

PASO A PASO (y Tercera Parte)

Masa y gravedad

Rafael González de Vega

El concepto de «masa» se confunde a menudo con el de «peso», sobre todo teniendo en cuenta que para los dos se emplea la misma unidad de medida: *el gramo* y sus múltiplos (Kg., tonelada, etc.). En realidad, las dos magnitudes son muy diferentes: un gramo-peso es la fuerza que se debe ejercer en un punto de la superficie de la Tierra para que un gramo-masa no caiga. Para ser más precisos, deberíamos decir en *qué* punto, pero no es necesario entrar en estos detalles.

Todos saben que los astronautas, sobre la superficie de la Luna, pesaban menos que en la Tierra pero su masa no debía haber cambiado apreciablemente ya que durante el viaje no habían adelgazado de forma visible.

El primero que empleó la noción de masa en el sentido moderno fue Newton; para él, masa es sinónimo de *cantidad de materia*, la cual está definida como «el producto de la densidad de un cuerpo por su volumen». Esta definición, si no se añade otra cosa, es lo que se llama una «tautología» y como tal, fue severamente criticada especialmente por Mach. Una tautología es una frase que tiene pinta de decir algo pero, en realidad, no comunica ninguna información que no se conociera ya, como por ejemplo, «la madre de Carlos es una mujer cuyo hijo es Carlos», o bien, «el señor de La Palisse, un cuarto de hora antes de morir, estaba todavía vivo». La caza de tautologías en los discursos es un deporte útil e interesante; muchas consignas políticas pertenecen a esta categoría.

En el caso de la masa, como por definición la densidad es precisamente igual al cociente de la masa de un cuerpo dividido por su volumen la definición newtoniana nos dice que si multiplicamos la densidad de un cuerpo por su volumen, obtenemos algo (la masa) que dividido por el volumen nos da la densidad, con lo que el discurso vuelve sobre sí mismo, como el gato que persigue su propia cola. Ahora bien, es evidente que Newton nunca habría cometido un error de lógica tan grave; y es justo la frase con la que empieza su célebre libro que ya he recordado, «Los principios». De todos los escritos de Newton se deduce que él estaba firmemente convencido de que los cuerpos estaban formados por *átomos*. Nosotros hoy tenemos una idea más profunda y precisa de la estructura atómica y subatómica de la materia pero para Newton el átomo era una *unidad elemental de materia*, el límite que se obtiene dividiendo un cuerpo en fragmentos cada vez más pequeños. Por eso, la densidad de un cuerpo no es simplemente el resultado de la división de la masa por el volumen, sino que nos informa sobre cómo están los átomos de comprimidos dentro de un cuerpo: muy pegados dentro de un cuerpo denso como un metal, más separados en los cuerpos menos densos como los gases. Así, la definición de Newton se remite a una operación ideal (es decir, no realizable en la práctica) pero correcta desde un punto de vista lógico: la de contar las unidades elementales de materia que componen un cuerpo. Por lo tanto, no es una tautología sino que contiene una información real sobre la naturaleza de las cosas definidas. Todo lo más, se

podría criticar la idea que existía en aquel tiempo acerca de la estructura atómica de la materia, pero ni siquiera un genio como Newton habría podido prever la evolución de esta idea en tres siglos.

Este discurso no tiene la finalidad de defender a Newton, sino que sirve para comprender su concepto de gravedad. Todo el mundo habrá oído contar el famoso cuento de la manzana; probablemente, no es más que una de las muchas leyendas que surgen en torno a la vida de los hombres ilustres, como la frase «Y, sin embargo, se mueve», que Galileo habría murmurado mientras escuchaba la sentencia del Santo Oficio que proclamaba impía, falsa y herética la doctrina copernicana. Se dice que cuando el joven Newton paseaba una tarde por el jardín meditando sobre el movimiento de los cuerpos celestes, el curso de sus pensamientos tomó una nueva dirección a causa de una manzana demasiado madura que, desprendiéndose de la rama le había caído delante. ¿Por qué se había caído la manzana? ¿Por qué los objetos a los que no se sostienen caen a la tierra? Y la Luna que brillaba allí arriba, ¿no habría debido caerse también?

