

## 6. La teoría de la gravitación universal

La antigua concepción de la gravedad difería profundamente de la de los tiempos modernos. A partir del siglo XVII, los científicos han concebido la gravedad fundamentalmente como una propiedad de la materia. Un cuerpo atrae a otro con una fuerza que depende de las cantidades de materia que dichos cuerpos contienen y depende también de la distancia que los separa, siendo la fuerza recíproca. En la Antigüedad y en la Edad Media, la gravedad se consideraba más una propiedad de una posición que de un agregado de materia. Todo en el universo de Aristóteles tenía su lugar señalado, al que se esforzaba por regresar si se hallaba desplazado de él. Las piedras caían hacia la Tierra porque aspiraban a alcanzar su lugar propio en el centro del universo, que resultaba coincidir con el centro de la Tierra o se encontraba muy cerca de él. Mas las cosas terrestres y acuáticas se moverían hacia el centro del universo aun cuando la Tierra no estuviese allí, del mismo modo que las cosas aéreas e ígneas se mueven hacia su lugar propio bajo la órbita de la Luna, donde nada hay para «atraerlos», excepto sus posiciones asignadas.

Tal concepción de la gravedad daba lugar a dificultades en la teoría copernicana. Las piedras caían claramente hacia la

Tierra, si bien la Tierra no podría hallarse en el centro del universo si es que se movía en una órbita anual en torno al Sol. Por tanto, Copérnico sugería que cada cuerpo, la Tierra, el Sol, la Luna y los planetas, poseían su propio sistema de gravedad, de manera que una piedra en el espacio caería hacia el cuerpo celeste más próximo. Copérnico pensaba que la gravedad era la tendencia de los agregados de materia a congregarse en la forma de una esfera en cualquier lugar en que se sitúen y no precisamente en el centro del universo. Más aún, consideraba que un punto geométrico era el foco de la gravedad, si bien tales puntos tenían que ser ahora centros de esferas de materia. «El elemento Tierra —escribía— es el más pesado, y todas las cosas pesadas se ven llevadas hacia él, aspirando a alcanzar su centro íntimo.»

Copérnico no pensaba que los cuerpos del sistema solar ejercieran un influjo unos sobre otros en virtud de sus sistemas privados de gravedad. La disposición de los cuerpos celestes y sus movimientos no estaban determinados por la gravedad o alguna otra consideración mecánica. Los movimientos de los cuerpos celestes eran completamente naturales, mientras que su ordenación estaba dictada por las armonías matemáticas que se daban entre las velocidades de los planetas y los tamaños de sus órbitas. Copérnico no señalaba explícitamente qué consideraba que era la materia del espacio interplanetario, pero tras él Kepler afirmó que Copérnico creía que los cuerpos celestes se hallaban engastados en capas cristalinas sólidas que rotaban una dentro de la otra, arrastrando a los cuerpos celestes por sus cursos.

Tal concepción hubo de abandonarse, y fue preciso dar con una explicación alternativa de la disposición y movimientos de los cuerpos celestes, cuando Tycho Brahe y otros siguieron en 1577 la órbita de un cometa a lo largo del cielo, mostrando que se movía a través del sistema solar, cortando las supuestas capas cristalinas sólidas de la cosmología aristotélica.

Ahora está bien claro para mí que no hay en los cielos esferas sólidas –escribía Tycho Brahe–, y las que han sido ingenizadas por los autores para salvar las apariencias tan sólo existen en la imaginación, a fin de permitir a la mente concebir el movimiento que los cuerpos celestes trazan en su carrera.

Mas si las esferas cristalinas no existen, se planteaba el problema de qué es lo que de hecho mueve los cuerpos celestes y preserva su disposición regular. Es posible que los cuerpos celestes se moviesen de propio acuerdo, independientemente unos de otros y sin orden regular. Francis Bacon escribía que la

primera pregunta relativa a los cuerpos celestes es si hay en ellos un sistema, esto es, si el mundo o universo compone conjuntamente un globo con un centro o si los globos particulares de la Tierra y las estrellas se hallan dispersos desordenadamente, cada uno con sus raíces propias, sin ningún sistema o centro común.

No obstante, los primeros científicos modernos sentían en su mayoría que el Sol, la Luna, la Tierra y los planetas componían un sistema con un centro común, estando el sistema unido por un único principio en el que se basaban los diversos movimientos regulares de los cuerpos celestes. En 1600 William Gilbert de Colchester sugería que el magnetismo era el principio que mantenía unido al sistema solar. Como hemos visto, Gilbert presumía, a partir de sus experimentos con piedras imán esféricas, que la Tierra misma era una piedra imán gigantesca con tan sólo una cubierta superficial de rocas y tierra. Dado que las piedras imán ejercían una considerable fuerza sobre los objetos de hierro a cierta distancia, sugería que la gravedad era la fuerza magnética ejercida por la inmensa piedra imán de la Tierra sobre los objetos en torno, y que la gravedad se extendía por el sistema solar, actuando como el tejido conjuntivo del universo.

