

En las erupciones volcánicas las fuerzas explosivas de los gases interiores suelen lanzar á la atmósfera cenizas, fragmentos de piedra y verdaderas rocas. Pero si estas masas se sustraen en la apariencia por algunos instantes á la acción de la gravedad, la lucha de las dos fuerzas no es de larga duración, y obedeciendo los proyectiles á la incontrastable ley de todos los cuerpos terrestres, vuelven á caer en la superficie de la Tierra.

Todos estos casos son tan conocidos, están tan al alcance de la observación de todo el mundo, que sería casi pueril recordarlos á no ser por el interés que ofrecen relativamente á la física terrestre ó á la historia de nuestro planeta. Y en efecto, ¿no es curioso presenciar, siquiera mentalmente, el espectáculo de los cambios que casi de continuo ocurren en la estructura exterior del planeta por efecto de la acción de las fuerzas opuestas, de las que sólo hemos hecho una imperfecta enumeración? La influencia de los agentes meteóricos destruye poco á poco la obra de las reacciones producidas seguramente por el calor interno, es decir, el levantamiento de los relieves continentales, de las cadenas de montañas y de los conos volcánicos. Los fragmentos de este relieve se dislocan, se desmoronan lentamente, de siglo en siglo, y semejante dislocación en que, según hemos visto, interviene de un modo activo la gravedad terrestre, se acrecienta además por la acción de la gravedad de la Luna y del Sol, la cual produce los fenómenos periódicos de las mareas. Día llegará quizás, en que la ciencia haya hecho tales progresos, que se podrá leer á la vez en el pasado del planeta y adivinar algunas de sus futuras transformaciones.

Mientras tanto no debemos considerar tales hipótesis sino como simples conjeturas, cuyo grado de probabilidad estará en relación con la suma de los hechos positivos y de las leyes establecidas que les servirán de base. Por lo que respecta á los hechos y á las leyes de la gravedad, puede asegurarse que no queda mucho que desear en punto á precisión y á demostración práctica ó teórica, como procuraremos exponerlo con toda claridad en los capítulos siguientes.

equilibrio que se habría establecido poco á poco siguiendo las leyes de la estática de los cuerpos sólidos ó líquidos? ¿Las fuerzas internas de que hablamos lograron vencer la gravedad terrestre mediante una acción brusca ó en virtud de levantamientos pausados y progresivos? En todo caso, aquélla recobra poco á poco su preponderancia y reconquista su imperio. Aprovechase de todo cuanto desprenden de las rocas los agentes atmosféricos, el calor solar y la humedad; de la disgregación incesante que es su consecuencia, para acarrear esos residuos por mil arroyuelos desde las cumbres de las montañas á los ríos de segundo orden, luego á los de primero, y por último al mar. De este modo destruye la gravedad poco á poco cuanto las fuerzas opuestas habían sustraído á su acción, y con el tiempo borra esos relieves. Por otra parte, el empuje continuo de las mareas conmueve las peñas de las costas y las socava poco á poco, siendo también la gravedad, aunque por distinta manera, la que contribuye á devolver á la Tierra su nivel primitivo. Acumulando los millones de años en que esto viene sucediendo, se podría calcular la época en que quedará terminada semejante obra de nivelación, suponiendo sin embargo que las fuerzas enemigas ó internas no contrabalanceen la gravedad y levanten otras islas en el seno del Océano, formando así nuevos continentes y nuevas cordilleras.

## CAPÍTULO III

## LEYES DE LA GRAVEDAD. — CAIDA DE LOS CUERPOS

## I

## LA PLOMADA. — LA VERTICAL

Un hilo fino y flexible, sujeto á un punto fijo por su extremidad superior, y del que pende una masa bastante pesada para tenerlo tirante, se mantiene en equilibrio después de oscilar un poco: este hilo es la *plomada*, de uso tan general en las artes y oficios.

Si el aire ambiente está tranquilo, si no influye en la plomada más fuerza que la gravedad, su dirección marca la de la gravedad misma, destruida por la resistencia del hilo.

Nadie ignora que esta dirección, en un lugar cualquiera de la superficie del globo, es lo que se llama la *vertical* del lugar. Supongamos que se corta el hilo; en este caso el cuerpo suspendido caerá siguiendo la prolongación de la vertical.

