

La compresibilidad del aire, que siempre es algo mayor de lo que exigiría la ley de Mariotte, va en progresivo aumento con la presión. El ázoe ó nitrógeno se halla en el mismo caso que el aire, si bien es menos perceptible el aumento de la compresibilidad con la presión. El ácido carbónico se separa más aún de la citada ley.

Por lo que hace al hidrógeno se aparta también de ella, pero en sentido contrario, y además la compresibilidad disminuye en lugar de crecer con la presión.

Por consiguiente, se debe considerar la ley de Mariotte como una aproximación, no como ley rigurosa, si bien en la práctica puede pasar por verdadera, y aplicarla siempre que no se trate de casos especiales en que las perturbaciones fuesen bruscamente considerables.

adaptados, con el depósito H que contiene mercurio. Sobre este depósito hay una bomba aspirante é impenetrable con una llave R merced á la cual se puede interceptar como se quiera la comunicación con los tubos. V es el recipiente para almacenar el gas seco; P una bomba de compresión que sirve para dar al gas el grado de presión deseado. La rama menor B del manómetro comunica con V, y una llave intercepta esta comunicación cuando se ha introducido el gas y rechazado el mercurio hasta la parte inferior del tubo.

Fácil es ahora comprender cómo funciona el aparato. Una vez comprimido el gas seco en V, se abren las llaves, el gas penetra en el tubo B y repele el mercurio, de modo que llena el tubo. La diferencia de nivel en B y en la columna A (que tiene 30 metros de altura) marca la presión del gas correspondiente á este volumen. Luego se cierra la llave *r* y se maneja la bomba *p* que empuja el mercurio y comprime el gas. Cuando éste queda reducido á la mitad de su volumen, se anota de nuevo la diferencia de nivel del mercurio en B y en A, y se tiene la presión del gas así comprimido.

LIBRO SEGUNDO.—LA GRAVITACIÓN

CAPÍTULO PRIMERO

LA GRAVEDAD EN LA SUPERFICIE Y EN EL INTERIOR DEL GLOBO TERRÁQUEO

I

¿ES LA GRAVEDAD UNA FUERZA CONSTANTE?

La experiencia ha demostrado, según queda probado en los anteriores capítulos, que la gravedad obra del mismo modo en cualquier masa, sin que influya en ello la naturaleza física ó química de la substancia de que ésta se componga ni la pequeñez de las partículas sometidas á su influencia. Así pues, se debe considerar la acción que ejerce en todo cuerpo como la resultante, como la suma de sus acciones elementales en todas las moléculas de que el cuerpo está formado.

Esta resultante es lo que constituye el *peso* del cuerpo.

Por otra parte, al estudiar los físicos las leyes de la caída de los graves en el vacío, han consignado que á dichas leyes obedece todo movimiento uniformemente acelerado, es decir, todo movimiento producido por la acción de una *fuerza constante*.

Así pues, la gravedad es una *fuerza constante*, es decir, que mientras dura, obra de un modo igual, uniforme. Esta misma continuidad explica, en virtud de la suma incesante de los esfuerzos elementales, el aumento de la velocidad en proporción de los tiempos, y el de los espacios recorridos en proporción de los cuadrados de los tiempos. La teoría demuestra la necesidad de estas leyes, y la práctica las ha confirmado con toda la precisión que permiten los procedimientos del método experimental.

Con todo, importa no equivocarse sobre lo que debe entenderse por la constancia de la fuerza llamada gravedad. Admítase también (y es un principio adoptado en física lo mismo que en química) la invariabilidad del peso de una cantidad dada de materia, de un cuerpo determinado cualquiera.

En rigor, ni la intensidad de la gravedad es constante, ni el peso de un cuerpo invariable, á menos de considerar la gravedad y su acción sobre el cuerpo, en un mismo punto determinado del globo terráqueo. Lo realmente invariable es la masa, que algunas veces se define diciendo que es la cantidad de materia (1); réstanos hacer ver que no sucede lo propio con la intensidad de la gravedad, y tampoco por consiguiente con el peso, que es una función de esta intensidad.

(1) Una proposición formulada en mecánica del modo siguiente precisa con mayor claridad la idea de lo que es una masa: "Dos cuerpos de cualquier especie tienen la *misma masa* cuando dos ó más fuerzas iguales producen movimientos idénticos en dichos cuerpos libres y partiendo del estado de reposo."