En uno de sus experimentos, Gilbert mostraba que la fuerza magnética ejercida por una piedra imán sobre un trozo dado de hierro aumentaba con el tamaño, siendo tanto mayor su atracción sobre un trozo de hierro cuando mayor fuese la masa de la piedra imán. Además, la acción era recíproca, atrayendo el hierro a la piedra imán tanto como la piedra imán atraía al hierro. Así, las propiedades de la fuerza magnética, tal y como la investigaba Gilbert, suministraban un modelo de la concepción moderna de la fuerza gravitatoria. Los focos de la gravedad eran masas concretas de materia más bien que puntos geométricos, aumentando la fuerza con la cantidad de materia.

Como Tycho Brahe, Gilbert era de la opinión de que los planetas se movían en torno al Sol, mientras que el Sol y los planetas se movían como un todo en torno a una Tierra que se hallaba en el centro del mundo. No obstante, discrepaba de Tycho y concordaba con Copérnico por cuanto que suponía que las estrellas fijas se hallaban estacionarias, siendo la Tierra la que rotaba diariamente sobre su eje. Puesto que la Tierra, el Sol, la Luna y los planetas eran todos ellos cuerpos magnéticos, se orientaban solos en el espacio, de la misma manera que las brújulas se orientan solas en la Tierra, de modo que todos los cuerpos del sistema solar se movían en el mismo plano con sus ejes paralelos; «adoptaban posiciones en el universo según la ley del todo», como él decía. Así pues, el eje de la tierra apuntaba siempre a la estrella polar debido al efecto orientador del magnetismo terrestre. Gilbert sostenía que todos los cuerpos del sistema solar influían mutuamente en sus respectivos movimientos desde fuera. «Todo lo que en la naturaleza se mueve naturalmente se ve impulsado por sus propias fuerzas y por un pacto concorde con los cuerpos –escribía–; tal es la propulsión circular de los cuerpos planetarios que observan e incitan los cursos unos de otros.»

Las teorías de Gilbert ejercieron temporalmente una gran influencia. Fueron adoptadas por Johannes Kepler, quien las

empleó para explicar por qué los planetas se movían en órbitas elípticas. Kepler desarrolló también la concepción de la gravedad de Gilbert, suponiendo que era «una afección mutua entre cuerpos emparentados que tendían hacia la unión o conjunción, de tipo similar al magnetismo». Tal fuerza de gravedad entre dos cuerpos dependía de sus masas. La Tierra era cincuenta y tres veces mayor que la Luna, de manera que

si la Luna y la Tierra no se viesan mantenidas en sus órbitas por su fuerza animal o alguna otra equivalente, la Tierra ascendería a la Luna una cincuenta y cuatroava parte de la distancia que las separa, mientras que la Luna caería a la Tierra las otras cincuenta y tres.

Vemos de paso que Kepler no tenía la idea de inercia, pues era «la fuerza animal o algún equivalente» lo que se necesitaba para mantener a los cuerpos del sistema solar en movimiento.

A fin de dar cuenta de los movimientos de los planetas, Kepler suponía que el Sol enviaba efluvios magnéticos que rotaban como los radios de una rueda con el giro del Sol en el plano de rotación de los planetas. Estos efluvios magnéticos propulsaban los planetas por sus cursos mediante una fuerza tangencial. Así, los planetas más externos se movían más lentamente que los que se hallaban en las proximidades del Sol, debido a que eran más pesados y los efluvios magnéticos se habían debilitado por la distancia cuando llegaban hasta ellos. Para explicar las órbitas elípticas de los planetas, Kepler suponía que el Sol era un imán gigante con un solo polo, mientras que los planetas eran imanes con un polo norte y otro sur. Los ejes de los planetas poseían una orientación constante en el espacio, de manera que primero el polo norte y luego el sur se orientaban hacia el Sol a medida que el planeta se movía por su órbita. De ahí que el planeta se viese alternativamente atraído y repelido por el Sol, distorsionándose la circularidad de su órbita para formar una

elipse. Kepler pensaba que el giro de la Tierra sobre su eje se debía principalmente a su propio magnetismo: en un año, trescientas sesenta rotaciones terrestres se debían a su propio magnetismo y las otras cinco al del Sol. Como Gilbert, Kepler aceptaba los valores cósmicos de Copérnico. La Tierra era en gran medida igual que los demás planetas, mientras que el Sol gobernaba el universo con una especie particular de magnetismo que impulsaba a los planetas por sus órbitas distorsionando las circulares convirtiéndolas en elípticas.