Supongamos ahora que la plomada está suspendida sobre una superficie líquida en reposo, por ejemplo, sobre un baño de mercurio, en el cual se refleja la imagen de aquélla; en virtud de un experimento muy sencillo, hecho con otra plomada que el observador tiene en la mano, se demuestra que las dos líneas formadas por la plomada misma y por su imagen reflejada están en la prolongación una de otra, sea cualquiera la dirección en que se efectúe la visual (fig. 18). Resulta de aquí y de las leyes de la reflexión de la luz que la dirección de la plomada es perpendicular ó normal á la superficie del líquido. Por lo demás este resultado es, como se verá más adelante, una consecuencia de las condiciones de equilibrio de una masa líquida sometida á la sola acción de la gravedad.

Unos resultados de observación tan sencillos, tan fáciles de verificar, han debido ser conocidos en todo tiempo, como en efecto lo han sido, y así lo demuestran las aplicaciones que se les ha dado en las artes de construcción desde la más remota anti-

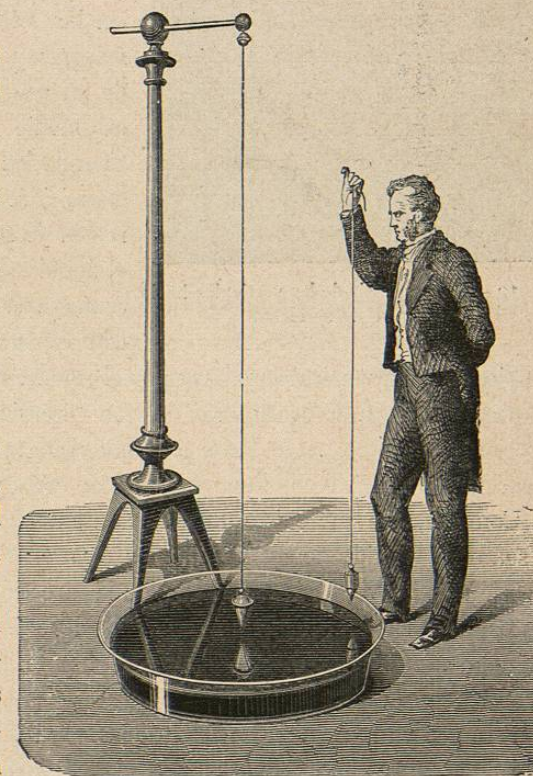


Fig. 18.—Dirección de la plomada perpendicular á la superficie de un líquido tranquilo

güedad. La dirección constante de la vertical en un sitio dado, perpendicular ó normal al plano del horizonte de este sitio, los puntos opuestos del cielo por donde pasan las prolongaciones de esta vertical, llamados zenit el de arriba y nadir el de abajo, son nociones y términos tan conocidos que es inútil que nos detengamos á explicarlos.

Lo que no se sabe tanto, lo que se ignoraba en las épocas en que no se tenía idea de la forma esférica, ó mejor dicho, esferoidal de la Tierra, es que las verticales de diferentes lugares no son paralelas, sino que forman entre sí ángulos tanto mayores cuanto mayor es la distancia que media entre dichos lugares (fig. 19). Cuando las distancias son cortas, es difícil de comprobar esta falta de paralelismo. Dos verticales cuyas bases estén separadas 31 metros en sentido horizontal no forman más que un ángulo de un segundo ( $1''$ ); siendo menester que los instrumentos de medición sean de una precisión extraordinaria para poder determinar una distancia tan insignificante. Pero á 1.860 metros de distancia las verticales forman ya un ángulo de *un minuto*; y finalmente, para que este ángulo sea de un grado es preciso que entre vertical y vertical medie una separación de 111 kilómetros.

