

LA MANZANA DE NEWTON... O COMO SE DESCUBRIO LA LEY DE LA GRAVITACION UNIVERSAL

Shahen Hacyan

Instituto de Astronomía, UNAM.

Apartado Postal 70-264. 04510 - México, D.F.

RESUMEN

Newton llegó al concepto de la gravitación universal en los años 1684-1685, durante la preparación de los Principia. El presente artículo reseña este descubrimiento, así como los intentos anteriores a Newton para explicar el movimiento planetario, con cierto énfasis en la contribución de Hooke.

ABSTRACT

Newton reached the concept of universal gravitation during the years 1684-1685, while preparing the Principia. This article presents a review of this discovery and of previous efforts to explain the motions of the planets, with some emphasis on Hooke's contribution.

Nature and Nature's Laws lay hid in night;
 God said, Let Newton be! - And all was light.

Alexander Pope

I. INTRODUCCION

Según una leyenda bien conocida, estaba Isaac Newton sentado debajo de un manzano, cavilando sobre la fuerza que mantiene unida la Luna a la Tierra, cuando vió caer una manzana. Este suceso le permitió descubrir que la fuerza que atrae a la manzana es la misma que actúa sobre la Luna, y así descubrió el principio de la gravitación universal.

Sin embargo, esta leyenda no resiste un examen crítico. El descubrimiento de la gravitación universal no se debió a un instante de inspiración genial, sino a una exhaustiva labor de investigación basada en conocimientos matemáticos que sólo Newton poseía en el siglo XVII. Así mismo, no pueden despreciarse del todo las contribuciones de otros científicos, anteriores o contemporáneos de Newton; darles el crédito que merecen, lejos de aminorar la obra de Newton, da un punto de referencia a partir del cual juzgarla.

La manzana de Newton, al igual que el baño de Arquímedes, ha contribuido a fomentar la idea de que los grandes descubrimientos científicos se dan casualmente, en un destello de genialidad. A muchos investigadores les gustaría esperar cómodamente a su musa debajo de un manzano o en una tina de baño. Sin embargo, una versión más apegada a la verdad de lo que fue uno de los descubrimientos científicos más importantes de la historia nos puede ayudar a comprender en términos más justos cómo se da el progreso científico.

Hablar de la gravitación universal implica hablar de Isaac Newton, así que una buena parte de este ensayo versará sobre este científico. No intentaremos hacer una biografía de él, pero sí trataremos de señalar algunos rasgos característicos de su peculiar personalidad. Pero antes, hablemos de sus predecesores.

II. DE ARISTOTELES A HOOKE

Primero que nada es necesario enfatizar que, hasta antes de Newton, nunca se pensó que pudiera existir alguna relación entre la atracción gravitacional y el movimiento de los planetas. Así, Aristóteles, considerado la máxima autoridad científica durante la Edad Media, distinguió claramente entre los fenómenos terrestres y los celestes. Para Aristóteles, la gravitación era una tendencia de los cuerpos terrestres a ocupar su "lugar natural", que es el centro de la Tierra. Es evidente que, dentro de este esquema, la gravitación es un fenómeno puramente terrestre y que no puede haber atracción gravitacional entre la Tierra y un cuerpo celeste, pues no hay ninguna afinidad entre ellos. Muy distinto es el problema del movimiento de los astros; este movimiento lo explicaba Aristóteles por medio de esferas transparentes que supuestamente sostienen a los planetas, al Sol, a la Luna y a las estrellas.

Como se sabe, el primer golpe al sistema aristotélico lo asestó Copérnico; la revolución copernicana marca el inicio de la nueva ciencia. Sin entrar en detalles para no desviarnos del tema de este artículo, señalaremos que Copérnico, si bien describió correctamente el movimiento de los planetas, nunca intentó explicarlo por medio de algún mecanismo físico.

El modelo de Copérnico fue defendido por Galileo con múltiples argumentos. El mismo Galileo estudió detenidamente la caída de los cuerpos, pero nunca sospechó que hubiera una relación entre este problema y el movimiento de los planetas. Galileo creía que la gravitación es una fuerza estrictamente constante (homogeneidad del espacio) y su explicación de este fenómeno no iba más allá de la de Aristóteles. Por otra parte, sostenía que los planetas se mueven en círculos debido a que el movimiento circular es homogéneo en todo punto y que, por lo tanto, es el único estable. Este concepto de la supuesta perfección del movimiento circular había de subsistir hasta tiempos de Newton.

