

Los cuerpos que caen en el vacío recorren en el mismo tiempo espacios iguales, á partir del origen de la caída. La clase de la substancia de que estén formados los cuerpos, la diversidad de las masas, ó de los pesos, las de las densidades y volúmenes, no tienen influencia en esta duración.

Dedúcese de aquí la consecuencia de que la gravedad es una fuerza que se hace sentir con igual intensidad sobre las partículas más pequeñas de los cuerpos, y que obra sobre las moléculas como si cada una de ellas estuviese aislada ó independiente de las demás. Si se considera un cuerpo de corta extensión, es permitido mirar las acciones de la gravedad sobre cada una de las moléculas de que aquél está formado como fuerzas paralelas é iguales. La resultante ó la suma de estas fuerzas, de estas acciones elementales de la gravedad, es lo que constituye el *peso* del cuerpo, el cual varía necesariamente, ora con el volumen ó bien con la naturaleza de la substancia, al paso que la gravedad, en el mismo lugar ó cuerpo, tiene una intensidad invariable, siendo también la misma para las partículas de igual masa. Por consiguiente, no se debe confundir el peso con la gravedad, según es costumbre en el lenguaje usual. Más adelante tendremos ocasión de insistir en esta distinción fundamental.

CAPÍTULO IV

CAÍDA DE LOS GRAVES

I

LEYES DE LAS VELOCIDADES Y DE LOS ESPACIOS

La simple observación ha debido bastar para que se reconociera en todo tiempo el movimiento acelerado ó de progresión de los cuerpos abandonados á sí mismos. Mediando una altura de caída algo grande y cuerpos un poco pesados, basta la simple vista para advertir el aumento de rapidez, que se echa de ver asimismo en la violencia del choque, la cual es tanto mayor cuanto más considerable la altura de la que se precipitan dichos cuerpos. En efecto, la intensidad del choque de dos cuerpos de igual masa sería la misma para cualquier altura de caída si la velocidad fuese constante.

Aristóteles hace ya mención formal de esta aceleración: "Así, dice, como el cuerpo al que su velocidad hace bajar más que á otro, adquiere velocidad por su propio peso," y en otra parte: "La tierra (elemento) está animada de un movimiento tanto más rápido cuanto más se aproxima al centro..." (*De Cælo*, I, VIII, 13.)

Pero, ¿en virtud de qué ley crece la velocidad? Esto es lo que ignoraban los antiguos, lo que no podían conocer por no haber hecho experimento alguno, ni tomado ninguna medida exacta. Aristóteles da á entender que la velocidad depende de las masas, como lo indican las palabras anteriormente citadas: "adquiere velocidad por su propio peso." Anteriormente á Galileo se enseñaba en las escuelas, en nombre de las doctrinas peripatéticas, que "la velocidad de los cuerpos que caen libremente es proporcional al espacio recorrido." Por ejemplo, la rapidez de la caída, cuando el cuerpo ha recorrido 20 pies, debería ser 20 veces tan grande como la adquirida después de recorrer el primer pie, doble de la que tenía después de recorridos 10 pies, etc. Esto no pasaba de ser una mera hipótesis, por nada comprobada. En el tiempo de Galileo, que

la combatía, llamábase comúnmente á esta supuesta ley *ley de Baliani*, del nombre de su defensor más autorizado. (V. Hofer, *Historia de la física*.)

También fué Galileo quien descubrió la verdadera ley, siendo interesante saber cómo lo logró. Ya hemos indicado qué experimentos hizo para cerciorarse desde luego de que las desigualdades en la caída de los cuerpos dependen de la resistencia del aire, y no de las diferencias de peso y densidad. Otros experimentos le probaron que la rapidez crece con la altura, y por consiguiente que el movimiento de los graves era un movimiento acelerado. Entonces prescindió por un momento de la observación para recurrir á la hipótesis. "Supuso que, sea cualquiera la causa originaria de la *gravedad*, obra de igual modo en cada instante indivisible, comunicando á los cuerpos que hace caer al suelo un movimiento uniformemente acelerado en tiempos iguales, de suerte que las velocidades que adquieren al caer son proporcionales á los tiempos. De esta sola suposición tan sencilla dedujo aquel filósofo toda su teoría de la caída de los cuerpos." (*Enciclopedia metódica*, art. GRAVEDAD.)