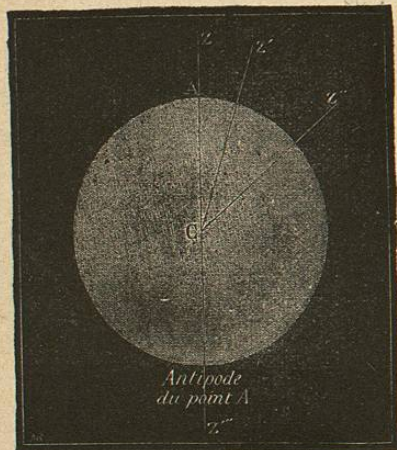


Fig. 19.—Convergencia de las verticales hacia el centro de la Tierra

Cuando los dos puntos están en un mismo meridiano ó sea á igual longitud geográfica, la diferencia de sus latitudes ó su suma (1) es la que da el ángulo de las verticales, y entonces el cálculo es muy sencillo; pero si ocupan diferente longitud, este cálculo es ya más complicado. Presentemos

dos ejemplos: la vertical que pasa por el remate de la linterna del Panteón y la que va á parar á la flecha de la catedral de San Dionisio forman ya el ángulo, pequeño, pero apreciable, de  $5' 25''$ . De París á Dunkerque resultan  $2^\circ 12''$  como separación de las direcciones de la gravedad en cada uno de estos puntos.

Compréndese que existe una relación entre las dimensiones y la forma de la Tierra, ya sea en el sentido de sus meridianos, ó ya en el de sus paralelos, y las variaciones de dirección de las verticales, es decir, de la dirección de la gravedad en cada uno de los puntos de su superficie. En virtud de una aproximación bastante rudimentaria se supuso antiguamente á la Tierra esférica; en tal hipótesis, todas las verticales convergían hacia el centro de la esfera.

Esta era ya la opinión de Aristóteles, para quien el centro de la Tierra era el centro del Mundo; así es que definía la gravedad diciendo que consistía en la propensión que tienen los cuerpos graves á reunirse en el centro (2). Las mediciones de los geodestas modernos han modificado poco á poco este modo de ver. Hase reconocido primeramente el aplanamiento de la esferoide terrestre en sus dos polos de rotación, y asimilado

(1) Según que los dos lugares estén al Norte ó bien al Sur del ecuador, ó el uno en el hemisferio boreal y el otro en el austral.

(2) "Los cuerpos graves se dirigen al centro de la Tierra, pero indirectamente, y sólo porque ésta tiene su centro en el centro del Mundo. La prueba de que los cuerpos graves se dirigen al centro de la Tierra está en que los que caen en su superficie *no siguen líneas paralelas*, sino que descienden describiendo ángulos iguales. Por consiguiente, estos cuerpos van á parar á un centro único, que es asimismo el centro de la Tierra. (ARISTÓTELES, *De Celo*.)

sus meridianos á elipses iguales, y su ecuador y los paralelos á círculos (1). Después, mediante un estudio más riguroso, que dista mucho de estar terminado, se han descubierto anomalías é irregularidades de forma, ya en los meridianos ó bien en los paralelos. Más adelante veremos que la vertical sufre desviaciones locales cerca de las montañas y de las grandes moles continentales, desviaciones que se ha podido medir y cuya causa

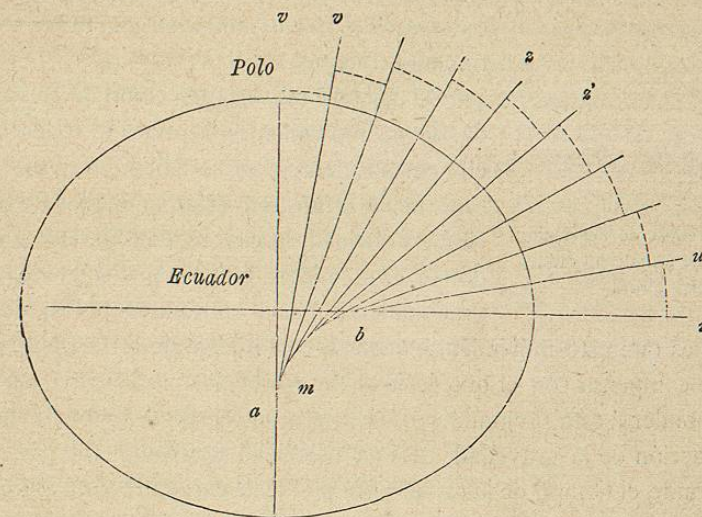


Fig. 20.—Puntos de convergencia de las verticales en la hipótesis de la forma elipsoidal de la Tierra

es la acción atractiva de esas masas. La misma causa afecta naturalmente en los mismos sitios el nivel de los mares, de los lagos y de todas las masas líquidas tranquilas.