Kepler, después de descubrir sus famosas tres leyes, elaboró una teoría para explicar el movimiento de los planetas⁽¹⁾. Desgraciadamente, su teoría estaba plagada de errores, pero vale la pena describirla pues tuvo bastante aceptación en su época y es un buen punto de referen-

cia para juzgar la aportación newtoniana. Kepler notó que la velocidad de un planeta en el afelio y en el perihelio varía en relación inversa a la distancia al Sol (hoy en día, sabemos que esto se debe a la conservación del momento angular $L = mrv_{\phi}$); de aquí dedujo, erróneamente, que la velocidad total satisface la misma relación. Ahora bien, según Aristóteles, se necesita aplicar cierta fuerza a un cuerpo para mantener su velocidad constante (sabemos ahora que esto se debe a la fricción). Siguiendo este concepto aristotélico, Kepler dedujo que debería de haber en el espacio una fuerza motriz cuya intensidad varía en relación inversa a la distancia al Sol (nótese otro error fundamental: el momento angular es constante para cada planeta por separado). Kepler supuso que la fuerza que mueve los planetas emana del Sol y sugirió que era una fuerza magnética o casi-magnética, aunque nunca precisó qué entendía por eso.

El siguiente intento de explicar el movimiento de los planetas vino de Descartes, quien propuso la teoría de los torbellinos etéreos. Según esta teoría el cosmos está lleno de una sutil sustancia, el éter, casi intangible; la materia común es una condensación de este éter. El movimiento de los planetas se debe a que alrededor del Sol existen enormes torbellinos de éter que arrastran a los planetas, tal como un remolino arrastra un corcho. Los torbellinos cartesianos estuvieron muy en boga durante el siglo XVII, hasta que Newton les asestó un golpe mortal en el libro II de los Principia.

Hasta antes de que se conociera el sistema newtoniano, el intento más próximo a la realidad que hubo para explicar el movimiento planetario fue el de Robert Hooke. Este científico inglés, sin duda el físico experimental más importante de su siglo, curador de experimentos de la Royal Society, hizo innumerables contribuciones a la ciencia. Pero la historia ha sido injusta con él: la mayor desgracia de Hooke fue ser contemporáneo de Newton y ver su fama eclipsada por la de su terrible rival.

Hooke se interesó en muchísimos temas científicos, siempre proponiendo ideas originales y vislumbrando la solución correcta de muchos problemas. Sin embargo, su misma versatilidad le impidió profundizar en los trabajos que realizaba. Hooke siempre veía con amargura cómo otros se adjudicaban la fama de desarrollar las ideas que él sólo había podido esbozar. El caso de la gravitación fue típico.

Hooke publicó en 1674, doce años antes de la aparición de los Principia, un libro intitulado An Attempt to Prove the Motion of the Earth by Observations en el que, por primera vez, se planteaba correctamente el problema del movimiento planetario. Sus suposiciones eran:

... First, that all celestial bodies whatsoever, have an attraction or gravitating power towards their own centers, whereby they attract not only their own parts, and keep them from flying from them, as we may observe the earth to do, but that they do also attract all other celestial bodies that are within the sphere of their activity... The second supposition is this. That all bodies whatsoever that are put into a direct and simple motion will so continue to move forward in a straight line, till they are by some other effectual powers deflected, and bent into a motion, describing a circle, ellipsis, or some other more compounded curve line. The third supposition is, that these attractive powers are so much the more powerful in operating, by how much the nearer the body wrought upon is to their own centers. Now what these several degrees are I have not yet experimentally verified...(2)

Nótese cómo Hooke intuye el fenómeno gravitacional, además de adelantarse a la primera ley de Newton. Pero Hooke no habla de fuerzas centrífugas y su descripción de la fuerza de atracción no pasa de ser cualitativa. Con todo lo que tiene de profético su planteamiento, Hooke nunca pudo profundizar más en el problema. De ahí a un sistema bien fundamentado, cuantitativo y basado en el rigor matemático hay un larguísimo trecho que sólo un hombre en aquella época, Newton, podía recorrer.