Consideremos un cuerpo cuya masa sea tal que en París, á los 48° 50' de latitud y á una altura dada sobre el nivel del mar, tenga, pesada en el vacío á 4° centígrados de temperatura, un kilogramo de peso. Tal sería, por ejemplo, un decímetro cúbico de agua destilada, á cero de altitud; pero tomemos una substancia cualquiera, un trozo de platino que tenga la misma masa y por consiguiente el mismo peso en tales condiciones, y cambiémoslo de lugar. Si lo acercamos al polo, es decir, si la latitud del lugar crece, el peso de la masa invariable de que se trata crecerá también; el mismo cambio ocurrirá si, dejándolo á la misma latitud, se le bajara á un punto inferior al nivel del mar ó á mayor profundidad en el interior del suelo. Al contrario, el peso de la masa de platino en cuestión disminuiría gradualmente si la transportásemos desde París á un punto más cercano del ecuador, ó si, sin cambiar de latitud, pudiéramos elevarla en la atmósfera á altitudes cada vez mayores.

Para que semejantes variaciones sean posibles, y muy luego veremos cómo se pueden comprobar prácticamente, es absolutamente preciso que, no habiendo cambiado la

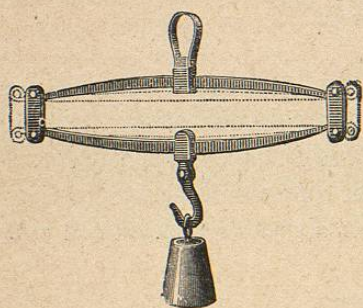


Fig. 100.—Dinamómetro

masa y subsistiendo idénticas y en igual número las moléculas del cuerpo, es preciso, decimos, que la fuerza aplicada á cada una de ellas, ó sea la gravedad, varíe de intensidad cuando la latitud ó la altitud varían. Esta consecuencia inevitable es en alto grado interesante para la física del globo: veamos, pues, cómo se llega á establecerla de hecho.

Desde luego se comprenderá que con una balanza no será posible comprobar las variaciones de intensidad de la gravedad, por cuanto todo cambio en más ó en menos que afectara al cuerpo pesado afectaría también del mismo modo á las pesas que lo

equilibran. Este inconveniente desaparece si para medir la intensidad de la gravedad se hace uso de los instrumentos de muelles conocidos con el nombre de dinamómetros (figura 100). Transportando á altitudes y latitudes diferentes un aparato de este género, del cual se suspendiera una masa invariable, su aguja debería indicar variaciones correspondientes á las de la intensidad de la gravedad. Pero en la práctica es todavía insuficiente este medio, porque, según veremos más adelante, la sensibilidad de un dinamómetro no es bastante para marcar los imperceptibles cambios en cuestión.

Lo contrario sucede si en vez de medir la fuerza por sus efectos estáticos, tomamos como términos de comparación los dinámicos, es decir, los movimientos que imprime á los cuerpos sometidos á su acción. Por esto se mide la intensidad de la gravedad mediante la rapidez que hace adquirir, al cabo de un segundo de caída, á un cuerpo que cae en el vacío. Esta velocidad es precisamente igual al doble del espacio recorrido por el móvil en el mismo tiempo. Acostúmbrase representar esta cantidad por la letra g . Para averiguar su valor podría hacerse uso de cualquiera de las máquinas por medio de las cuales demuestran los físicos, según hemos visto, las leyes de la gravedad: sólo que, por lo que respecta á la máquina de Atwood, habría que multiplicar la velocidad ó el espacio recorrido por la relación $\frac{p+2m}{p}$, siendo p el peso adicional que pone la máquina

en movimiento y $2m$ el de las dos masas iguales sostenidas por el hilo que se enrolla en la polea. Se debería además tener en cuenta la resistencia del aire y los roces de toda clase que resultan en las piezas de estas máquinas. Todas estas causas de inexac-

titud reunidas hacen también incómodo y defectuoso, si no absolutamente impracticable, este modo de experimentación.

Por fortuna, la observación del péndulo obvia todas estas dificultades de la manera más sencilla.