De todo lo cual resulta que las direcciones de la gravedad no convergen en realidad hacia el mismo punto del interior del globo.

## II

### VERDADERA DIRECCIÓN DE LA CAÍDA DE LOS CUERPOS

Los cuerpos pesados abandonados á sí mismos ¿caen en realidad siguiendo la vertical que marca la plomada?

Sí, cuando caen desde poca altura, y si el aire está sereno. Nadie ignora cuán raro es que las gotas de lluvia ó el granizo caigan verticalmente, lo cual consiste, en primer lugar, en que las nubes de donde emanan esas gotas ó granizos están las más veces impelidas por el viento, por lo cual la dirección seguida en la caída es una resultante de la dirección y de la velocidad de la nube, por una parte, y de la de la gravedad ó de la

(1) Consideremos la Tierra como una elipsoide de revolución aplanada en los polos. En este caso las normales á la elipse meridiana ó las verticales sucesivas convergen en puntos situados en una curva debajo del ecuador. Las verticales consecutivas *uu* al ecuador convergen en un punto *b* del eje mayor; en el polo las verticales *vv'* convergen en *a*, más allá del centro en el eje menor; por último, las verticales intermedias entre el ecuador y el polo, como *zz'*, convergen en puntos tales como *m*; el conjunto de estos puntos de convergencia es la curva que acabamos de indicar. La superficie engendrada por dicha curva marcará en esta hipótesis el conjunto de los puntos de encuentro de las verticales de todo el globo (fig. 20). Pero tampoco es este su lugar verdadero, porque habría que tener en cuenta las desviaciones ocasionadas por la irregularidad de forma de la esferoide y por otras causas locales.

vertical, por otra. Sucede también que aun cuando esos cuerpos tan ligeros partan verticalmente, sin velocidad inicial, encuentran en su caída corrientes de aire que los desvían, y por consiguiente caen con mayor ó menor oblicuidad en la superficie del suelo.

¿Qué se requiere para que la dirección de la caída sea la de la vertical? Que no intervenga más fuerza que la de la gravedad; que el cuerpo, abandonando el estado de reposo y entregado á sí mismo sin impulso alguno, caiga en el vacío ó por lo menos en una masa de aire perfectamente tranquila.

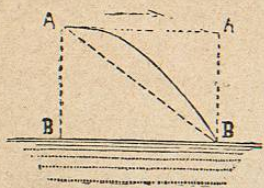


Fig. 21.—Carencia de desviación en la caída de un cuerpo desde escasa altura

ellos. ¿Cómo es que este movimiento, cuya dirección es la de la tangente al círculo de latitud, no se compensa con el que le imprime verticalmente la gravedad?

Para responder á esta pregunta, consideremos un cuerpo A animado, antes de abandonarle á la acción de la gravedad, de una velocidad horizontal tal, que recorre la línea A A' durante el tiempo de la caída. Si el pie de la vertical B está animado de igual velocidad, es evidente que irá á parar á B' al cabo del mismo tiempo, es decir, al pie de la vertical del punto A'. En realidad, el cuerpo habrá seguido en el espacio la diagonal, ó más rigurosamente hablando, la porción de parábola A B', pero no habrá lugar á deducir ninguna desviación (fig. 21). Esto es lo que se observa cuando se hace el experimento desde el tope del palo de un buque en marcha; si se deja caer desde él una bala de plomo, ésta caerá al pie del mástil, como si el buque estuviese parado. En el breve instante de la caída, la punta y la base del mástil habrán recorrido líneas sensiblemente iguales.