La idea de que la fuerza que causa la caída de los cuerpos, debiera extenderse también a los cuerpos celestes, no era nueva. Galileo lo había mencionado en su «Diálogo sobre los dos Máximos Sistemas del Mundo» y 1600 años antes de Newton, un gran escritor griego. Plutarco, en un in-

interesante opúsculo titulado «Sobre la cara que aparece en el círculo de la Luna», había escrito este párrafo que merece que se cite íntegramente: «...la Luna no se cae porque la sostiene su propio movimiento, igual que las piedras en las hondas se quedan en su sitio cuando se hace girar la honda; ...Por eso, la gravedad no mueve a la Luna, porque su fuerza está compensada por el impulso debido al movimiento circular; sería milagroso e incomprensible, por el contrario, que la Luna estuviera siempre inmóvil en el mismo lugar, como la Tierra».

Hoy que los periódicos, las revistas y la televisión están llenos de descripciones de la puesta en órbita de satélites artificiales, todas estas cosas pueden parecer banales, pero en los tiempos de Galileo y de Newton, la ciencia oficial que se enseñaba en las escuelas no era el pensamiento racional contenido en las palabras de Plutarco, sino el de Aristóteles, plagado de conceptos totalmente vacíos de significado físico como «esencia», «virtud», «tendencia natural», etc. La Luna no se cae y los cuerpos terrestres sí se caen, se decía, porque sus sustancias tienen una virtud que los hace que tiendan a su lugar natural: la Luna a la esfera lunar, los graves, lo más abajo posible. Cuando el «Divino Hacedor» creó el Universo, unos 4.000 años antes de Cristo, le había asignado a cada sustancia su sitio, infundiéndole la virtud correspondiente a su esencia. Intentar saber más, era inútil además de impío. ¿Por qué la Luna no se cae? Se preguntaba Newton. Y he aquí la contestación, como un rayo de luz imprevisto y fulgurante: no es verdad que la Luna no se caiga, se cae cada vez, se lleva cayendo cada vez en los miles de millones de años que hace que existe. Entonces, ¿cómo es que todavía está ahí y no se nos ha precipitado

encima? Reflexionemos un momento: ¿qué pasa si tiramos una piedra en dirección horizontal? Si no fuese por la gravedad continuaría moviéndose en línea recta indefinidamente, siempre con la misma velocidad: es la ley de la inercia, que muchos entrevieron y Galileo enunció claramente. Pero está la gravedad y la piedra, mientras va en la dirección en la que se ha tirado, cae como todos los cuerpos a los que no se sostiene; así, su trayectoria se curva y después de algún tiempo, la piedra choca contra el suelo.

Hay que señalar (y la conclusión no es nada agradable) que el estudio del movimiento de los cuerpos había experimentado un gran impulso desde los tiempos de Galileo debido a la necesidad de saber cómo se comportaban los proyectiles lanzados por los cañones, cada vez más potentes y perfeccionados. Uno de los resultados de estos estudios era, cosa de todos conocida, que cuanto mayor es la velocidad con que se lanza un proyectil, tanto más lejos está el punto de impacto contra el suelo. Dada una velocidad bastante grande, ¿qué hará el proyectil? Obviamente, como la superficie de la Tierra no es un plano que se prolonga indefinidamente sino una esfera, el proyectil dará una vuelta completa a la Tierra sin lograr tocar el suelo nunca, o sea, como se suele decir, *entrará en órbita*. La órbita deberá ser lo bastante alta para que el proyectil-satélite no choque contra una montaña y para que la resistencia del aire no lo frene.