Pero no bastaba haber emitido una hipótesis; era menester cerciorarse de que la realidad está conforme con ella, que los hechos la confirman. En esto Galileo dió un memorable ejemplo del empleo del método, de ese método fecundo de observación y de inducción experimental del que ha brotado la física moderna y con ella todas las ciencias naturales.

Al suponerse que la velocidad de la caída de los cuerpos crece en proporción de los tiempos, la consecuencia inmediata es que los espacios recorridos por los cuerpos á partir del origen del movimiento son proporcionales á los cuadrados de los tiempos invertidos en recorrerlos. Tales son las dos leyes de las velocidades y de los espacios que se trataba de comprobar, bastando la demostración de una de ellas para deducir la de la otra.

El experimento directo apenas era posible, ni en cuanto á las velocidades ni en cuanto á los espacios, y por otra parte, la rapidez de la caída y las perturbaciones ocasionadas por la resistencia del aire son tales, que, según hemos dicho antes, las medidas exactas no serían la expresión de la ley.

Era, pues, forzoso arbitrar el medio de moderar el movimiento de modo que la observación fuese fácil y la resistencia del aire aminorada, sin que la ley sufriese alteración alguna. Galileo lo consiguió ideando el famoso experimento que todavía lleva su nombre, el del *Plano inclinado*. Abandonando un cuerpo pesado á la sola acción de la gravedad, por ejemplo una bola, en la parte superior de un plano que formaba con el horizontal un ángulo menor que el recto, vió que el movimiento de dicha bola debía estar sometido á las mismas leyes que el del propio cuerpo si cayera verticalmente, con la sola diferencia de que la gravedad resultaría disminuída en una relación constante, la de las líneas AC y AB (fig. 27) que representan la altura y la longitud del plano inclinado (1).

Habiendo moderado Galileo tanto como quería el movimiento acelerado de la gra-

(1) La fuerza MP, ó sea la gravedad dirigida en sentido vertical, puede descomponerse en dos fuerzas, una de ellas, MN, perpendicular al plano y aniquilada por la resistencia de éste, y la otra, MT, paralela al mismo plano. Esta fuerza es la única causa del movimiento, siendo visible que su relación con la gravedad es la de AC á AB.

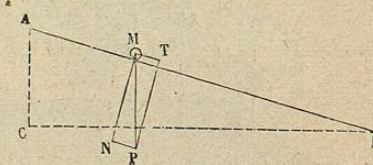


Fig. 27.—Plano inclinado. Movimiento de los graves

vedad valiéndose al efecto de este artificio, pudo ya medir los espacios recorridos durante los segundos sucesivos que componen la duración de la caída. Para realizar el experimento, sirvióse de una bola de metal bruñido que rodaba por una ranura abierta en la cara superior de una viga; y levantando ésta por un extremo, marcaba el tiempo que invertía la bola en recorrer toda la longitud del plano inclinado ó sus diferentes partes. Hacía también el mismo experimento tesoando con un peso una cuerda bien resbaladiza, inclinada con relación al horizonte, y abandonando á sí mismo desde el punto más elevado de la cuerda un carrito formado por dos poleas sostenidas á su vez

por una masa pesada pendiente de su sistema.

De este modo reconoció Galileo que los espacios recorridos son proporcionales á los cuadrados de los tiempos invertidos en recorrerlos.

