

Supongamos, pues, que sea posible pesar sucesivamente en tales condiciones y *partes por partes* toda la materia que compone el globo terráqueo, y sumando todos estos pesos parciales, el resultado que se obtendría pasaría de 6.000.000.000.000 de toneladas de 1.000 kilogramos, cifra enorme que sólo tiene interés como curiosidad y únicamente propia para poner en relieve la inmensidad de la masa del globo.

Una consecuencia más interesante de la averiguación de la densidad media de la Tierra es la relativa á la constitución de sus capas interiores. Conócese directamente la de las capas accesibles á la observación, y los físicos y geólogos, después de examinar los materiales constitutivos de la corteza, piensan que no se dista mucho de la verdad considerando la densidad de estos materiales dos veces y media ó dos y dos tercios igual á la del agua. Siendo 5,56 la densidad media de la Tierra, es evidente que la de las capas internas y la del núcleo central excede de la media. Este resultado confirma las previsiones que se podían formar en virtud de otra clase de consideraciones. Si nos remontamos á las épocas en que el globo terráqueo entero se hallaba en estado fluido, podemos admitir que las diferentes substancias que componían su masa debieron seguir, en cuanto á su equilibrio, la ley de los líquidos superpuestos, los más densos de los cuales están siempre debajo de los menos densos: los materiales más pesados formaron el núcleo central, y las capas exteriores han resultado ser las más ligeras.

Pero hay otra razón que vendría á justificar el aumento de densidad de las capas centrales. Aun suponiendo que el globo terráqueo se compusiera de materias específicamente las mismas, como la presión ejercida por unas capas sobre otras va creciendo de la superficie al centro, debió resultar de aquí una compresión ó disminución de volumen, es decir, un aumento de densidad. Así pues, este aumento era inevitable para las capas y el núcleo interiores terrestres, al menos hasta cierto límite, que depende de la ley de variación de la compresibilidad con la presión, aun para materiales primitivamente homogéneos.

Sabiase ya, tanto por la medición de los grados de los meridianos como por las observaciones del péndulo, que la hipótesis de la homogeneidad de la Tierra era incompatible con los hechos; pues el aplanamiento del globo hubiera sido mucho mayor de lo indicado á la vez por las mediciones directas y por la teoría. La determinación de la densidad media comparada con la de las capas exteriores es una confirmación de tan importante resultado.

Pero si está probado que las capas del elipsoide terrestre tienen densidades crecientes desde la superficie al centro, en cambio continúa ignorada la ley en cuya virtud aumentan dichas densidades. El único medio de abordar una cuestión tan compleja consiste en hacer hipótesis, someterlas al cálculo y comprobar prácticamente algunas de sus consecuencias. Clairaut supuso en el siglo pasado que la densidad de las capas sucesivas disminuía en la misma relación con que aumenta su distancia al centro. Legendre opinó que la densidad decrece con menos rapidez de la que esta distancia aumenta, ó lo que es lo mismo, que á partir de la superficie crece al pronto rápidamente y luego cada vez menos hasta que cerca del centro el aumento es nulo. Esta hipótesis está de acuerdo con lo que se sabe de la compresibilidad de los sólidos y de los líquidos; esto es, que los cuerpos en cualquiera de estos estados oponen tanta mayor resistencia á la compresión cuanto más comprimidos están.

Parece, pues, que si el aumento de densidad de las capas interiores tiene una explicación satisfactoria en la fluidez primitiva de la Tierra, en el transporte de las materias más densas al centro, así como en el efecto natural de la compresión ejercida por las

capas superiores sobre las más bajas, esta última causa puede bastar. Laplace ha estudiado la hipótesis de que la composición del núcleo terrestre fuese químicamente homogénea, y ha deducido que la compresión bastaba para explicar el aumento de densidad desde la superficie al centro. ¿Es así? ¿El núcleo terrestre es químicamente homo-