II

VARIACIONES DE LA GRAVEDAD SEGÚN LA LATITUD

En efecto, gracias al péndulo se han reconocido por vez primera las variaciones que presenta la intensidad de la gravedad en los diferentes puntos de la superficie del globo terráqueo. La Academia de Ciencias envió en 1672 á Cayena al astrónomo francés Richer con objeto de que hiciese algunas observaciones. El primer cuidado de aquel sabio fué observar el péndulo invariable que había llevado para medir el tiempo en sus observaciones; mas al llegar á Cayena advirtió con gran sorpresa que atrasaba dos minutos y medio diarios. Para remediar este retraso, Richer tuvo que acortar el péndulo una línea y cuarto. De regreso á Francia, ocurrió el fenómeno contrario, y el astrónomo tuvo que devolver al péndulo su longitud primitiva.

Este hecho de observación, que asombró á los sabios del mismo modo que había sorprendido á Richer, se comprobó también en otras circunstancias. Faltaba descubrir su causa, y á Newton le cupo este honor.

En su inmortal obra titulada los *Principios*, que vió la luz en 1687, quince años después de la observación de Richer, Newton estudia la importante cuestión de la figura del globo terráqueo, y viene á parar á la conclusión, que no fué adoptada sino después de prolijas controversias, de que la Tierra debe de tener la forma de una elipsoide aplanada en los dos polos, ó hinchada en el ecuador. La fluidez primitiva de la masa que ha constituido el globo, unida á la acción de la fuerza centrífuga desarrollada por el movimiento de rotación, son las causas del achatamiento cuya necesidad demostró Newton, causas comprobadas positivamente por las mediciones geodésicas y cuyo valor se ha reconocido hoy como un poco mayor de $\frac{1}{300}$.

Partiendo de estos hechos, es fácil darse cuenta de las variaciones que debe experimentar la intensidad de la gravedad cuando se cambia de lugar en latitud, siguiendo un mismo meridiano.

Empecemos desde luego por distinguir entre la fuerza atractiva de la Tierra, la que ejerce la masa entera del globo en cada punto de la superficie, y la gravedad, que es la fuerza real, en virtud de la cual todo cuerpo propende á caer en dirección de la vertical ó á pesar sobre su punto de apoyo. Nosotros observaremos únicamente los efectos de esta última.

Newton ha demostrado que la atracción obra sobre una molécula cualquiera tomada en la superficie del globo como si toda la masa de la Tierra estuviera reunida en su centro: no varía de un punto á otro de la superficie sino en razón de la mayor ó menor distancia á que estos puntos se hallan del centro; luego la forma de la Tierra es la de una elipsoide, aplanada en los polos de rotación.

Todo meridiano es por consiguiente una elipse cuyo eje menor es el diámetro terrestre que va de polo á polo, resultando de aquí que los diferentes puntos de dicho meridiano están tanto más apartados del centro de la elipsoide cuanto menor es su latitud; y como la atracción de todo el globo terrestre, obrando cual si la masa entera es-

tuviera reunida en su centro, disminuye proporcionalmente al cuadrado de las distancias al centro atrayente, síguese de aquí con toda evidencia que la intensidad de la gravedad debe ir en disminución desde el polo al ecuador.

A esta razón primera se agrega otra. La gravedad, tal cual podemos medirla, ya sea por los pesos de los cuerpos, ó más bien por la velocidad de su caída en el vacío, no es una fuerza simple, no es la fuerza de atracción, de gravitación de que acabamos de hablar; no habría identidad entre estas fuerzas sino en el caso de que la Tierra no tuviese movimiento de rotación. En realidad la gravedad es una fuerza compuesta; es la resultante de la gravitación, por una parte, y de la fuerza centrífuga, por otra. Si la fuerza centrífuga fuese en todas partes la misma, la gravedad no crecería del ecuador al polo sino según las variaciones de distancia debidas á la forma elíptica del meridiano; sería la atracción disminuída en una cantidad constante. Pero no sucede así; sábese que para una misma velocidad angular, la fuerza centrífuga desarrollada por un movimiento de rotación crece con la longitud del radio del círculo descrito, ó sea de la distancia MA (figura 101) del punto al eje de rotación. La fuerza centrífuga llega á su máximum en el

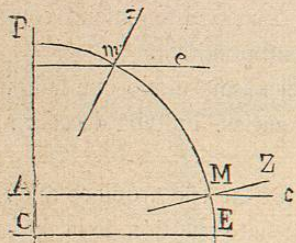


Fig. 101.—Dirección e intensidad de la fuerza centrífuga del ecuador á los polos

ecuador y va en disminución á medida que la latitud aumenta hasta los polos, en donde, siendo nula la velocidad de rotación, esta fuerza es nula asimismo.