Como hemos visto, Kepler suscribía la vieja idea mecánica de que un cuerpo en movimiento precisaba la aplicación constante de una fuerza impelente a fin de mantenerse en movimiento, mientras que su amigo Galileo se adhería al viejo prejuicio astronómico de que los movimientos de los planetas eran circulares y uniformes. No asimilaron sus obras respectivas, y así, aunque ambos podían haber unificado la astronomía y la mecánica, ninguno de ellos lo hizo. Para Galileo la disposición y movimiento de los planetas no presentaba problema alguno. Su principio de inercia establecía que los movimientos naturales eran uniformes y circulares, y puesto que pensaba que los planetas se movían en círculos con velocidades uniformes, presumía que sus movimientos eran naturales y autosostenidos. Galileo sugería que en el comienzo Dios podía haber arrojado los planetas de una gran altura, de modo que cayesen hacia el Sol aumentando gradualmente su velocidad. Una vez que hubieron alcanzado sus velocidades actuales, los planetas fueron desviados a órbitas circulares en las que continúan moviéndose indefinidamente. Era una idea, señalaba Galileo, que había sacado de Platón, después de despojarla de «la máscara y el ropaje poético».

Tanto Galileo en astronomía como Descartes tras él en ciencia general se ocupaban principalmente de la propagación de las nuevas ideas generales de la revolución científica

y no de la explicación de los detalles de los últimos descubrimientos científicos. Como Galileo, Descartes creía que los planetas se movían en órbitas circulares con velocidades uniformes y no en órbitas elípticas con velocidades variables, como Kepler había descubierto. Además, Descartes rechazaba la idea de que hubiese una cosa así como una fuerza de gravedad que operase entre agregados de materia a través del espacio vacío. Criticaba a Galileo por determinar las leyes de la caída libre de los cuerpos sin averiguar primero si la caída de un cuerpo podría ser libre. Según Descartes, la materia y la extensión eran sinónimos, de manera que el espacio se hallaba lleno de materia, sin que nada pudiese caer «libremente». La caída de una piedra a la Tierra se debía al efecto de succión del vórtice de materia que rodeaba la Tierra. Del mismo modo, las órbitas circulares de los planetas se debían al efecto de succión de la materia vorticial que rodeaba al Sol y que distorsionaba sus movimientos naturales en línea recta debidos a la inercia, convirtiéndolos en circulares. Las opiniones de Descartes ejercieron gran influjo y en la época sirvieron para distraer la atención de los problemas de la fuerza gravitatoria. Uno de sus seguidores, Christiaan Huygens, 1629-1695, un holandés que era un caballero aficionado a la ciencia, realizó un experimento en 1669 que pareció confirmar la teoría cartesiana de la caída de los cuerpos a tierra. Provocó un remolino en un recipiente de agua y descubrió que los guijarros eran arrastrados al centro del recipiente, donde se hallaba el centro del vórtice. Por consiguiente, Huygens pensó que la gravedad no era sino «la acción del éter que circula en torno al centro de la Tierra, tratando de alejarse del centro y forzando a los cuerpos que no comparten su movimiento a ocupar su lugar». Mientras investigaba la oscilación de un péndulo, Huygens había descubierto ya en 1659 que se precisaba una fuerza centrípeta para mantener a un cuerpo en movimiento circular, averiguando la ley que regía dicha fuerza. Mas, en el caso de los planetas, no

consiguió darse cuenta de que esta fuerza era suministrada por la gravitación, quizá debido a su adhesión en aquella época a las opiniones de Descartes. En astronomía, el sistema de Descartes explicaba menos que el de Kepler, pues fallaba lamentablemente a la hora de dar cuenta de las órbitas elípticas de los planetas, oscureciendo la prometedora concepción kepleriana de la gravedad como fuerza que actúa a través del espacio entre dos cuerpos dependiendo de la cantidad de materia que dichos cuerpos presentan.

Las teorías de Kepler fueron reavivadas en 1666 por Giovanni Alfonso Borelli, 1608-1678, profesor de matemáticas en Pisa y miembro de la Academia Florentina de Experimentos, que estaba compuesta por alumnos y discípulos de Galileo. Borelli sugería que la órbita elíptica de un planeta era el resultado de un equilibrio entre dos fuerzas opuestas: primero, la fuerza de la gravedad que atraía al planeta hacia el Sol, y, en segundo lugar, una fuerza centrífuga que tendía a alejar al planeta del Sol, similar a la fuerza ejercida sobre una piedra cuando se la hace girar en una honda. Borelli aceptaba la teoría mecánica del *impetus*, y así, como Kepler, suponía que los planetas eran impulsados en torno a sus órbitas por rayos de fuerza que radiaban del Sol y rotaban con él, como los radios de una rueda. Era de la opinión de que los cuerpos tendían a moverse naturalmente en línea recta y no en círculo, como Kepler y Galileo creían, de manera que era necesaria una fuerza de gravedad desde el Sol para obligar a los planetas a moverse en órbitas cerradas. No obstante, Borelli era incapaz de hallar exactamente cuál era la magnitud de la fuerza requerida para doblar los movimientos rectilíneos naturales de los planetas y formar las órbitas elípticas observadas, y su teoría de los movimientos planetarios permaneció en estado de conjetura.