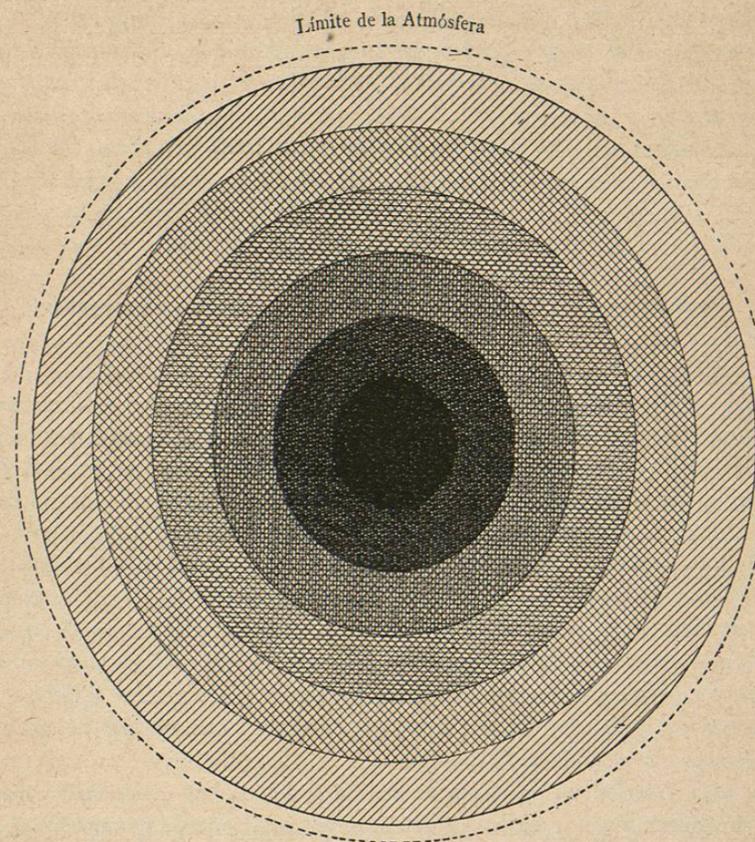


Fig. 114.—Densidades comparadas de las capas terrestres, según la ley de Legendre

géneo, ó debemos creer que se compone, por ejemplo, de masas minerales en fusión? La ley de Legendre sobre el aumento de las densidades da los resultados siguientes (fig. 114).

Representando por 1 la densidad en el centro y por 1 el radio de la Tierra, he aquí cuáles serían las densidades de las capas á varias distancias al centro:

Distancias al centro	Densidades relativas	Densidades con relación al agua
1,0	0,25	2,6
0,8	0,46	4,78
0,6	0,67	6,97
0,4	0,84	8,78
0,2	0,96	9,98
0,0	1,00	10,4

La densidad de la superficie, la densidad media y la del centro deberán estar, poco más ó menos, en la relación de los números 1, 2 y 4, en progresión geométrica, y las capas de densidad igual á la densidad media de la Tierra deberán hallarse á la cuarta parte del radio próximamente á partir de la superficie y á las tres cuartas partes de la distancia de ésta al centro (1).

CAPÍTULO III

MOVIMIENTO DE LOS PROYECTILES

I

MOVIMIENTO DE LOS PROYECTILES SOMETIDOS Á LA ACCIÓN DE LA GRAVEDAD

¿Cuál es la acción de la gravedad en los cuerpos puestos en movimiento?

Cuando se dispara un proyectil al aire, mediante un impulso que se puede considerar como instantáneo, afectan el movimiento de aquél varias influencias ó fuerzas, cuyos efectos hay que conocer separadamente para resolver la cuestión tal como la hemos planteado: existe la *fuerza de impulso*, que por sí sola daría al cuerpo un movimiento rectilíneo, uniforme, indefinido, es decir, una velocidad constante; luego la *gravedad*, cuyas leyes hemos estudiado, cuando el móvil se halla en el vacío; y además la *resistencia del aire*, que se combina con la gravedad para modificar la velocidad inicial. Pero no es esto todo: la Tierra, en cuya superficie ocurre el fenómeno, no está en reposo; tiene dos movimientos, el de *traslación en el espacio* y el de *rotación uniforme* sobre su eje; estos movimientos engendran fuerzas aparentes, la de arrastre y la centrífuga, que influirán en la marcha del móvil, y cuyo efecto hay que calcular también, si se quiere resolver completamente la cuestión.

Este es en realidad un problema de mecánica, del cual no deberíamos ocuparnos aquí, si su solución no nos hiciera comprender por una serie de consecuencias cómo ejerce su acción más allá de nuestro globo la gravedad, esa fuerza cuyos efectos nos

(1) Plana estima tan sólo en 1,83 la densidad de las capas superiores con relación á la del agua. Sin duda tiene en cuenta la masa de las aguas del Océano que disminuye considerablemente la densidad de la costra terrestre, si no se atribuye á esta costra más que un espesor igual al de las profundidades exploradas. En cuanto á la densidad del centro de la Tierra, Plana la hace llegar á 16,27, es decir, á una cantidad de 8 á 9 veces mayor que la densidad superficial.