He aquí por lo tanto, la explicación de por qué la Luna no se cae porque tiene una velocidad tan grande que gira alrededor de la Tierra sin conseguir aproximarse nunca, *aún cayendo siempre hacia ésta*. En el fondo, es lo que decía Plutarco pero que ahora adquiere una importancia completamente nueva por la posibi-

lidad de someter el total a cálculos matemáticos rigurosos y de hacer predicciones para comparar con la experiencia. Esto sucede porque Newton, en vez de hablar de forma descriptiva y en términos más o menos genéricos, logró dar una fórmula matemática que permite calcular exactamente la magnitud de la fuerza de gravedad en cada punto del espacio.

Otra forma de decir que la Luna no se cae es decir, que la fuerza de la gravedad es igual y contraria a la fuerza centrífuga debida al movimiento circular.

Las dos fuerzas se equilibran, anulándose recíprocamente. Pero la fuerza centrífuga disminuye a medida que crece el radio de la curva descrita de forma inversamente proporcional al cuadrado de éste. Si el tren en el que viajamos, con la misma velocidad, describe una curva muy cerrada, nos sentimos empujados hacia fuera con una fuerza bastante más grande que si la curva es abierta.

Esto significa que también la fuerza de la gravedad debe ser inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Pero hay todavía más: como según la idea de Newton, la fuerza ejercida sobre cada uno de los átomos de un cuerpo (es decir, sobre cada unidad elemental de materia) debía ser la misma, la fuerza total que actúa sobre un cuerpo, o sea la suma de todas las fuerzas que actúan sobre cada uno de los átomos, debía ser proporcional a la cantidad de materia, es decir, a la masa del cuerpo y, por la tercera ley del movimiento, también a la del cuerpo que atrae. Se llega, así, a la *ley de la gravitación universal: los cuerpos se atraen entre sí con una fuerza que se llama gravedad y esta fuerza es proporcional al producto de las masas de los cuerpos que se atraen, e*

inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la que se encuentran. Pido excusas por haber usado un lenguaje un poco técnico para enunciar esta «ley» que se puede considerar como una de las más importantes que se han descubierto. Por otra parte, al describir las aplicaciones será suficiente con referirse a los resultados obtenidos sin entrar en la técnica con la que se han obtenido. Por el contrario, es necesario que examinemos los aspectos inquietantes de la teoría de Newton.

Ante todo, espero que el lector se haya dado cuenta del «salto lógico» que he dado; estaba hablando del movimiento de la Luna y, de improviso, he incluido un enunciado que se refiere a *todos los cuerpos* del Universo. Este modo de proceder, generalizando, propio de la física, a veces lo critican los colegas matemáticos, recordando al que afirmaba que 60 era divisible por cualquier número. Su razonamiento era: 60 es divisible por 1, por 2 ($60 = 2 \times 30$), por 3 ($60 = 3 \times 20$), por 4 ($60 = 4 \times 15$) e incluso por 5 ($60 = 5 \times 12$). Si no creéis que la ley sea cierta, dividir 60 por 6 y el resultado es 10, sin resto. Conque, ¿qué más queréis?

Naturalmente, todo el mundo sabe que bastaría con pasar al número siguiente, el 7, para comprobar que la afirmación es falsa, ya que al dividir 60 por 7 se obtiene 8 y queda un resto de 4. Los físicos y los matemáticos siempre han colaborado en la construcción del maravilloso monumento del pensamiento humano que es la ciencia moderna, pero a menudo se divierten «pinchándose» entre sí, sin que por ello disminuya la recíproca estima. Así, los físicos se vengan de las críticas que hacen los matemáticos al *procedimiento inductivo*, que siguen en sus investigaciones, afirmando que todas las proposiciones matemáticas son tautologías con ex-

cepción de... las que no se pueden demostrar. Sobre la demostrabilidad de los asertos matemáticos, volveremos a propósito de la geometría.