Las ideas de Borelli constituyeron los últimos coletazos de la física teórica en la Italia del XVII, mientras que en Holanda y Francia dominaban las teorías de Descartes. De este modo,

el problema de la mecánica celeste recorrió todo el círculo. Partiendo de las especulaciones en gran medida cualitativas de Gilbert, el problema de la gravedad retornó de nuevo a Inglaterra, suministrando la solución definitiva la postrera escuela estuardo de científicos. La figura principal de dicha escuela fue Isaac Newton, 1642-1727, si bien no carecieron de importancia las contribuciones de otros miembros, sobre todo las de Robert Hooke, 1635-1703, Christopher Wren, 1532-1723, y Edmund Halley, 1656-1742.

Supuesta la versión moderna del principio de inercia de Galileo que establece que el movimiento sin impedimentos de un cuerpo consiste en una velocidad uniforme en línea recta, el problema de explicar los movimientos de los cuerpos celestes en términos mecánicos se dividió en dos cuestiones subsidiarias principales. Primero, la derivación de la ley que gobierna la fuerza centrípeta requerida para doblar semejante movimiento rectilíneo bajo la inercia en un movimiento circular o elíptico. En segundo lugar, la demostración de que la gravedad podría suministrar la fuerza centrípeta que obliga a los planetas a moverse en órbitas cerradas, lo que exigía la derivación de la ley que gobierna la variación de la fuerza gravitatoria con la distancia entre los cuerpos gravitantes. Robert Hooke, el *curator* de la Sociedad Real, trató de estudiar el segundo problema experimentalmente. Se inclinaba hacia la opinión de Gilbert de que la gravedad era de tipo semejante al magnetismo, y puesto que Gilbert había demostrado experimentalmente que la fuerza magnética entre dos cuerpos variaba con la distancia entre ellos, Hooke pensó que podría demostrarse otro tanto de la fuerza gravitatoria. En 1662 y 1666 realizó experimentos para contrastar la hipótesis, comparando los pesos de cuerpos medidos en el fondo de pozos profundos o minas y en la superficie de la tierra, así como en alturas por encima de la tierra; pero, como señalaba, «nada seguro» halló. En 1664, Hooke discutió con Wren la órbita del cometa que había aparecido

ese año. Wren era de la opinión de que el cometa se movía en una línea recta bajo la inercia, pero Hooke señaló que la trayectoria era curvada cuando el cometa se hallaba cerca del Sol y sugería que la curvatura era producida por la atracción gravitatoria del Sol. Hacia la misma época, Hooke trató de hallar la relación que gobernaba a la ley requerida para mantener al cuerpo moviéndose en una órbita circular estudiando los movimientos de péndulos circulares, mas no halló la ley crucial de la fuerza centrípeta.

Los mismos problemas fueron investigados por Newton cuando se hallaba ausente de Cambridge en su casa, Wooldsthorpe Manor, cerca de Grantham, durante la gran peste de 1665-1666. Según una confesión de treinta años después, Newton descubrió entonces tanto la ley de la fuerza centrípeta como la relación que conecta la disminución de la fuerza gravitatoria entre dos cuerpos con el cuadrado de la distancia que los separa. Parece que dedujo la ley de la fuerza centrípeta y con ella derivó de la tercera ley del movimiento planetario de Kepler la ley del inverso del cuadrado de la fuerza gravitatoria. La validez de dichas leyes se podría contrastar calculando la fuerza gravitatoria que ejercía la Tierra sobre la Luna a partir de la ley del inverso del cuadrado y del valor conocido de la fuerza de la gravedad en la superficie de la Tierra, tal y como se puede medir en los experimentos con cuerpos que caen. Con la velocidad de la Luna y el tamaño de su órbita se puede calcular la fuerza centrípeta requerida para mantener a la Luna en su órbita. Si los valores calculados de las fuerzas centrípeta y gravitatoria concuerdan cuantitativamente, entonces se demuestra que la gravedad terrestre suministra la fuerza centrípeta que mantiene a la Luna en su órbita.

Si Newton realizó estos cálculos cuando se hallaba en su casa de Wooldsthorpe, no hizo públicos sus resultados. Se han sugerido diversas razones para explicar el fallo de Newton a la hora de publicar su obra de 1666. En primer lugar, se

ha dicho que los valores calculados por Newton de la fuerza centrípeta y de la fuerza gravitatoria no concordaban, dado que la distancia del centro a la superficie de la Tierra no se conocía con precisión alguna en esa época. Más tarde se ha sugerido que Newton no podía mostrar en aquel momento que la masa extensa de la Tierra producía el mismo campo gravitatorio que si toda su masa se hallase concentrada en el centro geométrico de la Tierra. Más recientemente se ha sugerido que de hecho Newton ni descubrió la ley de la fuerza centrípeta ni la ley inversa del cuadrado en 1666, ya que no hay registros documentales que apoyen semejante pretensión, y los recuerdos de Newton treinta años más tarde resultaban erróneos en un cierto número de otros aspectos y quizá también en éstos. Además, de 1666 a 1679 Newton desarrolló una teoría de la gravedad basada en una supuesta circulación de un medio etéreo de los cielos a la Tierra y de nuevo en la otra dirección, arrastrando ese éter en su descenso los cuerpos pesados. En 1679 sugirió que el Sol y los planetas podrían estar regidos por «algún principio secreto de insociabilidad en los éteres de sus vórtices», enunciado que implica cierta inclinación hacia las opiniones cartesianas.