Hay sin embargo una desviación oriental, indicada por la teoría, pero que es harto insignificante para que se la pueda apreciar cuando el cuerpo cae desde escasa altura, aparte de que las agitaciones del aire harían difícil su comprobación. En efecto, el raciocinio precedente supone que el pie B de la vertical está animado de la misma velocidad que el punto A situado en su cima (fig. 22). Pero no es así. El punto A describe en un segundo, por ejemplo, un arco A A' mayor que el arco B B'

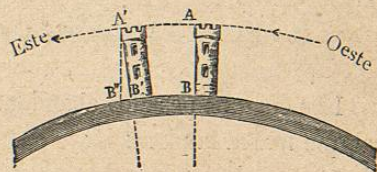


Fig. 22.—Desviación oriental en la caída de un cuerpo

descrito por el pie B de la vertical, aun cuando estos arcos medidos angularmente den el mismo número de segundos, porque el radio de la circunferencia que describe el primero alrededor del eje de la Tierra (fig. 23) es A a, mayor que B b, radio del círculo descrito por el segundo. Desde entonces el cuerpo, abandonado á sí mismo, conservará mientras dure su caída su velocidad de impulso primitiva; caerá, pues, en B' (fig. 22), al oriente de la vertical de su punto de partida y en una cantidad igual á la diferencia de longitud de los dos arcos en cuestión.

Esta desviación debe ser máxima en el ecuador respecto á las caídas desde igual altura, y va disminuyendo á medida que crece la latitud, para ser enteramente nula en los polos, donde el movimiento de rotación lo es asimismo. Hemos dicho que era muy

difícil comprobar prácticamente este hecho en la atmósfera exterior á causa de las agitaciones del aire, y también porque las alturas de caída vertical son demasiado pequeñas. No sucede lo propio en los pozos de mina. Reich pudo medir una desviación de 28 milímetros en una mina de Freiberg (Sajonia) que tenía 158<sup>m</sup>,5 de profundidad. En el ecuador, la desviación teórica debe ser de 33 milímetros para 100 metros de altura.

Por lo demás, esta no es la única causa de desviación. El movimiento de rotación de la Tierra indica otro en dirección Sur, el cual procede de la diferencia entre la fuerza centrífuga del extremo superior y del inferior de la vertical. Siendo el radio A a mayor que el radio B b (fig. 23), el cuerpo A tiene en su punto de partida una tendencia á escaparse hacia el lado opuesto, no de la dirección de la gravedad, sino de la del radio A a; esta fuerza supera á la fuerza centrífuga del punto B; por consiguiente, conservando el cuerpo al llegar al suelo este exceso de velocidad, caerá al Sur del pie de la vertical, ó hablando con más exactitud, habiendo sufrido dos desviaciones, una oriental y otra meridional, caerá en realidad al Sudeste de dicho pie.

A Newton le corresponde el honor de haber sugerido el primero de estos experimentos; de este modo quiso comprobar directamente el movimiento de rotación de la Tierra. Al realizarlo Hooke siguiendo su dictamen, hizo observar que la desviación debía efectuarse al Sudeste; pero Biot pone en duda que haya querido referirse á una desviación completa contada á partir del pie de la vertical, "porque en este caso, dice, según las fórmulas de Laplace, la desviación al Sur es de segundo orden relativamente á la absoluta; y en las observaciones de Hooke debía ser de difícil comprobación una separación tan débil, por cuanto hizo sus experimentos al aire libre."

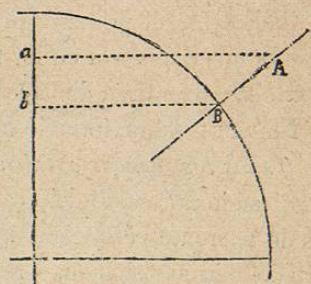


Fig. 23.—Desviación meridional en la caída de los cuerpos

En resumen, si, como lo prueban las medidas de las dimensiones y de la forma del globo terráqueo, es cierto que las verticales de diferentes lugares convergen, cuando no á un mismo punto interior, al menos hacia una región limitada próxima al centro, resulta que tal es en efecto la dirección general de la gravedad. Pero, por lo que hace á la línea descrita por un cuerpo pesado abandonado á sí mismo, debemos decir que no es rigurosamente la vertical, pues ocurren desviaciones procedentes, así de causas accidentales, entre otras la resistencia del aire, como de causas permanentes, por ejemplo, la velocidad de rotación terrestre y la fuerza centrífuga. Más adelante veremos cuál es la forma verdadera de la trayectoria, cuando se tienen en cuenta estas dos últimas causas de desviación.