Si á esto se agrega que la dirección de dicha fuerza es precisamente opuesta á la de la atracción en el ecuador, y que obra más y más oblicuamente á medida que la distancia á éste es mayor, se comprenderá que por ambos motivos la disminución de intensidad que experimenta la gravedad debe ser tanto más considerable cuanto menor sea la latitud.

Veamos ahora cómo se ha podido comprobar, merced á las observaciones del péndulo, la exactitud de estas previsiones de la teoría, y hasta qué punto ha sido posible semejante comprobación.

Entre la longitud de oscilación de un péndulo, la duración de una oscilación isócrona y la intensidad de la gravedad en el punto en que se hace la observación, existe una relación ó fórmula muy sencilla que, cuando se conocen los dos primeros datos, permite calcular fácilmente el tercero, es decir, la intensidad de la gravedad. Tómese un péndulo de longitud invariable, como el péndulo reversible de Káter, del que hemos hablado en el capítulo V; entonces la intensidad de la gravedad en las diferentes estaciones de la superficie del globo en que se observe este péndulo será proporcional á los cuadrados de los números de oscilaciones contadas en el mismo espacio de tiempo, por ejemplo en el transcurso de un día solar medio. De aquí resulta un primer método que han puesto efectivamente en práctica varios físicos.

Hay otro método que consiste en hacer oscilar un péndulo, contando cuidadosamente el número de sus oscilaciones así como su longitud en el momento del experimento y deduciendo luego por el cálculo la longitud del péndulo simple que marcase los segundos en la misma estación. Las longitudes comparadas del péndulo de segundos en distintos lugares permiten entonces calcular las relaciones que existen entre las intensidades de la gravedad en los mismos lugares.

Citémos algunos ejemplos del primer método: "Se ha visto, dice sir J. Herschel en sus *Outlines of Astronomy*, que un péndulo de cierta forma y de determinada longitud ejecuta en el ecuador 86,400 oscilaciones en un día solar medio, y que el mismo pé-

dulo trasladado á Londres verifica en igual espacio de tiempo 86,535. Debemos deducir de aquí que la intensidad de la fuerza que actúa sobre el péndulo en el ecuador es á la que lo pone en movimiento en Londres, como el cuadrado de 86,400 es al de 86,535, ó sea :: 1 : 1,00315; ó en otros términos, que una masa de materia que pesara en Londres 100,000 libras ejerce en el suelo la misma presión ó el mismo esfuerzo para aplas-

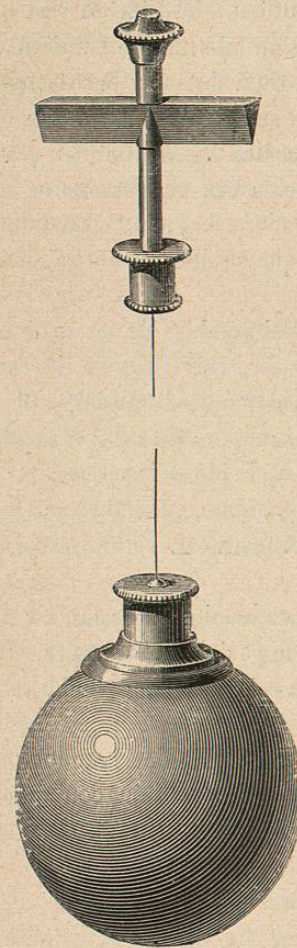


Fig. 102.—Péndulo de Borda (esfera de platino y cuchilla de suspensión)