Para 1679, otros científicos habían llegado a la ley de la fuerza centrípeta y a la ley del inverso del cuadrado para la fuerza gravitatoria. Christiaan Huygens en Holanda había realizado experimentos sobre el movimiento de péndulos y el movimiento en círculo en general, de lo que derivó en 1673 la ley de la fuerza centrípeta. Con esta ley fue posible deducir la ley del inverso del cuadrado a partir de la tercera ley de Kepler del movimiento planetario, tal y como hemos visto. Huygens no llevó a cabo la deducción, pero lo hicieron Hooke, Wren y Halley, obteniendo la ley del inverso del cuadrado hacia 1679. En dicho año, Hooke le escribió a Newton preguntándole si podía demostrar que un planeta habría de moverse en una órbita elíptica, dada la ley de la fuerza cen-

trípeta y la del inverso del cuadrado. En su carta, Hooke señalaba la dificultad de que el Sol y los planetas fuesen cuerpos extensos, teniendo que ser tratados teóricamente como si sus masas se hallasen concentradas en sus centros. Newton no contestó a la pregunta de Hooke, mas en 1684 Wren ofreció un premio por una solución del problema que Hooke había planteado a Newton. En esta época Hooke pretendía haber resuelto el problema, si bien Wren, según Halley, no se sintió satisfecho con la solución. Al año siguiente se le planteó de nuevo a Newton el problema, esta vez por parte de Halley, y más adelante le envió a Halley una demostración de que los planetas se moverían en órbitas elípticas bajo la influencia del campo gravitatorio del Sol. Halley presionó a Newton para que elaborara en detalle su demostración y publicase los resultados. Newton consiguió ahora mostrar que el campo gravitatorio de un cuerpo esférico extenso, como la Tierra o el Sol, sería el mismo que si toda la masa se hallase concentrada en el centro de la esfera, de manera que los cuerpos celestes se podían tratar como puntos pesados. También existían ahora valores más exactos del radio terrestre, de la distancia entre la Tierra y el Sol y otras medidas del sistema solar. Merced a ellas, Newton consiguió mostrar que la fuerza de la gravedad terrestre suministraba exactamente la fuerza centrípeta requerida para mantener a la Luna en su órbita observada. De manera similar demostró que el campo gravitatorio del Sol explicaba los movimientos observados de los planetas según las leyes de Kepler, así como que los cometas se movían en trayectorias aproximadamente parabólicas en torno al Sol. Desarrollando aún más el sistema, Newton sugirió que cada planeta debería estar achatado por los polos y ensanchado por el ecuador debido a su movimiento de rotación. Tal forma, un esferoide oblongo, se observó telescópicamente en el caso de Júpiter, y, por lo que atañe a la Tierra, se infirió del hecho de que el campo gravitatorio de la Tierra era menor en el ecuador que en las regio-

nes próximas a los polos. Dado que la Tierra no era exactamente esférica, Newton mostró que la atracción gravitatoria del Sol y de la luna no habría de pasar por el centro de la Tierra, por lo que haría que el eje terrestre realizase un lento movimiento cónico que daba cuenta de la precesión de los equinoccios. Finalmente, atribuyó las mareas a los efectos gravitatorios diferenciales del Sol y la Luna sobre los océanos, demostrando que las mareas muy vivas se producían en la Luna nueva y en la Luna llena, cuando las tracciones gravitatorias del Sol y la Luna actúan conjuntamente, mientras que las mareas muertas se dan en los cuartos, cuando las tracciones tienden a neutralizarse entre sí.

