

evidencia totalmente la igualdad de acción de la gravedad sobre toda clase de cuerpos, cualesquiera que sean su densidad ó peso, volumen ó forma, experimento que consiste en eliminar la causa de las desigualdades observadas, es decir, en observar en el vacío.

He aquí cómo se ejecuta este experimento en las cátedras de física.

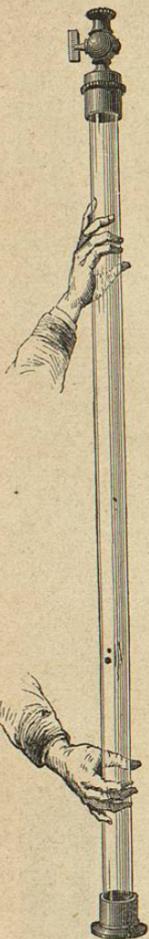


Fig. 24. — Demostración de la desigualdad de velocidad de los cuerpos que caen en el vacío

Cógese un largo tubo de cristal provisto en sus extremos de dos armaduras de cobre, una de las cuales lo cierra herméticamente, y la otra termina en una llave, merced á la cual se puede ajustar el tubo al platillo de una máquina llamada *máquina neumática*, propia para extraer de un receptáculo cualquiera el aire que contiene. Empiézase por introducir en el tubo cuerpos de diferentes densidades, como astillas de madera, pedacitos de metal, de pluma, papel, corcho, etc., manteniéndolos en uno de los extremos del instrumento. Si se vuelve bruscamente el tubo para darle una posición vertical, todos los cuerpecillos introducidos parten á la vez desde dicho extremo y caen por el interior en dirección del eje del cilindro (fig. 24). Pero si se vuelve el tubo antes de extraer el aire, se observa la desigualdad de velocidad que todos conocemos. Si se repite la prueba muchas veces, sacando progresivamente aire del tubo, se nota que esta desigualdad decrece con el enrarecimiento del medio en que se efectúa la caída. Cuando el vacío llega á ser todo lo completo posible, todos los cuerpos de distintas densidades caen á la vez en el extremo inferior del aparato.

Por consiguiente, la resistencia del medio ambiente es la causa de la desigualdad de rapidez en la caída de los cuerpos más ó menos pesados y más ó menos densos. Esta resistencia no tan sólo demora los movimientos, sino que también produce desviaciones en la dirección de la caída de los cuerpos ligeros. Una hoja de papel abandonada en el aire recorre una línea sinuosa, á menudo muy accidentada, antes de llegar al suelo. Tómese un disco de papel y una moneda de diámetro algo mayor; si se les deja caer separadamente desde la misma altura, la moneda llegará al suelo antes que el papel. Poniendo en seguida el disco de papel sobre la moneda, de modo que ésta sobresalga alrededor de aquél, y dejando caer ambos objetos bien horizontalmente, no se separan ya en su descenso, y los dos llegarán al suelo en el mismo instante, porque en este caso la resistencia del aire, vencida por la pieza metálica, no puede hacerse sentir en la cara inferior del disco de papel.

Si dos cuerpos tienen masas desiguales, pero la misma superficie en un sentido normal á la gravedad, la resistencia que deban vencer será la misma; mas como ésta se habrá de repartir entre mayor número de moléculas en el cuerpo más pesado, no podrá disminuir la velocidad común tanto como en el cuerpo más ligero, y por consiguiente éste invertirá más tiempo que el otro en caer desde la misma altura.

Por el contrario, tratándose de masas iguales, cuanto mayor sea la superficie presentada á la resistencia del aire, más se retrasará el movimiento de descenso; las hojas de cualquier substancia caerán mucho más despacio si se las abandona en toda su integridad que si se las comprime previamente, dándoles, por ejemplo, la forma de una bola. La

división en pequeños fragmentos produce un efecto análogo. Por este motivo se nota una gran diferencia entre la rapidez de la caída de una masa de agua congelada, solidificada y que caiga en una pieza, y la de la misma masa en estado líquido. En este último caso, la resistencia del aire, unida á la movilidad de las moléculas líquidas, da origen á la formación de una infinidad de gotitas finísimas y como pulverulentas. Si la altura de la caída es grande y la masa de agua no muy considerable, puede suceder que ésta no llegue al suelo sino á modo de niebla tenue. En los surtidores, cascadas, ó capas

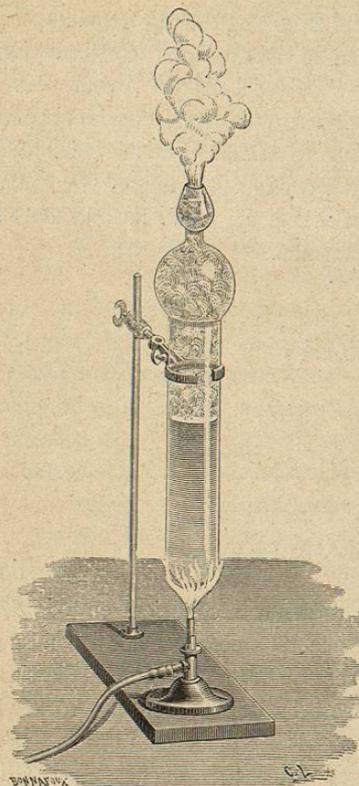


Fig. 25. — Experimento del martillo de agua. Preparación

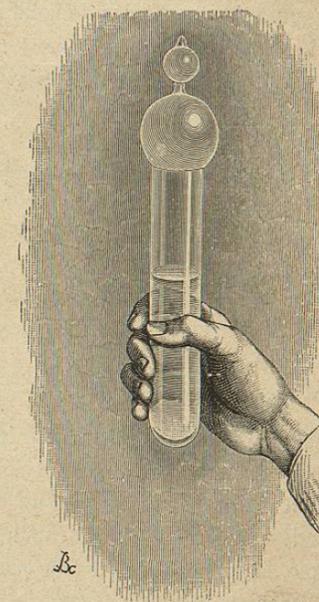


Fig. 26. — Experimento del martillo de agua. Realización

de agua naturales que caen desde gran altura se observa esta clase de fenómenos. Pero en el vacío, como la resistencia es nula, las masas líquidas caen de golpe. Para demostrarlo así, se hace uso de un tubo cilíndrico de vidrio aguzado por uno de sus extremos; se echa en él agua y se la somete á la ebullición (figs. 25 y 26). Al escaparse el vapor, arrastra consigo el aire fuera del tubo. Entonces se cierra éste á la lámpara, y se deja enfriar el líquido; tan luego como el vapor se ha condensado, queda encima del agua un espacio vacío de aire. Si en este momento se vuelve bruscamente el aparato de arriba abajo, la masa de agua cae sin dividirse, y da contra el fondo del tubo como si fuese una masa sólida: á causa del golpe seco que produce el choque se ha dado á este curioso experimento el nombre de prueba del *martillo de agua*. Tenemos, pues, averiguado un primer punto: que la resistencia del aire es la causa de la desigualdad que se observa en la duración del descenso de los cuerpos que caen desde la misma altura.

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.

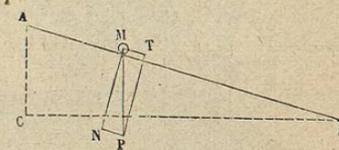


Fig. 27.—Plano inclinado. Movimiento de los graves