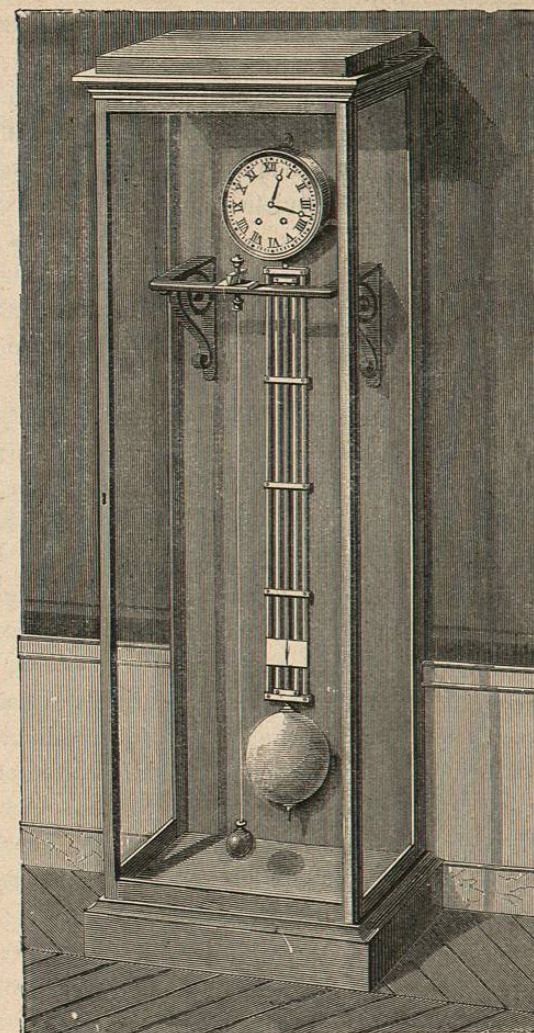


Fig. 103.—Péndulo de Borda. Medida de la duración de una oscilación por el método de las coincidencias

tar los cuerpos sobre los que está colocada, que ejercerían 100,315 de las mismas libras transportadas al ecuador., Otro ejemplo: un péndulo, cuya longitud de oscilación es de un metro, ejecuta en París en el vacío 86,137 oscilaciones en un día solar medio; trasladado á los polos ejecutaría 86,242, al paso que en el ecuador este número quedaría reducido á 86,017. Las intensidades de la gravedad en estos tres puntos son proporcionales á los cuadrados de las tres cantidades, ó á los números siguientes: 1,00000, 1,00244, 0,99861. De donde se sigue que un cuerpo pesado en París, y cuyo peso fuese de 100,000 kilogramos, transportado á los polos experimentaría un aumento de 244

kilogramos, y en el ecuador no pesaría más que 99,861 kilogramos ó habría sufrido una disminución de 139.

Hemos dicho anteriormente, y creemos útil repetirlo, que estas variaciones no se conocerían sino con el dinamómetro y no con la balanza, por cuanto en este último caso las pesas sufrirían á su vez las mismas variaciones.

Pasemos ahora á las observaciones del péndulo por el segundo método, que es el de que se valieron Borda y Cassini, y posteriormente Biot y Mathieu en París, Dunkerque y Burdeos.

El péndulo de Borda, tal cual lo emplearon Biot y Mathieu, consistía en una bola de platino de 36 $\frac{1}{2}$ milímetros de diámetro, suspendida de un hilo metálico finísimo, el cual va sujeto á un casquete esférico untado de una ligera capa de sebo; la extremidad superior del hilo estaba sujeta á una cuchilla de suspensión semejante á la que soporta la varilla ó péndola de los relojes (fig. 102). Esta cuchilla descansaba en dos planos fijos, bien pulimentados, de piedra muy dura y cuya posición era perfectamente horizontal: los planos se apoyaban á su vez en una fuerte armadura de hierro sostenida en unos soportes empotrados en una sólida pared, de suerte que se obtuviera una inmovilidad completa.

Las oscilaciones se contaban por comparación con las del péndulo de un reloj adosado también á la pared, cuya marcha se había arreglado por observaciones de estrellas (fig. 103). Con auxilio de un anteojo colocado á diez metros de distancia, se observaban las coincidencias sucesivas de ambos péndulos, y del número de estas coincidencias así como del de los segundos transcurridos se deducía el de las oscilaciones.

Una vez conocido este número, se medía la longitud del péndulo, valiéndose al efecto de operaciones delicadísimas, cuyo detalle es ajeno á este lugar. (V. el tomo II de la *Astronomía física*, de M. Biot.)

Poseemos gran número de observaciones efectuadas por uno ú otro de ambos métodos en regiones muy distintas de los dos hemisferios, desde el siglo XVII hasta nuestros días, y en cuyos trabajos, de tan grande importancia para la física del globo, han tomado parte los sabios más ilustres.