### III

#### CAÍDA DE LOS CUERPOS. — LEY DE LA IGUALDAD DE VELOCIDAD DE LOS CUERPOS QUE CAEN DESDE UNA MISMA ALTURA

Los antiguos, y aun los modernos hasta la época de Galileo, tenían ideas muy confusas acerca de las leyes de la velocidad de los cuerpos graves en su descenso. La falta de observaciones precisas y de experimentos bien hechos, es decir, efectuados en condiciones capaces de eliminar todas las causas perturbadoras, explica suficientemente la incertidumbre de los conocimientos que á la sazón se tenían respecto de este punto.

Hay que distinguir dos cuestiones diferentes en lo que tiene relación con la velocidad de los cuerpos que caen. Primeramente, ¿caen todos los cuerpos, cualesquiera que sean sus volúmenes y masas, con velocidad igual ó común al abandonarlos á sí mismos desde igual altura? En segundo lugar, ¿es constante la velocidad de descenso mientras dura el fenómeno?, ó por el contrario se acelera, y en este caso, ¿cuál es la ley de la aceleración?

Los antiguos creían que cuanto más pesado es un cuerpo, mayor es la velocidad de su caída en igualdad de circunstancias. Tal era la opinión generalmente adoptada respecto de la primera cuestión. Por otra parte, habían comprobado la aceleración de la velocidad de descenso, pero sin llegar á medirla ni á descubrir su ley. Acerca de este punto hemos recordado las ideas de Aristóteles y de Lucrecio, opiniones que no podían adquirir la precisión ó rectificación necesarias sino mediante los procedimientos rigurosos del método experimental.

Galileo fué el primero que hizo experimentos propios para demostrar que, si se observa una diferencia en los tiempos de descenso de los cuerpos que caen desde igual altura, esta diferencia dimana únicamente de la resistencia del aire.

En una palabra, formuló la siguiente ley:

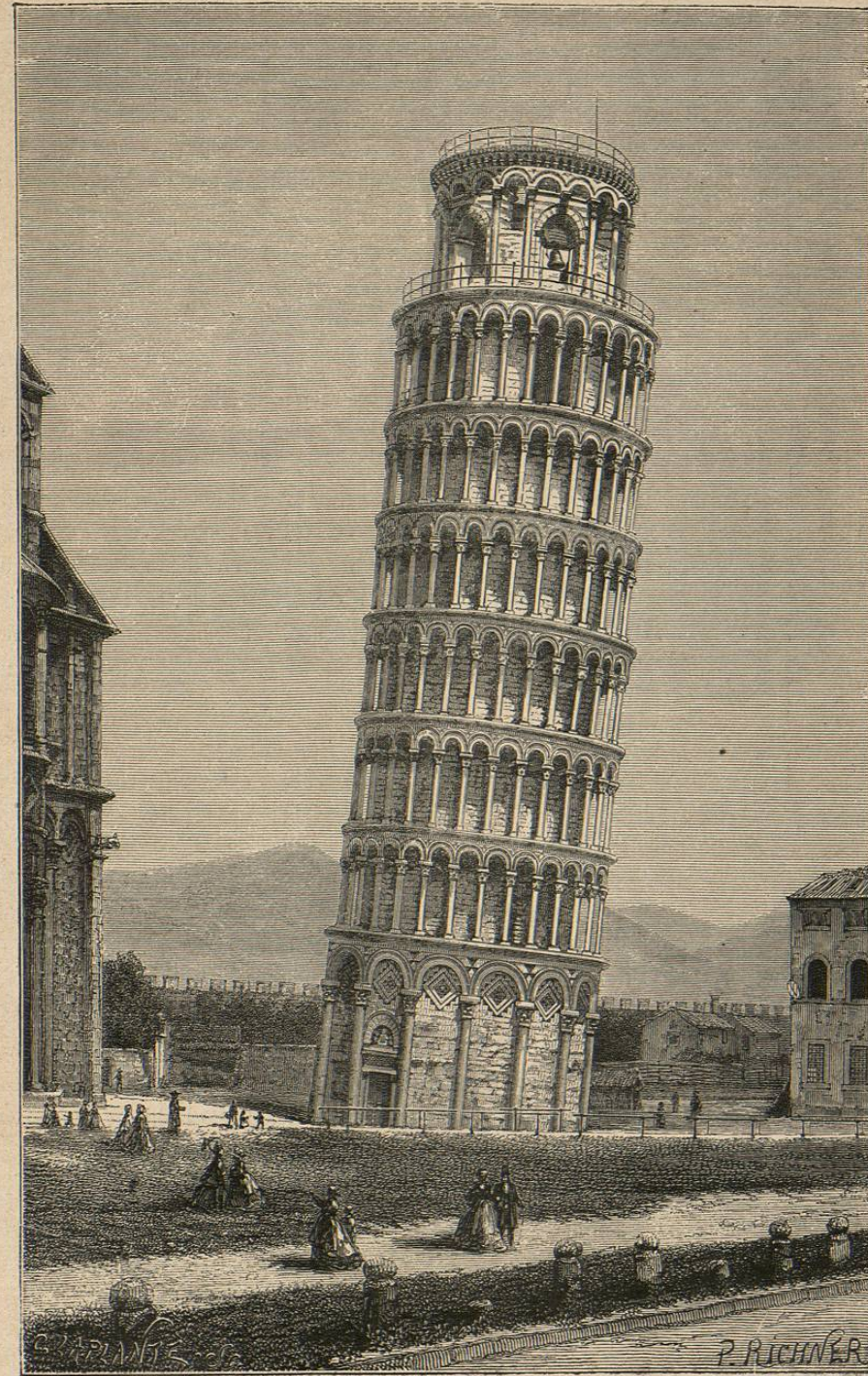
*Todos los cuerpos caen en el vacío con igual velocidad desde la misma altura.*