En el siglo xvii y siguientes se ha repetido de diferentes modos la comprobación experimental de esta ley. Riccioli y Grimaldi se limitaron á dejar caer cuerpos pesados desde lo alto de torres de desigual elevación, y medir los tiempos de caída por las oscilaciones del péndulo. La comparación de las duraciones de la caída con los espacios recorridos les dió aproximadamente la ley del cuadrado de los tiempos. *La Enciclopedia* cita "una máquina del P. Sebastián compuesta de cuatro parábolas iguales que se cortaban en sus vértices, y por medio de esta máquina hacía patente á los ojos del cuerpo, de cuyo testimonio necesitan casi siempre los

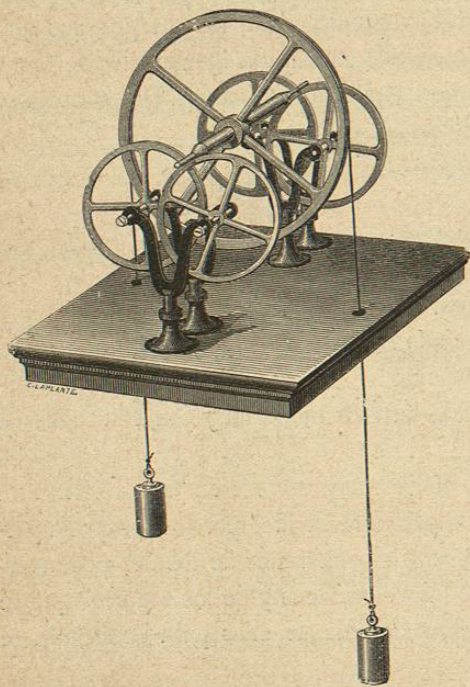


Fig. 28. — Polea de la máquina de Atwood

ojos del espíritu, que la caída de los cuerpos hacia el suelo se efectúa según la progresión descubierta por Galileo.,

Por último, á fines del siglo pasado, un físico inglés llamado G. Atwood ideó un medio ingenioso de moderar el movimiento acelerado de la caída de los cuerpos y de comprobar las dos leyes de las velocidades y de los espacios (1).

El artificio ideado por Atwood para retardar el movimiento de los cuerpos que caen es el siguiente: Alrededor de la garganta de una polea muy movable (fig. 28) se enrolla una hebra de seda bastante delgada, la cual sostiene en sus dos extremos dos cilindros metálicos que pesan exactamente lo mismo. En tal estado, la polea, la hebra y las pesas permanecen inmóviles, porque los dos cilindros iguales se equilibran constantemente.

(1) Este medio está basado en un principio de mecánica, cuyo enunciado es el siguiente: Cuando una misma fuerza (daría lo mismo considerar dos fuerzas iguales) actúa sobre dos masas diferentes durante un espacio de tiempo igual, las velocidades están en razón inversa de los tamaños de las masas. Así pues, si para determinar la caída vertical de un sistema de masa dada, se emplea únicamente como fuerza motriz la parte de la gravedad que se ejerce sobre una fracción de la masa total, la velocidad del sistema sufrirá un retraso proporcional á la relación que existe entre esta fracción y la masa total. En una palabra, el movimiento se efectuará como si la intensidad de la gravedad quedara también disminuída en esta proporción.

Si se añade entonces á uno de éstos un peso adicional, el sistema se pondrá en movimiento, y las dos porciones de la hebra de seda se moverán en sentido inverso, conservando cada una su dirección vertical. Pero se comprende que la velocidad de la caída se retardará tanto más, cuanto menor sea la fracción de la suma de los dos pesos iguales que represente el peso adicional. Supongamos que cada uno de ellos pesa 124'5 gramos, y el peso adicional 1 gramo solamente. Puesto en movimiento el peso total de 250 gramos por una fuerza que tan sólo es su 250.^a parte, hace que la velocidad sufra un retraso igual al que experimentaríamos si la intensidad de la gravedad fuese 250 veces menor. De esta suerte se hace fácil la observación, sin que se alteren las leyes del movimiento.