El cuadro siguiente, que da en milímetros la longitud del péndulo de segundos para París, demuestra el acuerdo que existe entre los resultados y la precisión con que se han llevado á cabo todos los experimentos.

LONGITUD DEL PÉNDULO DE SEGUNDOS EN PARÍS

Observadores	Milímetros
Picard..	994,000
Rícher y Huygens..	994,200
Godín..	993,930
Bouguer..	994,180
Mairán..	994,032
Whitherust..	993,877
Borda..	993,896
Biot y Mathieu..	993,915
Káter y Sabine..	993,998
Béssel..	993,781

El promedio general sería 993^{mm},981; pero limitándose á los seis últimos resultados se ve que la longitud del péndulo de segundos en París es 993^{mm},916.

La intensidad correspondiente de la gravedad está expresada por la cifra 9^m,8096, que, según se sabe, es la velocidad adquirida en un segundo por los cuerpos graves que caen en el vacío.

Acabamos de presentar la longitud del péndulo de segundos para París: ahora agregaremos los valores que el cálculo y las observaciones designan como longitud del mismo péndulo en los polos, en el ecuador y á la latitud media de 45 grados, así como las cifras que expresan la intensidad de la gravedad en dichos parajes:

	Longitud del péndulo de segundos	Intensidad de la gravedad
	mm	mm
En el Ecuador..	991,03	9,78103
A los 45° de latitud..	993,52	9,80606
En los polos..	996,19	9,83109

III

FIGURA DE LA TIERRA DETERMINADA POR LA GEODESIA

Las ciencias físicas y naturales abarcan en su objeto el Universo entero; pero sus resultados, aplicados directamente al estudio del globo que habitamos, tienen para nosotros una importancia más inmediata y tan evidente que es innecesario insistir sobre este punto. No es posible conocer la constitución de nuestra Tierra, considerada en su superficie sólida ó líquida, en su envoltura atmosférica así como en sus capas interiores, sino recurriendo á la vez á la astronomía, á la física, á la geografía, á la meteorología y á la geología; cada una de cuyas ciencias proporciona de este modo materiales para otra ciencia especial, á la que se ha convenido en dar el nombre de *física del globo*. En el curso de esta obra veremos sucesivamente la parte que la física ha tenido hasta aquí en sus progresos, y en este momento nos proponemos entrar en algunos detalles acerca de la aplicación de la teoría de la gravedad á varias cuestiones, unas resueltas, otras solamente bosquejadas, y todas ellas del mayor interés para conocer nuestro planeta.

Gracias á los trabajos de los geómetras y astrónomos de los tres últimos siglos, hoy conocemos, aproximadamente al menos, la figura y dimensiones de la Tierra; pero es muy poco lo que se sabe acerca de su estructura interna y del estado físico de las capas situadas más abajo de cierto límite, porque las observaciones directas apenas han podido pasar hasta el presente de un kilómetro en los más profundos pozos de mina (1).

¿Cómo está constituido este núcleo interior del globo terrestre? ¿Es fluido como lo

(1) El sondeo de Mouille Longe, cerca del Creusot, ha llegado á 920 metros de profundidad, que, como se ve, viene á ser la 7000.^a parte del radio terrestre. M. de Lesseps ha presentado á la Academia de Ciencias, en la sesión del 10 de mayo de 1880, una comunicación de la cual extractamos las líneas siguientes: "Las minas de plata que dirige M. Mackay en Virginia City (California) son muy importantes. Las galerías llegan actualmente á 1,000 metros de profundidad, y M. Mackay se propone seguir profundizándolas todavía. Es sabido que el mayor límite á que se ha llegado en Europa en las minas de Bohemia apenas pasa de 1,000 metros." Los aeronautas se han elevado en la atmósfera á la altura máxima de 8,000 metros, ó sea á la 8.^a parte del radio terrestre sobre el nivel del suelo; en el océano, la sonda ha penetrado á 5 ó 6 kilómetros de profundidad, ó á 12 kilómetros según ciertas valuaciones que no merecen entero crédito. De todos modos, el espesor de las capas del globo exploradas, sólidas, líquidas ó aéreas, es relativamente muy escaso.