III. ISAAC NEWTON

Newton⁽³⁾ nació en 1642 en una aldea llamada Woolsthorpe, en el Lincolnshire. Su padre, un rico granjero, murió antes de que naciera su ilustre vástago; su madre se volvió a casar poco después, dejándolo al cuidado de sus abuelos. A los quince años, Newton ingresó a la escuela pública de Grantham, cerca de su aldea. Quizás lo único que vale la pena mencionar de aquella época es que el joven Isaac demostró tener una sorprendente habilidad manual para construir toda clase de artefactos.

A los dieciocho años fue admitido en el Trinity College de Cambridge. Ahí habría de pasar los próximos 35 años de su vida: los prime-

ros siete en calidad de estudiante, hasta obtener el grado de Maestro en Artes; el resto del tiempo como fellow y profesor lucasiano de matemáticas.

Newton fue un hombre con una prodigiosa capacidad de trabajo. Cuando estaba absorto en un tema, se olvidaba hasta de dormir o de comer. Nunca llegó a casarse y fue de trato muy difícil. Contra lo que podría pensarse, la física y las matemáticas ocuparon sólo una parte de su actividad intelectual. Newton se interesó principalmente en la alquimia y en la teología. Para Newton, un hombre extrañamente místico, el objeto de la investigación científica era comprender la obra de Dios y entrar, así, en una especie de comunicación con El. Newton dejó a su muerte una cantidad impresionante de manuscritos que versaban sobre muy diversos temas: física, matemáticas, experimentos de alquimia, tratados teológicos, estudios históricos, etc., etc. Lo impresionante es que rara vez intentó durante su vida publicar algo de todo lo que escribió, y si accedió a hacer pública una pequeña parte de sus escritos fue casi siempre bajo presiones o estímulos externos.

En 1665, cuando Newton era estudiante de Cambridge, una epidemia de peste asoló Inglaterra. En aquella época se había descubierto empíricamente que la enfermedad se propagaba más rápidamente en los lugares densamente poblados; así que, al presentarse una epidemia, se evacuaban las ciudades y se dispersaba a la gente por el campo. Fue de ese modo como Cambridge permaneció cerrado durante casi dos años, tiempo que Newton pasó en su aldea natal. Ahí, alejado del mundanal ruido, inició su vida científica. Según la historia aceptada comúnmente, fue durante el llamado annus mirabilis de 1666 cuando el joven de 24 años inventó el método de las fluxiones (el cálculo diferencial e integral), descubrió la composición de la luz blanca (primer paso hacia una ciencia óptica) y, finalmente, encontró la ley de la gravitación universal.

Se han conservado numerosos manuscritos de Newton que demuestran, sin lugar a dudas, que ya había desarrollado el método de las fluxiones en aquella época, llegando a demostrar el teorema fundamental del cálculo (la derivación y la integración son operaciones inversas). Sin embargo, guardó para sí y nunca publicó lo que fue uno de los descubrimientos matemáticos más importantes de la historia. Sólo después de cuarenta años

desempolvó Newton sus manuscritos en aquel famoso pleito con Leibnitz sobre la prioridad del cálculo diferencial e integral.

También se tienen evidencias de que efectivamente Newton inició en aquella época sus experimentos con prismas y descubrió la descomposición de la luz.

El tema del descubrimiento de la gravitación universal lo trataremos en la siguiente sección.

A su regreso a Cambridge, Newton prosiguió con sus estudios sobre matemáticas y óptica. En 1671 construyó, con sus propios medios, un telescopio reflector que obsequió a la Royal Society, en aquel entonces una incipiente sociedad dedicada a la nueva ciencia. La acogida que tuvo el instrumento fue sumamente entusiasta y se decidió inmediatamente aceptar a Newton como miembro de la sociedad. Animado, Newton decidió mandar una segunda obra suya a la Royal Society: el famoso tratado sobre la naturaleza de la luz, fruto de sus experimentos con prismas. Esta vez, la acogida al trabajo fue decepcionante: Hooke y otros atacaron ferozmente la teoría de Newton, que contradecía sus propias teorías. Este incidente marca el principio de la enemistad entre Hooke y Newton. Si bien hubo un intento de reconciliación en 1676, la tregua duraría sólo hasta la publicación de los Principia, como veremos más adelante.