La figura 29 representa el conjunto y disposición de la máquina. En la parte superior de una columna se ve la polea movable, cuyo eje descansa sobre las llantas de dos sistemas de ruedas paralelas; luego el hilo que se enrolla en su garganta y cuyas dos porciones mantienen tirantes los pesos iguales. Detrás de uno de los pesos se halla una regla vertical graduada con esmero, la cual permite que se lea en todas posiciones la distancia de su base al cero de la escala, es decir, al punto de partida del movimiento.

La regla lleva dos correderas ó platinillos movibles, que por medio de unos tornillos de presión pueden asegurarse enfrente de cualquiera de las divisiones. La corredera inferior C es maciza, y por consiguiente merced á ella se puede detener cuando se quiera el movimiento del sistema. La otra corredera C' es de forma anular, teniendo la

abertura las dimensiones necesarias para que pueda pasar por ella el cilindro suspendido del hilo y el peso adicional p' , pero en cambio detiene el otro peso adicional p á causa de la forma prolongada de éste. Un reloj de segundos acompaña al aparato; cada movimiento de la aguja produce un golpe seco y perceptible, por cuyo medio se pueden contar los segundos transcurridos, sin necesidad de mirar la esfera. Un mecanismo dependiente del reloj permite además comenzar cada experimento en el instante preciso

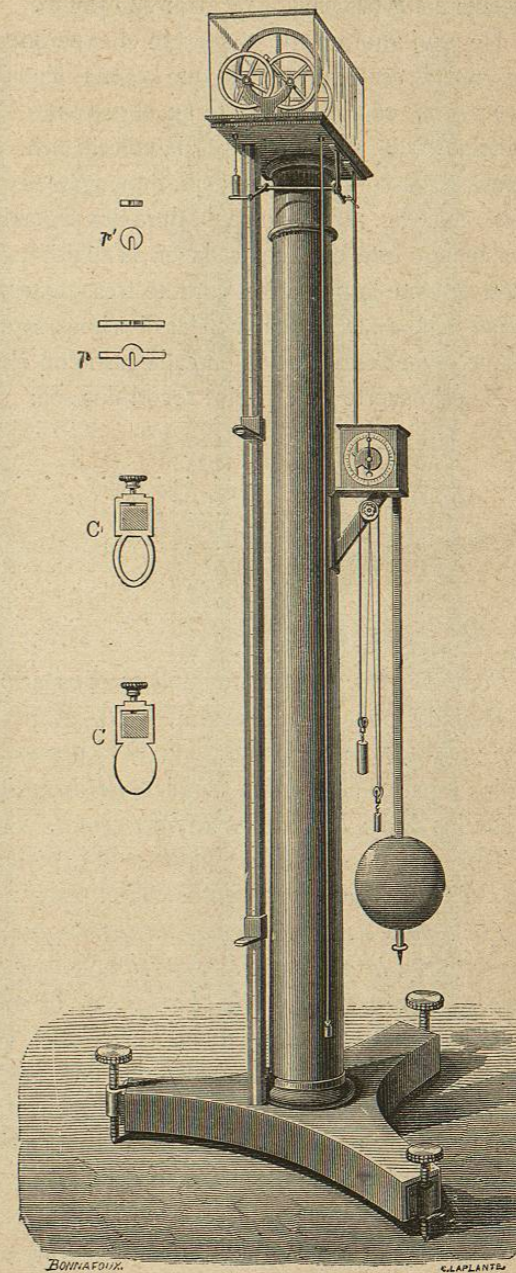


Fig. 29. — Máquina de Atwood.

en que la aguja de los segundos se encuentra sobre el cero de la esfera, que se halla en su parte superior. El peso adicional, sostenido primeramente sobre la pesa que ocupa la posición 0 de la escala vertical, queda bruscamente en libertad gracias á la acción del mecanismo, y principia á recorrer su camino.