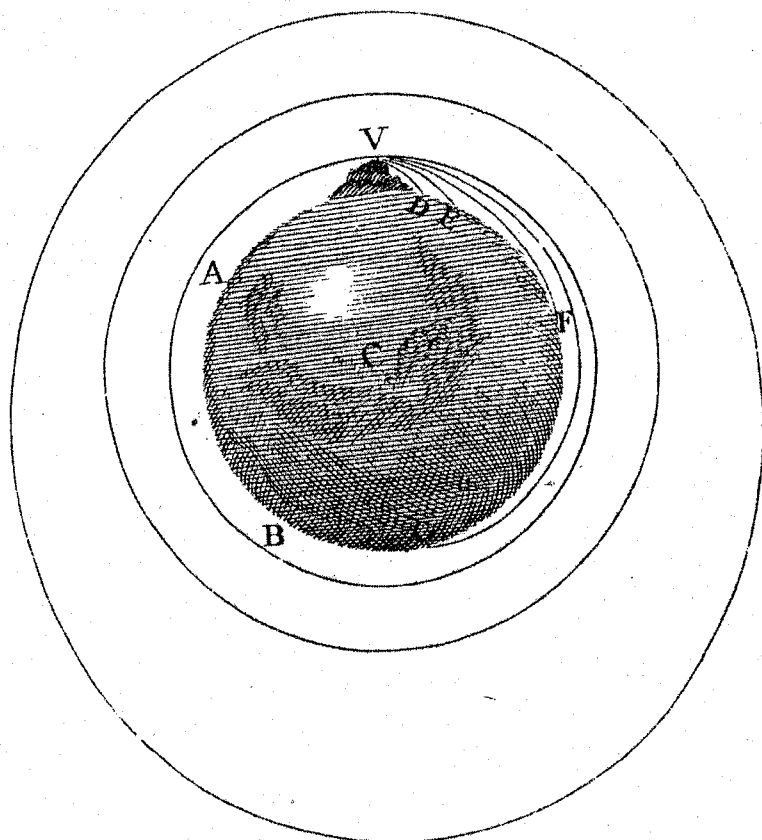
Estas demostraciones se incorporaron a los *Principia Mathematica* que Newton había terminado en 1686. La Sociedad Real trató de publicar la obra, mas no había fondos bastantes, y Hooke, el *curator* de la sociedad, reclamó la prioridad en el descubrimiento de la ley del inverso del cuadrado para la atracción gravitatoria, de modo que Edmund Halley publicó el libro de Newton a sus propias expensas. Hooke expuso de nuevo sus pretensiones en 1693, esta vez ante una reunión de la Sociedad Real. Inmediatamente después, Newton se vio afectado por una enfermedad nerviosa, y cuando se recobró, anunció por vez primera que había realizado sus descubrimientos básicos de la ley de la fuerza centrípeta y de la ley del inverso del cuadrado en 1666. Newton realizó sin duda la contribución aislada más importante a la teoría de la gravitación universal, aunque, como en el caso posterior del descubrimiento del cálculo que culminó en la controversia con Leibniz acerca de la prioridad, Newton era sólo uno de los muchos científicos que trabajaban en el mismo problema, contribuyendo independiente y simultáneamente a su solución.

Al estudiar el problema de la mecánica del sistema solar, Hooke y Newton trabajaron con métodos que diferían un tanto el uno del otro. Hooke pertenecía a la generación de

científicos ingleses que alcanzaron la madurez en el período de la Commonwealth, una generación que estaba poderosamente influida por el punto de vista empírico y utilitario de la filosofía de la ciencia de Bacon. Newton pertenecía a una generación posterior que llegó a la madurez en el período de la Restauración y adoptó una metodología más deductiva, afín a las de Galileo y Descartes. Hooke trató de hallar experimentalmente cómo variaba la fuerza de gravedad entre dos cuerpos en función de la distancia que mediaba entre ellos, midiendo para ello los pesos de los cuerpos a diferentes distancias por encima y por debajo de la superficie de la Tierra. Por el contrario, Newton dedujo probablemente la ley del inverso del cuadrado de la fuerza gravitatoria de la ley de la fuerza centrífuga y de la tercera ley de Kepler del movimiento planetario. En su discusión del método científico, Newton adoptó la opinión de que el punto de partida de las deducciones físico-matemáticas deberían ser hechos experimentalmente observados o leyes, y que las deducciones deberían llevar a la explicación o predicción de otros efectos observables. En el prefacio a los *Principia Mathematica*, escribió: «Toda dificultad en filosofía parece consistir en lo siguiente, en investigar las fuerzas de la naturaleza a partir de los fenómenos de los movimientos y luego, a partir de esas fuerzas, demostrar los otros fenómenos».

Así pues, Newton especificó que en filosofía natural el punto de partida de las demostraciones matemáticas tenían que ser los efectos observados y las leyes del movimiento mecánico. Descartes había defendido la misma opinión, sugiriendo que los fenómenos naturales deberían explicarse en términos mecánicos, ya que nos hallábamos muy familiarizados con las operaciones de las máquinas y otros ingenios mecánicos, debiendo además explicar lo desconocido en términos de lo conocido. Tal método de explicar lo desconocido en términos de lo conocido era explícito en la obra de Newton. Llevó a cabo la conexión que Galileo no





*La combinación de la atracción gravitatoria con diversas velocidades rectilíneas.*

había conseguido establecer, comparando la órbita de un planeta con la trayectoria de un proyectil.