IV. LA MANZANA Y LA LUNA

Veamos ahora, con más detalle, el supuesto descubrimiento de la gravitación universal que hizo Newton en 1666, sentado debajo de un manzano. Al parecer, la historia de la manzana la narró el mismo Newton, poco antes de su muerte a los 85 años. En palabras de Conduitt, su sobrino político, quien intentó escribir una biografía de su ilustre tío:

In the year 1666, he retired again from Cambridge... to his mother in Lincolnshire and whilst he was musing in a garden it came into his thought that the power of gravity (which brought an apple from the tree to the ground) was not limited to a certain distance from the earth but that this power must extend much farther than was usually thought. Why not as high as the moon said he to himself and if so that must influence her motion and perhaps retain her in her orbit... (4)

La manzana también aparece en las Lettres Philosophiques de Vol-

taire, quien conoció a la sobrina de Newton durante una estancia en Inglaterra.

Según Conduitt, Newton habría hecho el siguiente razonamiento: conociendo la aceleración centrífuga de la Luna, que debe ser igual en magnitud a la aceleración gravitacional de la Tierra a esa distancia, compárese ésta con la aceleración gravitacional en la superficie de la Tierra; si una ley del cuadrado inverso es válida, la razón entre las dos aceleraciones debe ser igual a la razón al cuadrado del radio terrestre y del radio de la órbita lunar. Sin embargo, según Conduitt, Newton desconocía el valor exacto del radio terrestre y sus cálculos no daban resultados correctos. Por ello los habría puesto de lado y sería sólo veinte después, justo antes de escribir los Principia, cuando Newton habría rehecho sus cálculos, usando un valor más exacto para el radio terrestre, y descubierto que su teoría era correcta.

Hasta hace varios años, ésta era la explicación aceptada de por qué Newton tardó veinte años, desde el annus mirabilis de 1666 hasta la publicación de los Principia en 1686, para anunciar su descubrimiento de la gravitación universal. Sin embargo, se ha demostrado que Newton conocía el valor correcto del radio terrestre, si no en 1666, poco después⁽⁵⁾; inclusive llegó a editar personalmente la Geografía de Varenius en 1672, en donde el valor correcto está dado. Entonces, otra vez: ¿por qué tardó Newton veinte años en anunciar su descubrimiento? Quizás porque no le satisfacía enteramente su teoría, pues no era obvio por qué un objeto tan grande como la Tierra puede atraer exactamente hacia su centro según una ley del cuadrado inverso. Sería muchos años después cuando Newton lograría demostrar que una esfera atrae gravitacionalmente como si toda su masa estuviera concentrada en su centro.

Veamos ahora la versión moderna de esta historia, basada en los manuscritos de Newton que se han estudiado recientemente⁽⁶⁾. En primer lugar hay que señalar que la fórmula para la aceleración centrífuga ($a = v^2/r$) fue publicada por primera vez en 1673 por Huygens; pero Newton ya la había descubierto independientemente en 1665 (aunque, por supuesto, nunca lo hizo público): se conserva un manuscrito que así lo confirma. Nótese que esta fórmula es fundamental para deducir una ley del cuadrado inverso: en efecto, según la tercera ley de Kepler $p^2 \propto r^3$ —y como la ve-

locidad es $v = 2\pi r/P$ y, por lo tanto, la aceleración centrífuga es $a = (2\pi)^2 r/P^2$ resulta que $a \propto 1/r^2$.