He aquí ahora cómo se efectúa el experimento. Por un tanteo preliminar, se coloca la corredera maciza de modo que la pesa cilíndrica cargada con el peso p' llegue á descansar sobre ella precisamente en el momento de empezar la segunda oscilación de la péndola, lo que se advierte por la coincidencia del golpe del escape y del que produce la pesa al dar contra la corredera. Supongamos que esto ocurra en la duodécima división de la regla (fig. 30). Si la caída dura dos segundos completos, la pesa cae sobre la corredera cuando ésta está colocada en la división 48. Entonces se reconoce, comenzando sucesivamente la operación durante tres, cuatro, cinco segundos, etc., que la corredera maciza debe estar colocada en las divisiones siguientes: 108, 192, 300, etc., para que el choque de la pesa coincida en cada caso con el golpe de los segundos del reloj.

De esta suerte los espacios recorridos son:

En 1 segundo.	12 centímetros		
En 2 —	48	ó	12×4
En 3 —	108	ó	12×9
En 4 —	192	ó	12×16
En 5 —	300	ó	12×25 , etc.

Como se ve, es preciso multiplicar el espacio que recorre un cuerpo al caer durante un segundo por los números 4, 9, 16, 25, para obtener los espacios recorridos durante 2, 3, 4, 5 segundos de caída. Si el peso adicional cambiase, los números que miden los espacios cambiarían también, permaneciendo constantes sus relaciones, las cuales son las de los *cuadrados de los tiempos*.

Tenemos, pues, una ley demostrada experimentalmente, ó sea la que había deducido Galileo de sus experimentos con el plano inclinado:

Los espacios recorridos por un cuerpo que partiendo del estado de reposo cae libremente por la acción de la gravedad, son proporcionales á los cuadrados de los tiempos transcurridos desde el origen de la caída.

Réstanos deducir la ley de las velocidades, esto es, saber cuál será la velocidad adquirida en 1, 2, 3 ó más segundos que dure la caída. Mientras el cuerpo está sometido á la acción de la gravedad, su velocidad aumenta constantemente por cada instante que dure la caída, y por consiguiente esta observación es difícil de hacer; para que sea posible, se requiere que el influjo constante de la gravedad se anule en el momento mismo en que comienza el segundo siguiente, continuando el cuerpo su movimiento; pero entonces se mueve de un modo uniforme y en virtud tan sólo de la velocidad adquirida.

Importa penetrarse bien de lo que se entiende por velocidad de un cuerpo que cae, ó en términos generales, que participa de un movimiento acelerado. Esta velocidad, en un instante dado del movimiento, es el espacio que recorrería el cuerpo uniformemente en cada uno de los segundos sucesivos, si la acción de la fuerza dejase de producirse y por lo tanto la aceleración del movimiento. La corredera anular p de la máquina de Atwood permite realizar esta hipótesis. Basta fijarla en las divisiones indicadas por el primer experimento, y buscar luego por tanteo en qué puntos de la regla es menester

colocar sucesivamente la corredera maciza para que la pesa, libre de su peso adicional, venga á chocar con ella al principio del segundo siguiente.