Pero las críticas de los matemáticos no conmueven la fe de los físicos y de los astrónomos en la validez de sus métodos. Nosotros no pretendemos descubrir la verdad absoluta, somos pobres hombres que miran a su alrededor, observan el mundo, experimentan lo que pueden y son felices cuando consiguen descubrir entre los fenómenos relaciones que van más allá de las simples apariencias encontrando, por ejemplo, que la misma «cosa» que en este momento ha hecho que se me caiga la goma de la mesa, es la que impide que la Luna se pasee por el Universo, la que mantiene unido al sistema solar, a una aglomeración de estrellas, a una galaxia... Bien, y ¿qué es esta «cosa»? ¿Qué es la gravedad? ¿Cómo hace para actuar sobre los cuerpos? Cuando tiro de una cuerda, mi esfuerzo muscular se transmite de una fibra de cáñamo a la otra a lo largo de la cuerda y de ésta al peso, a través de una cadena ininterrumpida e invisible de intermediarios; tanto es así que si la cadena se interrumpe, porque se rompe la cuerda, la acción ya no se transmite y el peso cae. Sería milagroso si se rompiera la cuerda y el peso no se cayese.

Pero, ¿cómo hace la Tierra para atraer a la Luna a más de 360.000 kilómetros de distancia o incluso a los objetos que nos rodean sin que haya por medio cuerdas u otras cosas que transmitan la acción gravitatoria? Y al revés, si yo quito el apoyo, que podría hacer de intermediario entre la Tierra y los objetos, ese es justo el momento en el que se caen.

A esta cuestión, Newton no le podía dar una respuesta satisfactoria y tanto es así que todos sus con-

temporáneos estaban en contra suya, con la excepción de los ingleses que le apoyaban, quizá más por solidaridad nacional que por convicción, por lo menos algunos.

El gran filósofo y matemático alemán Wilhem Leibnitz definió la idea de una acción de atracción a distancia, sin intermediarios como «inexplicable, incomprensible, precaria, infundada y sin precedentes» y, por lo tanto, contraria a la razón. Los más moderados, como el físico holandés Christian Huyghens, se limitaron a observar que todos pueden ver que el agua corriente y el viento arrastran a los objetos consigo; estas son fuerzas mecánicas comprensibles. Pero una atracción desde lejos, a través del espacio vacío, no se puede concebir como una acción mecánica.

Entre los matemáticos más grandes inmediatamente posteriores a Newton, están los hermanos Giovanni y Giacomo Bernouilli y Leonard Euler que se oponían decididamente a la posibilidad de esta «acción a distancia»; el último la considera como una manera de volver a poner sobre el tapete ideas ya superadas y prohibidas por la ciencia como las «esencias» y las «virtudes» aristotélicas. Parece que se inclina hacia la *teoría de los vórtices* (aún confesando no saber cómo actúan) que el filósofo francés Rene Descartes, contemporáneo de Galileo, había inventado para explicar la gravedad. Los «vórtices» cartesianos eran movimientos de un «fluido» hipotético que ocupaba todos los espacios entre y dentro de los cuerpos: el éter, que aparece aquí por primera vez y del que se hablará más adelante. Sin embargo, Newton conocía la teoría de los vórtices y la había examinado a fondo con su rigor habitual, concluyendo que «la

hipótesis de los vórtices se opone totalmente a los fenómenos astronómicos y no conduce a una explicación sino a un oscurecimiento de los movimientos celestes». En una carta desde Londres, hacia 1730, Francois Marie Arouet, (Voltaire, como le gustaba ser llamado) escribía con mordaz ironía: «Un francés que llega a Londres lo encuentra todo cambiado, tanto en filosofía como en todo lo demás. Ha dejado un universo lleno, lo vuelve a encontrar vacío. En París, el mundo está hecho de vórtices de una materia sutil, en Londres no. Para nosotros, el flujo del mar lo causa la presión de la Luna; entre los ingleses es el mar el que gravita hacia la Luna. Para vuestros cartesianos todo sucede según un impulso incomprensible, según Newton por una atracción cuya causa es bastante misteriosa. En París imaginamos la Tierra alargada como un melón, en Londres es achatada como una hogaza».