Existe un manuscrito de Newton, de alrededor de 1669, en el que utiliza su fórmula de la aceleración centrífuga para atacar varios problemas. Primero, Newton calcula la aceleración centrífuga en la superficie de la Tierra y la compara con la aceleración gravitacional. Esto viene al caso porque una objeción de los aristotélicos en contra del sistema heliocéntrico era que la rotación de la Tierra arrojaría al espacio los objetos que se encuentren en su superficie. Newton demostró que esa aceleración es despreciable con respecto a la gravitacional. Después, Newton calculó la aceleración centrífuga de la Luna y la comparó con la aceleración centrífuga en el ecuador terrestre y con la aceleración gravitacional en la superficie de la Tierra. Finalmente, calculó la aceleración centrífuga de los planetas al girar alrededor del Sol⁽⁶⁾.

Se podría pensar a primera vista que Newton ya estaba intuyendo la atracción gravitacional, pero un examen minucioso del manuscrito revela lo contrario⁽⁶⁾. En ningún momento habla Newton de una fuerza que atraiga los planetas al Sol o la Luna a la Tierra; se conforma con sólo calcular sus aceleraciones centrífugas. Pero sería absurdo no considerar alguna fuerza de atracción que compense la aceleración centrífuga para mantener los cuerpos celestes en sus órbitas. Obviamente Newton pensó en ese problema, pero si no lo menciona en su manuscrito es porque desconocía la naturaleza de tal fuerza. En otros manuscritos de esa época, llegó incluso a considerar los torbellinos de Descartes. Estamos aún muy lejos del concepto de la gravitación universal.

Más aún, en 1675, en un artículo intitulado Hypothesis Explaining the Properties of Light, Newton desarrolla una teoría para explicar la gravitación en términos de condensaciones del éter. Una lectura cuidadosa demuestra que su teoría es incompatible con una gravitación universal⁽⁶⁾.

V. LA CORRESPONDENCIA HOOKE-NEWTON

En 1679, Hooke fue electo secretario de la Royal Society. A fines de ese año, en su calidad de secretario, escribió una amabilísima carta a Newton en la que le invitaba a reanudar su correspondencia con la Ro-

yal Society⁽⁷⁾. Así mismo Hooke pedía a Newton su opinión sobre su teoría del movimiento planetario (la misma que citamos en la sección II).

Newton no tardó en contestar⁽⁸⁾. Se disculpó con Hooke por no tener material que mandarle, ya que, alegó, hace tiempo que había abandonado a la filosofía natural (...having thus shook hands with philosophy, and being also at present taken of with other business,...). Asimismo declaró desconocer la teoría de Hooke (lo cual no parece ser cierto) y, por lo tanto, no poder opinar sobre ella. Sin embargo, quizás por cortesía, Newton propuso a Hooke un experimento que había ideado para demostrar el movimiento de la Tierra (...a fancy of my own about discovering the earth's diurnal motion). Si se tira un proyectil desde lo alto de una torre, éste debe tener una velocidad horizontal ligeramente mayor que en el suelo debido a la rotación de la Tierra; por lo tanto, el proyectil no caería verticalmente sino un poco hacia el Este. En su carta, Newton describe la trayectoria del proyectil como una espiral que termina en el centro de la Tierra (Fig. 1), aunque no está nada obvio en su carta qué entiende por esa trayectoria dentro de la Tierra. Quizás estaba pensando inconscientemente en el "lugar natural" de los cuerpos según Aristóteles.

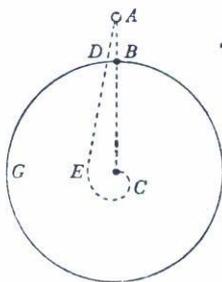


Fig. 1

Hooke tomó muy en serio el experimento propuesto por Newton y leyó su carta en una sesión de la Royal Society. Pero, atrevimiento imperdonable, se permitió señalar una falla en el razonamiento de Newton y corregirla en público. En su respuesta a Newton del 28 de diciembre de 1679, Hooke⁽⁹⁾ le aclara que un proyectil que cae a través de la Tierra sin resistencia (suponiendo que el planeta se hubiera rebanado en dos) no

describiría una espiral, como cree Newton, sino una especie de elipsoide (a kind Elleptueid) AFGH (Fig. 2), pero que si hubiera resistencia, la curva sería una espiral AIKLMNOPC. Más aún, lo anterior sería cierto para un proyectil lanzado desde el ecuador, pero si el experimento se realiza en una latitud como la de Londres, el proyectil debería caer al sureste de la perpendicular y no al este, como cree Newton.