Suponiendo que p tenga la misma masa que p' , el experimento dará los números

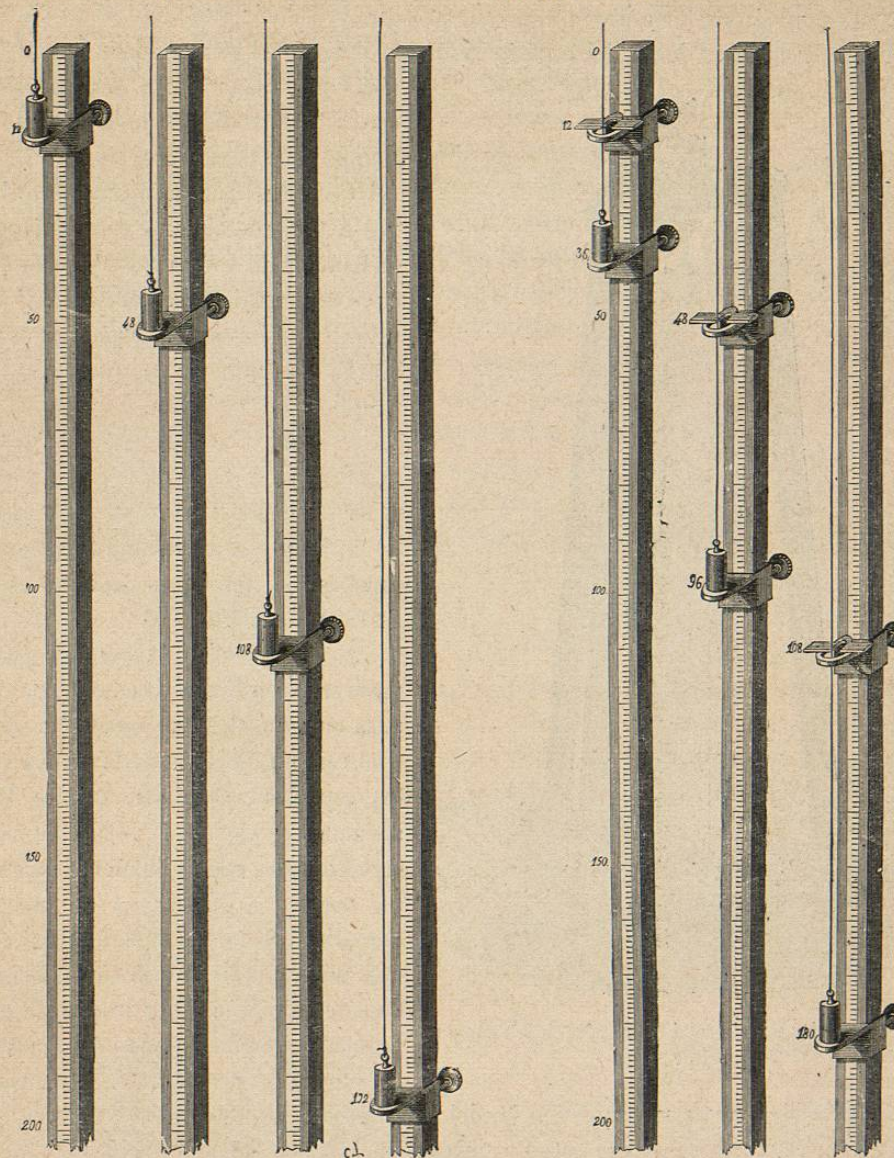


Fig. 30.—Estudio experimental de la caída de los cuerpos.
Ley de los espacios recorridos

Fig. 31.—Estudio experimental de la caída de los cuerpos.
Ley de las velocidades

siguientes: 36, 96, 180, etc. (fig. 31). De aquí resulta que la velocidad uniforme del cuerpo grave, adquirida en 1, 2, 3, etc., segundos de caída, es:

En 1 segundo.	de 24 centímetros;
En 2 —	48 —
En 3 —	72 — etc.

Así pues, la velocidad va aumentando proporcionalmente á los tiempos, y por tanto la segunda ley á que obedece la caída de los cuerpos graves se enunciará como sigue:

Cuando un cuerpo cae libremente por el influjo de la gravedad, su velocidad se acelera; esta velocidad es, en un momento cualquiera de la caída, proporcional al tiempo transcurrido desde el origen del movimiento.

Resulta también de los mismos experimentos que la velocidad adquirida al cabo de un segundo de caída es doble del espacio recorrido durante el primer segundo, siendo