¿Qué podía responder Newton en esta confusión? Naturalmente, él habría podido observar que hay otras acciones, atractivas o repulsivas que se transmiten a distancia sin ningún intermediario aparente, como las de los cuerpos magnetizados o electrizados. Además, en el interior de los cuerpos, ¿cómo se transmiten las acciones a través del vacío entre un átomo y otro, acciones que son necesarias para mantenerlos juntos? Efectivamente, en varios escritos él plantea estas preguntas, mostrando así darse cuenta muy bien de las dificultades relacionadas con la idea de una acción a distancia. En una carta a su amigo Bentley, añade después de lamentarse de que se le atribuya esa idea: «que un cuerpo pueda actuar sobre otro a través del vacío, sin que ningún intermediario, es para mí un absurdo que ninguna persona razonable puede admitir».

En su obra principal, Newton toma una postura pragmática. A mi me basta, dice, haber demostrado cómo actúa la gravitación y haber explicado de esa manera la caída de los graves sobre la Tierra, el movimiento de los cuerpos celestes y las mareas; lo que sea esta fuerza misteriosa que se extiende por todo el universo, penetra en todos los cuerpos y a la que nada se escapa y *cual sea su naturaleza, ni lo sé ni me pongo a inventar hipótesis («hypotheses non fingo»)*. Es como si dijera: el que no se lo crea, que encuentre algo mejor.

Este punto de vista, lo compartieron todos los científicos que vinieron después de Newton durante más de dos siglos; aunque no faltaron intentos más o menos razonables de «explicar» la gravitación, los matemáticos más grandes de los siglos XVIII y XIX, D'Alembert, Clairaut, Lagrange, Laplace, Gauss, Hamilton y Jacobi, que se ocuparon del movimiento de los cuerpos, se limitaron a aplicar las leyes de Newton, sin «inventar hipótesis». Lo que estos científicos se proponían principalmente, no era explicar el carácter general de los movimientos de los planetas y de los satélites (las leyes de Kepler), esto ya lo había hecho Newton de forma satisfactoria. Su idea era que si la ley de la gravitación universal era cierta, habría debido explicar también las pequeñas desviaciones respecto a las leyes de Kepler, que las observaciones cada vez más precisas, estaban revelando. La causa de estas desviaciones estaba relacionada con el hecho de que las leyes de Kepler se habían explicado suponiendo que la única fuerza que actuaba sobre un planeta era la atracción gravitacional del Sol, mientras que en realidad, están también las atracciones de todos los otros planetas. Estas son mucho más pequeñas porque las masas de los planetas son bastante meno-

res que la del Sol, pero sin embargo tienen un efecto medible. El estudio de este efecto, le permitió a Laplace concluir «la ley de la gravitación inversamente proporcional al cuadrado de las distancias, que representa con extrema precisión todas las desigualdades observadas en los movimientos celestes; esto, unido a la simplicidad de la ley, *no autoriza a pensar que sea rigurosamente la de la naturaleza*».

El triunfo de la ley de la gravitación tuvo lugar en 1846, cuando Urbain Jean Leverrier y John Couch Adams, basándose en las perturbaciones del planeta Urano, predijeron la existencia de otro gran planeta exterior a la órbita de Urano, e indicaron la posición en el cielo en que tendría que encontrarse; el 23 de septiembre de aquel año, el astrónomo Galle, de Berlín, observó el planeta, que después se llamaría Neptuno, en su punto exacto que Leverrier le había comunicado por carta.

Con el descubrimiento de Neptuno, la cuestión de la validez de la ley de Newton parecía definitivamente resuelta como había concluido Laplace. Había una sola excepción: Mercurio, el planeta más próximo al Sol mostraba una irregularidad que los cálculos más rigurosos no conseguían explicar. Le Verrier intentó repetir el triunfo obtenido con Neptuno y calculó la posición de un hipotético planeta, al que se bautizó con el nombre de Vulcano. Pero Vulcano, nunca fue encontrado ni en la posición calculada ni en ninguna otra y la cuestión, por el momento, se dejó a un lado en espera de tiempos mejores. Como se verá, esta circunstancia es una prueba más de que la ley de Newton no es tan rigurosa como Laplace creía.