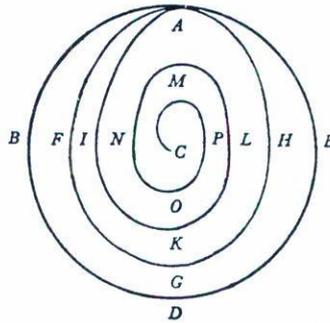


Fig. 2

La carta de Hooke desagradó profundamente a Newton, como él mismo lo narraría años después. De todos modos, se tomó la molestia de contestarla (Fig. 3):

Sir

I agree with you that the body in our latitude will fall more to the south than east if the height it falls from be any thing great. And also that if its gravity be supposed uniform it will not descend in a spiral to the very center but circulate with an alternate ascent and descent made by its vis centrifuga and gravity alternately overballancing one another. Yet I imagine the body will not describe an Ellipsoeid but rather such a figure as is represent by AFOGHJKL⁽¹⁰⁾ ...*

Nótese cómo Newton supone que la fuerza gravitacional en el interior de la Tierra es constante. Esto permite a Hooke corregirlo una vez más: en su tercera carta, leemos lo que es el pasaje más significativo en toda esta correspondencia:

* Subrayado del autor.

Your calculation of the curve by a body attracted by an aequall power at all distances from the center such as that of a ball rouling in a inverted concave cone is right and the two auges (apsides) will not unite by about a third of a revolution. But my supposition is that the attraction always is in a duplicate proportion to the distance from the center reciprocally, and consequently that the velocity will be in a subduplicate proportion to the attraction and consequently as Kepler supposes reciprocally to the distance⁽¹¹⁾.

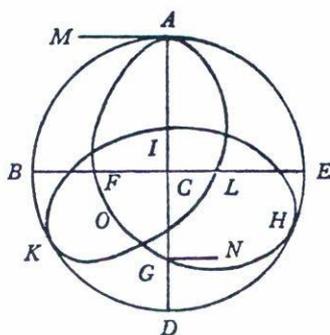


Fig. 3

Es muy notable que aquí aparece por primera vez la ley del cuadrado inverso; se podría pensar, a primera vista, que Hooke ya había descubierto el significado de esa ley. Sin embargo, una lectura de la frase completa demuestra que tenía las ideas totalmente confusas⁽¹²⁾. En realidad, lo que Hooke llamó atracción es la aceleración multiplicada por la distancia, o sea, en lenguaje moderno, el trabajo por unidad de masa para un cuerpo uniformemente acelerado. La fórmula de Galileo para el movimiento uniformemente acelerado es $v^2 = 2ar$, así que, según Hooke, la atracción es proporcional a v^2 , y v es proporcional a $1/r$. A partir de este concepto falso Hooke obtuvo la falsa ley de Kepler de las velocidades.

¿Y de dónde sacó Hooke la ley del cuadrado inverso? La versión más favorable para él es que la obtuvo correctamente al combinar la fórmula de la aceleración centrífuga de Huygens (publicada en 1673) con la tercera ley de Kepler. El mismo Newton sugirió, algunos años después, una versión menos favorable: Hooke habría obtenido esa ley por simple analogía con la fórmula de la intensidad de la luz pues estaba pensando en

términos de la teoría kepleriana de una fuerza motriz emitida por el Sol.

Dos semanas después, Hooke volvió a escribir a Newton con el pretexto de que ya había realizado el experimento del proyectil que cae. Ahí insiste en que sería interesante conocer la trayectoria de un cuerpo que cae atraído con una aceleración inversamente proporcional al cuadrado de la distancia y expresa su convicción de que Newton, con su habilidad matemática, sería capaz de resolver ese problema.

¡Y Newton lo resolvió! Invirtiendo el problema, demostró que si un cuerpo se mueve a lo largo de una elipse, necesariamente la fuerza que se le aplica en todos los puntos es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al foco de la elipse. Y, habiéndose convencido a sí mismo, guardó el manuscrito y se olvidó de él. ¡Ni siquiera se dignó contestar a Hooke para comunicarle su descubrimiento!