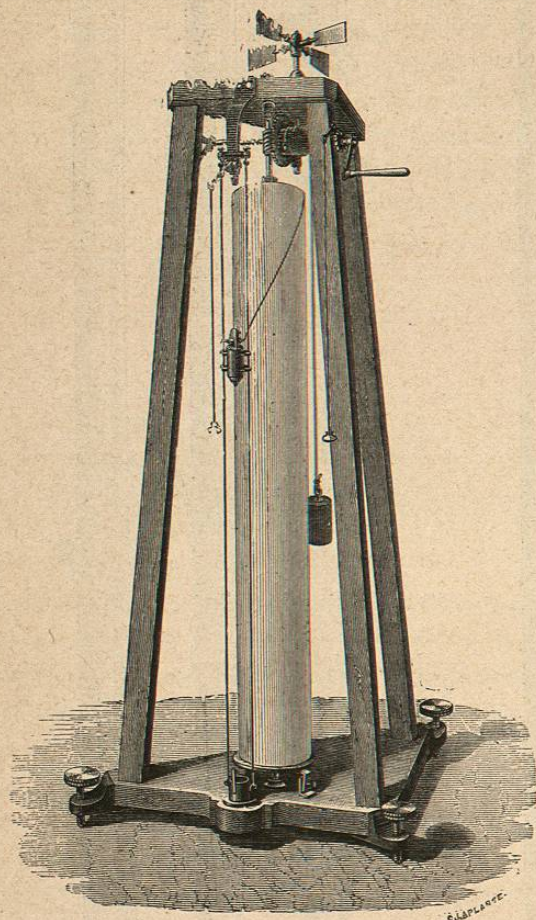


Fig. 32.—Estudio experimental de la caída de los cuerpos. Máquina de Morín

fácil comprender que esta consecuencia es independiente de la unidad de tiempo que hemos escogido.

Compruébanse asimismo estas leyes experimentalmente con la máquina llamada de *indicaciones continuas*, cuya primera idea se debe á M. Poncelet y que ha sido realizada por M. Morín. La figura 32 representa dicha máquina en conjunto. Una pesa de forma cilindro-cónica desciende libremente guiada en su caída por dos varillas de hierro verticales, y provista de un lápiz que traza una línea continua en un cilindro de madera forrado de papel.

Si este cilindro ó columna estuviese fijo, la línea trazada por la pesa en su caída sería una recta vertical que no indicaría nada acerca de los espacios recorridos durante los segundos sucesivos. Pero la columna cilíndrica gira con movimiento uniforme merced á un sistema de ruedas dentadas movidas por el descenso de una pesa, obteniéndose la uniformidad de la rotación por medio de un regulador de paletas que engrana con las ruedas del sistema. Gracias al movimiento del cilindro y, por consecuencia, del papel de que está forrado, el lápiz traza una curva en el papel, siendo el estudio de esta curva el que demuestra la ley de los espacios recorridos por el cuerpo en su caída.

Así es en efecto, pues desarrollando el papel se ve que la línea trazada por el lápiz es lo que se llama en geometría una mitad de *parábola* (fig. 33), cuya propiedad fundamental puede enunciarse en estos términos:

Las distancias de los puntos sucesivos de la curva á una perpendicular al eje, trazada por su vértice, son proporcionales á los cuadrados de las distancias de estos mismos puntos al eje mismo.

Dividiendo la perpendicular al eje en 5 partes iguales, las cinco distancias desde el vértice 0 á los puntos de división 1, 2, 3, 4, 5, estarán en la relación de los números 1, 2, 3, 4 y 5; pero los cinco intervalos verticales paralelos lo estarán en la de los números 1, 4, 9, 16 y 25, es decir, serán proporcionales á los cuadrados de los primeros.

Habiendo girado el cilindro con movimiento uniforme, las porciones iguales de circunferencia que separan los puntos de división de la línea horizontal marcan los tiempos sucesivos de la caída de la pesa del aparato, y las líneas verticales son los espacios recorridos.

De este modo queda comprobada la ley de los espacios. Por lo que hace á la de las velocidades, se demuestra que es una consecuencia inmediata de aquella (1).