El que los planetas puedan ser retenidos en sus órbitas –escribió– es algo que podemos comprender fácilmente si consideramos los movimientos de los proyectiles. En efecto, una piedra arrojada, por la presión de su propio peso, se ve forzada a abandonar la trayectoria rectilínea viéndose obligada a describir una línea curva en el aire, y merced a este camino torcido se ve finalmente llevada al suelo. Y cuanto mayor sea la velocidad con la que se proyecta, más le-

jos va antes de caer a tierra. Podemos suponer por tanto que la velocidad se incrementa de tal modo que describa un arco de (muchas) millas antes de llegar a la Tierra, hasta que finalmente, excediendo los límites de la Tierra, pasará totalmente sin tocarla.

Así, si la Luna fuese análoga a un proyectil, debería obedecer las mismas leyes y su movimiento debería ser susceptible del análisis que Galileo había hecho del movimiento de los proyectiles; esto es, el movimiento curvo de la Luna debería ser resoluble en dos movimientos rectilíneos simples, regido cada uno de ellos por una ley mecánica. De hecho, el método de Newton se asemeja mucho al empleado por Galileo, tanto en sus aspectos generales, tales como el basar las demostraciones matemáticas en principios dados experimentalmente, como en algunos de sus detalles, como es el procedimiento de resolver los movimientos curvos complejos en movimientos rectilíneos simples.

No obstante, Newton difería de Galileo en que distinguía tajantemente entre los principios dados experimentalmente y los principios dados por intuición. Newton era contrario al método cartesiano de basar las demostraciones científicas en ideas supuestamente seguras e indubitables ofrecidas por intuición al espíritu libre de nubes. Para Newton semejantes ideas eran meras hipótesis, y declaraba que él no usaba hipótesis. Naturalmente, Newton formulaba hipótesis de carácter especulativo, basando en ellas argumentos y demostraciones; mas sostenía que tales especulaciones eran separadas y muy distintas de su filosofía experimental. Así, en una obra posterior, la *Óptica* (1704), Newton puso sus filosofías experimental y especulativa en distintas secciones, adjuntando la última en forma de un cierto número de *Cuestiones* al final de la sección que trataba del trabajo experimental sobre la luz, de modo que el libro constase de dos partes que, por así decir, fuesen respectivamente galileana y cartesiana por lo que atañe al método.



Otros científicos, como Huygens y Leibniz, encontraron difícil apreciar la distinción que Newton había trazado entre filosofía experimental y especulación a partir de hipótesis, y sugirieron que Newton, con su concepción de la gravedad en cuanto fuerza que actuaba a distancia entre los cuerpos, estaba reintroduciendo las cualidades ocultas y las fuerzas espirituales que tan recientemente se habían rechazado por obra de la ciencia natural. Newton respondía que la gravedad era sencillamente un nombre dado a la supuesta causa de la caída de los cuerpos a Tierra, del movimiento de los planetas por órbitas cerradas en torno al Sol, etc., y que la filosofía experimental, careciendo de observaciones pertinentes para ir más lejos, no podía especificar cuál era su causa. Los filósofos experimentales tan sólo podían indicar cómo operaba la gravedad, mostrando en qué medida aumentaba su velocidad un cuerpo en un tiempo dado durante su caída a tierra, etc., tal y como había hecho cuando descubrió que los objetos caían con una aceleración constante. Especular acerca de la «causa» de la gravedad, atribuyéndola a fuerzas ocultas o a vórtices de un éter cósmico, no tenía ningún valor en filosofía experimental, ya que todas esas explicaciones eran por naturaleza hipotéticas.

Decir que cada especie de cosa está dotada de una cualidad específica oculta, mediante la cual actúa y produce efectos manifiestos, es no decir nada —escribió Newton—. Mas derivar dos o tres principios generales del movimiento a partir de los fenómenos, señalando luego de qué manera se derivan de estos principios manifiestos las propiedades y acciones de todas las cosas corpóreas, significaría dar un gran paso en filosofía, y eso aunque aún no se hubiesen descubierto las causas de dichos principios. Por tanto, no tengo el menor empacho en proponer los principios del movimiento arriba mencionados, siendo como son de alcance muy general, dejando sin descubrir sus causas.

Naturalmente, Newton no limitó sus actividades a la filosofía experimental tal y como él la definía, sino que sugirió

