiones, de suerte que al concluir el experimento se puede conservar una imagen fiel y perfectamente exacta de estas leyes (1).”

## CAPÍTULO V

### LEYES DE LA GRAVEDAD.—EL PÉNDULO

#### I

##### ISOCRONISMO DE LAS OSCILACIONES DEL PÉNDULO

Hallándose Newton sentado cierto día en su jardín de Woolstrop, vió que de la copa de un árbol inmediato se desprendía una manzana, la cual fué á caer á sus pies. Tan vulgar circunstancia le sugirió, según se dice, sus profundas investigaciones sobre la naturaleza de la gravedad, haciéndole reflexionar en si esa acción misteriosa á la que están sujetos todos los cuerpos terrestres, cualquiera que sea su altura en la atmósfera y tanto en el fondo de los valles como en la cumbre de las más altas montañas, se extendería también á los que se hallan situados en la Luna. El resultado de los esfuerzos y meditaciones de aquel potente genio fué la solución de tan gran problema; pero aún transcurrieron veinte años antes que quedara construído, en toda su majestuosa belleza, el edificio cuyos cimientos echaron Keplero, Galileo y Huygens, que los sucesores de Newton terminaron, y que ostenta en su frontispicio esta frase hoy triunfante: *gravitación universal*.

(1) He aquí cómo se procede para ello. Terminado el experimento, se quita del cilindro el papel en que están marcadas las vibraciones de la lengüeta, y se le sumerge en éter para que éstas no se borren, cosa que sucedería en breve á causa del roce sobre el negro del humo: en seguida se le pega en una hoja de papel blanco, y ya se pueden trazar las medidas necesarias para las comprobaciones.

Pero ¿es verídica la anécdota contada por los biógrafos del grande hombre? Poco importa (1): lo esencial es que tenga algunos visos de verosimilitud. Engañárase sin embargo el que creyese que pudo menguar en lo más mínimo la gloria del sabio. Millones de veces había ocurrido la misma casualidad anteriormente á Newton, y pudieron presenciarla sus antecesores lo mismo que sus contemporáneos: un caso tan insignificante como la caída de una manzana no podía suscitar tales ideas sino en un hombre dotado de una imaginación avezada á las más altas especulaciones y movida por una voluntad bastante poderosa para *pensar en ellas siempre*.

Un caso parecido sirvió de punto de partida para las investigaciones de Galileo sobre el movimiento del péndulo. Hacia el año 1582 fué cuando el que debía dar tan gran impulso á la física experimental, y que á la sazón apenas contaba diez y ocho años, preludivió sus descubrimientos futuros con la observación siguiente (2): “Un día en que asistía, algo distraído sin duda, á una ceremonia religiosa, fijó sus miradas en una lámpara de bronce, obra maestra de Benvenuto Cellini, que, suspendida de una larga cuerda, oscilaba con lentitud ante el altar. Quizás, con los ojos fijos en aquel metrónomo improvisado, unió su voz á la de los celebrantes; la lámpara se detuvo poco á poco, y atento Galileo á sus últimos movimientos, observó que marcaba siempre el mismo compás.”

(J. Bertrand, *Galileo y sus trabajos*.) Esta última circunstancia fué la que más le llamó la atención. La lámpara, á medida que se acercaba al fin de su movimiento, describía en el espacio arcos de menor amplitud cada vez, permaneciendo empero constante la duración de las oscilaciones. El sabio filósofo italiano repitió muchas veces el experimento, y acabó por descubrir la relación que existe entre esta duración y la longitud de la cuerda que soporta el peso oscilante. Más adelante (en 1673), Huygens completó tan hermoso descubrimiento y formuló la ley matemática de los movimientos del péndulo, basando su demostración en las leyes de la caída de los graves, según las había enunciado Galileo.

Procuraremos hacer comprender en qué consiste esta ley y qué relación tiene con la teoría de la gravedad.

Supongamos un punto material y pesado  $M'$ , suspendido de uno de los extremos de un hilo inextensible y sin masa; esto es imposible realizarlo en la práctica, pero sí accesible en la teoría. Teniendo sujeto el hilo por su extremo superior, la acción de la gravedad obrará sobre el peso y atraerá el hilo hacia la vertical, de modo que el sistema entero permanecerá en reposo; pero si en un espacio privado de aire apartamos el hilo

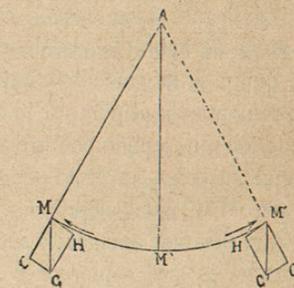


Fig. 37.—Movimiento oscilatorio de un péndulo simple

(1) Aunque ha sido controvertida, tiene en su favor el testimonio de un contemporáneo de Newton y de uno de sus amigos particulares, Pemberton. En los *Elementos de filosofía de Newton*, de Voltaire, se lee lo siguiente: “Cierta día del año 1686, Newton, que residía en el campo, vió caer á sus pies la fruta de un árbol, y, según me ha contado su sobrina (Mad. Conduitt), empezó desde entonces á meditar profundamente en la causa que de tal modo atraía á todos los cuerpos.....” Estos dos testimonios dan al hecho citado gran verosimilitud.

(2) A la sazón estudiaba medicina en Pisa, de cuya universidad llegó á ser profesor algunos años después, habiendo emprendido entonces la serie de experimentos acerca de la gravedad que dejamos relatados hasta descubrir las leyes de la caída de los graves.