El sabio florentino dejó caer desde lo alto de la torre inclinada de Pisa varios cuerpos de diferente peso, como bolitas de oro, de plomo, de cobre, de mármol y de cera, pero del mismo volumen, y reconoció que todos ellos llegaban sensiblemente al suelo en el mismo instante; únicamente la bola de cera, como más ligera, experimentó un retraso marcado; pero la diferencia era insignificante, y nada en relación con la que mediaba entre el peso de esta bola y el de las demás. De ello dedujo que las ideas de Aristóteles eran falsas (1). La velocidad de los cuerpos que caen bajo la acción de la gravedad no es proporcional á sus masas ó á sus pesos. Galileo consideró las desigualdades (que cualquiera puede observar) como originadas únicamente por la resistencia del aire, la cual depende sin duda alguna de la forma y del volumen del cuerpo, siempre y cuando se trate de masas iguales. Los experimentos comparativos que efectuó en el aire y en el agua le confirmaron en esta opinión, de todo lo cual dedujo que la resistencia de los medios ambientes estaba notoriamente en relación con sus densidades respectivas.

Los experimentos hechos por Galileo en Pisa los repitió Mariotte más adelante en Francia y luego en Inglaterra, en presencia de testigos ilustres, como Newton, Halley y Derham, habiéndolos reproducido también Desaguliers, físico francés á quien la revocación del edicto de Nantes había obligado á expatriarse. Los cuerpos que este sabio dejó caer de lo alto de la cúpula de San Pablo, de Londres, eran esferas de masas y volúmenes diferentes, desde esferillas de plomo, de dos pulgadas de diámetro, hasta vejigas secas y hinchadas de aire, de cinco pulgadas. La resistencia del aire á la caída de los cuerpos fué tanto mayor cuanto más volumen y menos masa tenían, pues al paso que la esfera de plomo invirtió cuatro segundos y medio en recorrer la altura total de 272 pies, las vejigas llenas de aire necesitaron 18 segundos y medio.

Más adelante hablaremos de los experimentos que Newton hizo con objeto de demostrar con el péndulo la misma ley. Él ideó el experimento directo y decisivo que

(1) Y se atrevió á decirlo públicamente. Semajante audacia concitó en contra suya á los doctores de la universidad de Pisa, cuya hostilidad fué tal que Galileo tuvo que ausentarse de la ciudad. Tal era la libertad de la ciencia trescientos años atrás.



TORRE INCLINADA DE PISA