hipótesis especulativas para explicar por qué se obedecían las leyes observadas de la mecánica, proponiendo concretamente una «causa» física de la fuerza de la gravedad que se observa entre los cuerpos. En época de Newton, ya no era importante la teoría aristotélica de los fenómenos gravitatorios que sugería que los cuatro elementos trataban constantemente de alcanzar sus lugares asignados en el universo. Más influjo ejercía la teoría cartesiana de que los espacios interplanetarios e interestelares se hallaban embutidos de una materia que se movía con movimiento de torbellino en torno a la Tierra y a cada uno de los cuerpos celestes. Estos vórtices tenían la propiedad de arrastrar a los cuerpos hacia sus centros, de manera que los objetos pesados de la tierra tendían a caer hacia abajo, por ejemplo, mientras que los vórtices que había en torno de los cuerpos celestes mayores, como el Sol, arrastraban en su derredor a los cuerpos menores, como la Tierra y los planetas, de modo que se movían por órbitas cerradas. En sus trabajos posteriores, Newton rechazó la teoría cartesiana basándose en que resultaba incapaz de dar cuenta de la forma precisa de las leyes de Kepler para el movimiento planetario, hallándose en desacuerdo con fenómenos astronómicos del tipo del movimiento de los cometas a través del sistema solar. En lugar de la opinión cartesiana, Newton propuso diversas teorías alternativas para explicar los fenómenos gravitatorios, la más madura de las cuales fue la dada en las *Cuestiones* con que finaliza su *Óptica*. Sugería allí la existencia de un medio etéreo estacionario que llenaba todo el espacio, similar a la atmósfera que rodea a la Tierra, aunque mucho más sutil. Dicho medio se hallaba compuesto por partículas diminutas que se repelían entre sí, siendo repelidas asimismo por las partículas de los cuerpos. Merced a tal repulsión, el medio etéreo resultaba raro dentro de los intersticios de los objetos masivos, como los cuerpos celestes, tornándose más denso en el espacio que rodea a dichos cuerpos a medida que aumentaba la distancia a ellos.

Así, el medio etéreo dentro de un objeto pesado situado a cierta distancia de la Tierra sería más denso en la parte contraria a la Tierra que en la que mira hacia ella y, gracias al efecto repulsivo del medio etéreo, el objeto caería hacia la Tierra.

Newton calculó que si la densidad media del éter fuese  $1/700.000$  de la del aire, y si fuese proporcionalmente más elástico, entonces la resistencia del medio al movimiento de los cuerpos sería muy pequeña, de hecho  $1/600.000$  de la del agua, con lo que no habría alteración sensible en los movimientos de los planetas debida a la resistencia de la fricción, ni siquiera al cabo de diez mil años. No obstante, tras períodos de tiempo prolongadísimos, los planetas se frenarían gradualmente y el movimiento en general se perdería en el universo debido a los efectos de la fricción. De este modo, la cantidad de movimiento del universo no podría ser constante, tal y como había supuesto Descartes, por lo que el mundo en su conjunto no podía ser una máquina perfecta autosuficiente. Por consiguiente, Newton sugería que la divinidad reponía constantemente el movimiento perdido en el universo por fricción, corrigiendo las perturbaciones del tipo de las provocadas por los planetas y cometas que desordenaban las órbitas de los demás. Según Newton, Dios estaba presente en todas partes en todo momento, de manera que fuese donde fuese donde se produjese el desorden del universo, resultaba observado y corregido.

La divinidad –escribía Newton– perdura por siempre y en todas partes se halla presente, y al existir siempre y en todo lugar, constituye la duración y el espacio [...]. Gobierna todas las cosas y conoce todo cuanto es y cuanto se puede hacer [...]. Y estando en todo lugar, es más capaz de mover los cuerpos mediante su voluntad dentro de su sensorio uniforme e ilimitado, formando así y reformando las partes del universo, de lo que nosotros somos capaces de mover las partes de nuestro cuerpo mediante nuestra voluntad.

Aquí Newton se aproximó al punto de vista mecánico-pañetista defendido por el filósofo holandés Spinoza, 1632-1677. Desde un punto de vista teológico, Newton resultaba más bien heterodoxo, ya que era unitario, rechazando la doctrina de la Trinidad divina, al igual que otras figuras sobresalientes de la primitiva tradición científica moderna, como era el caso de Servet, 1509-1553, John Locke, 1632-1704, y Joseph Priestley, 1733-1804.

Aunque Newton siempre pretendía que él no usaba hipótesis especulativas en su filosofía experimental, con todo, con su doctrina de que la divinidad constituía la duración y el espacio no menos que con su teoría de que había un medio etéreo que invadía todo el espacio, dejó que sus hipótesis influyesen y diesen forma a su ciencia. Ellas lo llevaron a postular que el tiempo, el espacio y el movimiento eran magnitudes absolutas que podían determinarse en principio por respecto a algo fijo e inmóvil en el universo. Para Newton las entidades estacionarias e inmóviles del universo eran la divinidad, cuya existencia constituía el tiempo y el espacio, y el medio etéreo que llenaba todo el espacio:

El Padre –escribió Newton– es inmóvil, no existiendo ningún lugar susceptible de tornarse más vacío o más lleno de él de lo que lo está por la eterna necesidad de la naturaleza. Todos los demás seres son movibles de un lugar a otro.

Tal opinión de que el tiempo, el espacio y el movimiento eran magnitudes absolutas persistió hasta el siglo XX, pues en todas las teorías subsiguientes que entrañaban un medio etéreo que llenaba el espacio había un conjunto de sistemas u observadores en el universo que podían medir en principio las velocidades absolutas; a saber, los que se hallaban en reposo en el éter cósmico.