El plano inclinado de Galileo y la máquina de Atwood hacen posible la observación y comprobación de las leyes de la caída de los cuerpos por medio de procedimientos cuyo objeto es retardar el movimiento del móvil. La máquina de M. Morín deja á éste toda su velocidad, pero anota gráficamente las observaciones. Otro aparato ideado por M. Bourbouze participa de las ventajas de ambos procedimientos; toma de la máquina de Atwood el principio del retraso de la caída, y de la de Morín el de la anotación de las observaciones, aunque el medio gráfico no es el mismo. Sería superfluo describir esta invención ingeniosa, si sólo se tratara de demostrar una vez más cuáles son las leyes de la

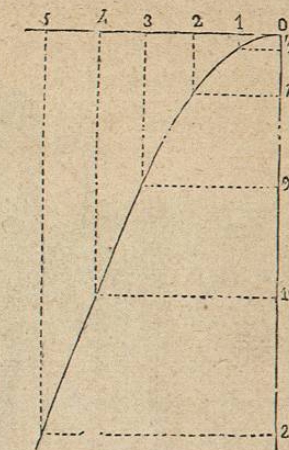


Fig. 33.—Parábola descrita por el cuerpo en su caída

caída de los cuerpos; pero si nos parece en alto grado útil dar á conocer los métodos especiales de demostración ideados por los físicos cuando se les puede aplicar á la investigación y comprobación de las leyes de los fenómenos más generales.

(1) En *La Chispa Eléctrica*, de M. Cazín, se describe una máquina en la cual se marca gráficamente el movimiento del cuerpo grave como en la de M. Morín; sólo que la curva parabólica resulta trazada en ella por puntos sucesivos correspondientes á otras tantas descargas eléctricas.

Copiaremos dicha descripción como cosa curiosa:

“Un cilindro de metal, forrado de una hoja de papel y colocado verticalmente, recibe de un mecanismo de relojería una rotación uniforme alrededor de su eje (fig. 34). Este cilindro está en comunicación con uno de los polos del carrete de inducción ó bobina de Ruhmkorff, provista de su interruptor de vibraciones rápidas. El cuerpo grave es un pequeño cilindro de plomo con su extremo inferior cónico, atravesado por un alambre de cobre aislado, fijo verticalmente á corta distancia del cilindro y provisto de un punzón de platino situado muy cerca del papel; este alambre comunica con el segundo polo de la bobina.

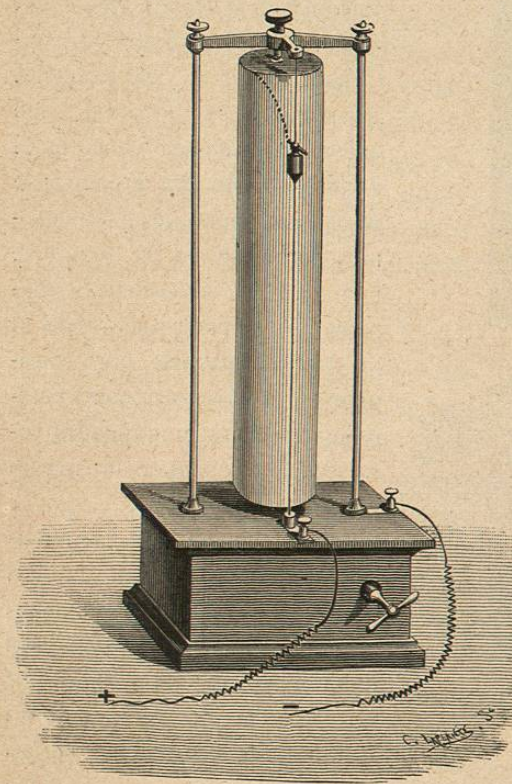


Fig. 34.—Indicador eléctrico para comprobar la ley de la caída de los cuerpos

„Supongamos que el cuerpo grave está en reposo y el interruptor funcionando; las chispas brotarán rápidamente entre el punzón y la superficie del cilindro, produciendo una serie de agujeritos en el papel, en una circunferencia horizontal. Abandonemos el cuerpo grave á sí mismo; caerá deslizándose ligeramente por el hilo vertical que le sirve de guía, y la serie de agujeritos formará en toda la altura recorrida una curva parabólica que resuelve el problema.”