VI. LOS PRINCIPIA

Acto final: algunos años más tarde, en 1684, se reúnen en una taberna londinense el arquitecto Christopher Wren, el astrónomo Edmund Halley y Robert Hooke para discutir sobre el tema del movimiento de los planetas.

Tanto Halley como Wren se habían dado cuenta de que la fórmula de la aceleración centrífuga combinada con la tercera ley de Kepler implicaba una aceleración inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Sin embargo, ese razonamiento era válido sólo para una órbita circular. ¿Cómo sería una órbita en general si tal ley se aplica? Este es un problema que no tiene nada de trivial. Hooke presumió de que lo había resuelto, pero sus compañeros no le creyeron. Finalmente, Wren ofreció un libro como premio al que resolviera primero ese problema.

A Halley se le ocurrió consultar a Isaac Newton, de cuya fama como matemático había oído hablar. Llegó a Cambridge en agosto de 1684 y planteó inmediatamente el problema al ilustre profesor: ¿Cuál sería la curva descrita por un planeta suponiendo que la fuerza de atracción hacia el Sol es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a éste? Newton contestó inmediatamente: una elipse. Halley, sorprendido, le preguntó cómo lo sabía y Newton le dijo que lo había calculado algunos años

atrás. Buscó entre sus papeles la demostración, pero no la encontró. Sin embargo, le prometió a Halley que volvería a hacer los cálculos y le mandaría pronto la demostración.

Newton cumplió su palabra. En noviembre del mismo año, Halley recibió un manuscrito de 9 hojas intitulado De motu corporum in gyrum (Del movimiento de los cuerpos en órbita). Ahí se demostraba que una ley del cuadrado inverso implica una órbita elíptica y, en general, las tres leyes de Kepler.

Esta vez, Newton quedó totalmente fascinado por su obra y entró de lleno a escribir los Principia. Esta increíble tarea le absorbió todo su tiempo durante casi dos años. En ese período, Halley, tan emocionado como él, lo visitó varias veces en Cambridge para animarlo y enterarse del desarrollo de la obra.

Veamos con un poco de detalle cómo y cuándo surgió en la mente de Newton la idea de una gravitación universal⁽¹³⁾. Se conservan actualmente tres versiones del manuscrito de Motu. Al parecer, el método de trabajo de Newton fue reescribir varias veces este manuscrito, adicionando cada vez nuevo material, hasta que surgieron los Principia después de dos años de intensísimo trabajo durante los cuales Newton se desconectó prácticamente del mundo.

En la primera versión del de Motu se ve inmediatamente que Newton no tiene aún el concepto de la gravitación universal. Habla de fuerzas centrípetas que mantienen a los planetas en órbita alrededor del Sol, y aun a los satélites alrededor de los planetas, pero nunca menciona una interacción de los planetas entre sí o con el Sol. La posibilidad de que las órbitas se vean perturbadas por esa interacción no se considera en lo más mínimo, y una de las razones es que Newton no tenía aún un concepto claro de la masa. Así escribe, por ejemplo:

For gravity is one kind of centripetal force: and my calculations reveal that the centripetal force by which our moon is held in her monthly orbit around the earth is to the force of gravity at the surface of the earth very nearly as the reciprocal of the square of the distance from the center of the earth^{(14)*}.

* Subrayado del autor.

Más adelante⁽¹⁴⁾, habla de la casí-proporcionalidad de la cantidad de materia y el peso de un cuerpo. Es claro que sin un concepto correcto de masa no se puede definir la fuerza. Sin embargo, Newton decide hacer un experimento con péndulos de diferentes materiales y se convence, al fin, de que (en lenguaje moderno) la masa inercial es siempre proporcional a la masa gravitacional. Newton entiende inmediatamente las consecuencias de este hecho fundamental: la tercera ley de Kepler se aplica a los planetas y aun a sus satélites, debido a esta proporcionalidad entre la masa inercial y la gravitacional de los cuerpos celestes (y esto implica una ley universal de la gravitación! Este descubrimiento fundamental sucedió en algún momento durante los años de 1684-85.