Cuando se habla de la densidad media de la Tierra, se sobreentiende que no se trata sino de la parte sólida y líquida del globo, y que se hace abstracción de la envoltura aérea de la atmósfera. Parécenos sin embargo que se podría tener legítimamente en cuenta el volumen y la masa de esta cubierta gaseosa, en cuyo caso la densidad media del globo terráqueo quedaría bastante reducida. He aquí el resultado probable que en tal caso se obtendría:

Podemos considerar la altura de la atmósfera igual á la 25.^a parte del radio terrestre; ó sea de unos 250 kilómetros. El peso viene á ser igual á la 1.000.000.^a parte del de la parte sólida. En tales condiciones, siendo el volumen total igual al volumen sólido más $\frac{1}{8}$ (1,125), la densidad media sería á la densidad cuyo valor acabamos de indicar como 1.000,001 es á 1.125,000. El cálculo da entonces para la densidad media así definida el número 4,94.

Así pues, la agregación de la atmósfera reduciría la densidad 5,56 de la Tierra en la 9.^a parte de su valor próximamente.

son tan conocidos y familiares, y cómo no es más que un caso particular de la fuerza que causa todos los movimientos de los cuerpos celestes.

Volvamos á nuestro móvil. Supongamos ante todo que se le ha disparado en el vacío y en una dirección rigurosamente vertical, ya sea de abajo arriba, ó viceversa.

Si se le dispara de abajo arriba, su velocidad inicial resultará disminuída á cada instante por la que la gravedad le imprime en sentido contrario, y claro está que esta velocidad inicial quedará anulada tan luego como el tiempo de la ascensión sea tal, que haya igualdad entre dicha velocidad y la adquirida por efecto de la gravedad. Un cálculo muy sencillo (1) demuestra que el tiempo de la ascensión debe ser igual á la velocidad inicial dividida por la intensidad de la gravedad en el punto en que se verifica el experimento. Al llegar el cuerpo al término de su trayectoria vertical, caerá únicamente por la acción de la gravedad, siendo fácil demostrar que el tiempo que invertirá en recorrer en sentido inverso el mismo camino, será exactamente igual á la duración de la ascensión.

Por lo demás, este es un caso imaginario, puesto que el movimiento de los proyectiles siempre tiene efecto en el aire. El fluido en que se mueven opone en realidad una resistencia que no es fácil calcular con todo rigor, dado que no se conoce la ley exacta de las variaciones de esta resistencia con la velocidad (2). La influencia de la resistencia indicada causará sin duda cierta disminución en la velocidad de ascensión así como en la de la caída, y también en la altura vertical á que llegará el cuerpo.

Pero no es esto todo. Hemos visto ya que, á causa de la rotación de la Tierra y de la fuerza centrífuga que de ella resulta, la caída de los graves por efecto de la gravedad no se efectúa en rigor siguiendo la vertical, sino que todo cuerpo que cae se desvía un tanto al Este. Fácilmente se comprende que cuando el cuerpo se eleva sucede lo contrario, esto es, se desvía al Oeste; al llegar al punto culminante se halla al Oeste de la vertical, es decir, en la vertical de un punto que está al Occidente del de partida; pero al caer no habrá lugar á que se desvíe con relación á esta nueva vertical. En resumen, se desviará al Oeste. En todo este raciocinio se hace abstracción de la resistencia del aire, que dista mucho de ser despreciable; y si se tratase de hacer un experimento positivo, claro está que no se podría comprobar rigurosamente el resultado que indica la teoría. Así lo consigna en las líneas siguientes M. J. Bertrand, uno de nuestros ilustres geómetras contemporáneos:

“Según parece, Varignón indicó por primera vez, en 1707, la contradicción geométrica de las leyes de Galileo sobre la caída de los cuerpos con la hipótesis de la rotación de la Tierra y la de una gravedad constante. Limitase á demostrar que la reunión de estas tres hipótesis implica contradicción, sin atreverse á decidir la que debe modificarse

(1) La fórmula es tan sencilla que la transcribiremos aquí. Llamando a á la velocidad inicial, t al tiempo en segundos, v á la velocidad de ascensión, y h á la altura de ascensión, tendremos

$$v = a - gt, \quad h = at - \frac{gt^2}{2}$$

Para $v = 0$, $t = a/g$. Supongamos que el móvil tiene en París una velocidad de impulso de 9,81 metros: subirá durante un segundo y llegará tan sólo á 4^m,90 de altura. Con una velocidad décuple, de 98^m,10, la ascensión durará 10 segundos y el cuerpo se elevará 490 metros. Todos estos números suponen que la ascensión se verifica en el vacío.

(2) Según las hipótesis que se han comprobado prácticamente, la resistencia que opone el aire al movimiento de los proyectiles depende á la vez del peso del móvil, de la superficie de su sección transversal y de su velocidad; crece un poco más de prisa que el cuadrado de la velocidad; el exceso procederá en parte del aumento de densidad del aire empujado por el proyectil.