Ahora, todo se hace más claro: todos los cuerpos materiales se atraen mutuamente y esto, a su vez, es consecuente con la tercera ley de Newton. Por si queda alguna duda, Newton pregunta al astrónomo Flamsteed si ha detectado una perturbación de las órbitas de Júpiter y Saturno cuando están más próximos entre sí. La respuesta de Flamsteed es afirmativa.

Sólo faltaba un pedazo del rompecabezas: ¿cómo atrae una masa que no es puntual? Newton logra demostrar que si una ley del cuadrado inverso es válida para cada pedazo de materia, una esfera atrae según la misma ley como si su masa estuviera concentrada en su centro.

Así, Newton había descubierto la gravitación universal, había explicado el movimiento de los planetas y, de paso, fundado una nueva ciencia: la física.

Finalmente, el 28 de abril de 1686, el manuscrito intitulado Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, fue oficialmente presentado a la Royal Society. El impacto que causó fue enorme, como era de esperarse. La Royal Society decidió inmediatamente comisionar a Halley para encargarse de la edición. Sin embargo, las arcas de la sociedad estaban vacías y Halley tuvo que hacerse cargo hasta del financiamiento de la publicación de los Principia, a pesar de que no era un hombre rico.

El único incidente desagradable fue que Hooke, una vez más, acusó de plagio a Newton. Si bien aceptó la originalidad de los cálculos presentados, argumentó que las ideas básicas de las que partió Newton eran suyas. La respuesta de Newton fue violenta: negó categóricamente que Hooke tuviera nada que ver con su trabajo, excepto el tiempo que le hizo

perder con su correspondencia de 1679-80. Más aún, amenazó con suprimir el libro tercero de los Principia, que estaba por terminar, aquél en el que presentaba su sistema del mundo. Fue necesaria toda la diplomacia de Halley para calmar al irascible Newton y lograr que los Principia aparecieran publicados finalmente en 1687. En la versión final, Newton había borrado toda mención de Hooke. Esta vez no habría reconciliación entre los dos hombres.

La publicación de los Principia señala el nacimiento de la física como la ciencia que conocemos hoy en día. Una excelente descripción de este acontecimiento nos la da el gran historiador de la ciencia Alexandre Koyré:

La pregunta: A quo moveantur planetae?... se unió al problema famoso: A quo moveantur projecta?... Y se puede decir que la ciencia moderna, unión de la física celeste y de la física terrestre, nació el día en que la misma respuesta pudo darse a esta doble pregunta^{(15)*}.

REFERENCIAS

1. Astronomia Nova, (Heidelberg, 1609) citado en A. Koyré, "La Gravitation universelle de Kepler à Newton", Arch. Inst. d'Histoire des Sciences, 4 (1951) 638.
2. An Attempt to prove the motion of the Earth by Observation, London (1679); el párrafo completo está citado en: A. Koyré, Newtonian Studies, University of Chicago Press, Chicago (1965) p. 182.
3. La más reciente y mejor biografía de Newton es la de R.S. Westfall: Never at Rest, A Biography of Isaac Newton, Cambridge University Press, Cambridge (1980). Ahí se da bibliografía adicional.
4. Citado en la Ref. 3, p. 154.
5. F. Cajori, en Sir Isaac Newton 1727-1927, Waverley Press, Baltimore (1928) p. 127.
6. C.A. Wilson, "From Kepler's Laws, So - called, to Universal Gravitation: Empirical Factors", Arch. Hist. Exact Sci., 6 (1970) 89.
7. Texto completo de la carta en: Koyré, Ref. 2, pp. 229-230.
8. Koyré, pp. 238-241.
9. Koyré, pp. 247-250.
10. Koyré, pp. 251-252.
11. Westfall, p. 386.
12. R.S. Westfall, "Hooke and the Law of Universal Gravitation", British Jour. for the Hist. of Sci., 3 (1967) 245.

* Traducción del autor.

13. J. Herivel, The Background to Newton's Principia, Oxford (1965); Westfall, cap. 10; I.B. Cohen, "Newton's Discovery of Gravity", Scientific American, 244, num. 3, p. 123. (Traducción al español en: Ciencia y Desarrollo, nov-dic 1981, p. 153).
14. Westfall, cap. 10.
15. Koyré, Ref. 1.