DRAKONTOS

LAS MATEMÁTICAS DEL COSMOS

IAN STEWART

CRÍTICA

Las matemáticas del cosmos

Ian Stewart

Traducción castellana de Laura Sánchez

CRÍTICA
BARCELONA

Primera edición: febrero de 2017

Las matemáticas del cosmos
Ian Stewart

Título original: *Calculating the Cosmos. How Mathematics Unveils the Universe*

Av. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona (España)
Crítica es un sello editorial de Editorial Planeta, S. A.

editorial@ed-critica.es
www.ed-critica.es

ISBN: 978-84-16771-51-6
Depósito legal: B. 887 - 2017
2017. Impreso y encuadernado en España por Huertas Industrias Gráficas S. A.

Índice

1

Atracción a distancia

Macavity, Macavity, no hay nadie como Macavity. Ha roto toda ley humana, rompe la ley de la gravedad.

THOMAS STEARNS ELIOT,
El libro de los gatos habilidosos del viejo Possum

¿Por qué se caen las cosas?

Algunas no se caen. Macavity, obviamente, no, ni el Sol, la Luna y casi todo lo que se encuentra «ahí arriba» en el cielo. Aunque a veces caen rocas del cielo, como descubrieron los dinosaurios para su consternación. Aquí abajo, si se quiere ser quisquilloso, los insectos, los pájaros y los murciélagos vuelan, pero no indefinidamente. Prácticamente todo lo demás se cae, a menos que algo lo esté sujetando. Pero ahí arriba, nada lo sujeta, y aun así no se cae.

Lo de ahí arriba parece muy diferente de lo de aquí abajo.

Se necesitó un golpe de genialidad para darse cuenta de que lo que hace que los objetos terrestres caigan es lo mismo que hace que los objetos celestiales se mantengan en el aire. Es bien sabido que Newton comparó una manzana que se caía con la Luna, y que se dio cuenta de que la Luna se mantenía en lo alto porque, a diferencia de la manzana, también se movía lateralmente.[1] En realidad, la Luna cae de manera perpetua, pero la superficie de la Tierra también lo hace en el mismo sentido a la misma velocidad. Así, la Luna puede caer por siempre, pero al rotar alrededor de la Tierra nunca la golpeará.

La diferencia real no era que las manzanas se caían y las Lunas no, sino que las manzanas no se mueven lateralmente lo bastante rápido como para esquivar la Tierra.

Newton era matemático (y físico, químico y místico), de modo que hizo algunos cálculos para confirmar esta idea radical. Calculó las fuerzas que deben actuar sobre la manzana y la Luna para hacerlas seguir rutas separadas. Teniendo en cuenta la diferencia de sus masas, las fuerzas resultaron ser idénticas. Esto lo convenció de que la Tierra tiene que atraer hacia ella tanto a la manzana como a la Luna. Era natural suponer que existe el mismo tipo de atracción para cualquier par de cuerpos, terrestres o celestes. Newton expresó estas fuerzas de atracción en una ecuación matemática, una ley de la naturaleza.

Una consecuencia importante es que no solo la Tierra atrae a la manzana, también la manzana atrae a la Tierra. Y la Luna y todo en el universo. Pero el efecto de la manzana sobre la Tierra es demasiado pequeño para medirlo, a diferencia del efecto de la Tierra sobre la manzana.

Este descubrimiento supuso un gran triunfo, ofreció un vínculo preciso y profundo entre las matemáticas y el mundo natural. También tuvo otra implicación importante, que se pierde fácilmente entre los tecnicismos matemáticos: a pesar de las apariencias, lo de «ahí arriba» es en algunas consideraciones vitales, lo mismo que lo de «aquí abajo». Las leyes son idénticas. Lo que difiere es el contexto en el cual se aplican.

Llamamos a la misteriosa fuerza de Newton «gravedad». Podemos calcular sus efectos con una precisión exquisita, pero todavía no la entendemos.

Durante mucho tiempo, pensábamos que sí. Alrededor del año 350 a. C., el filósofo griego Aristóteles dio una razón simple de por qué los objetos caen: están buscando su lugar de reposo natural.

Para evitar el razonamiento circular, también explicó qué significaba «natural». Afirmaba que todo está hecho de cuatro elementos básicos: tierra, agua, aire y fuego. El lugar de reposo natural de la tierra y el agua está en el centro del universo, el cual, por supuesto, coincide con el centro de la Tierra. Como prueba de ello, la Tierra no se mueve; vivimos en ella, de lo contrario, lo notaríamos. Como la tierra es más pesada que el agua (se hunde, ¿verdad?), las regiones más bajas están ocupadas por tierra, una esfera. Después viene un caparazón esférico de agua, luego uno de aire (el aire es más ligero que el agua, las burbujas se elevan). Sobre todo ello, pero más bajo que la esfera celestial en la que está la Luna, está el reino del fuego. Todos los otros cuerpos tienden a ascender o caer según las proporciones en las cuales se dan estos cuatro elementos.

Esta teoría llevó a Aristóteles a discutir que la velocidad de un cuerpo al caer es proporcional a su peso (las plumas caen más lentamente que las piedras) e inversamente proporcional a la densidad del medio que lo rodea (las piedras caen más rápido en el aire que en el agua). Una vez alcanzado su estado de reposo natural, el cuerpo permanece ahí, moviéndose solo cuando se le aplican fuerzas.

En lo que a teorías respecta, no era tan mala. En concreto, concuerda con la experiencia diaria. Sobre mi escritorio, mientras escribo, hay una primera edición de la novela *Triplanetaria*, citada en el epigrama del capítulo 2. Si la dejo sola, se queda donde está. Si le aplico una fuerza (le doy un empujón), se mueve algunos centímetros, ralentizándose a medida que lo hace, y finalmente se para.

Aristóteles tenía razón.

Y así lo pareció durante casi dos mil años. La física aristotélica, aunque ampliamente debatida, fue aceptada por casi todos los intelectuales hasta el final del siglo XVI. Una excepción fue el académico árabe al-Hasan ibn al-Haytham (Alhacén), quien argumentó en contra de la visión aristotélica por motivos geométricos en el siglo XI. Pero incluso hoy en día, la física aristotélica encaja con nuestra intuición más de lo que lo hacen las ideas de Galileo y Newton que la reemplazaron.

Para el pensamiento moderno, la teoría de Aristóteles tenía grandes lagunas. Una es el peso. ¿Por qué una pluma es más ligera que una piedra? Otra es la fricción. Supongamos que coloco mi copia de *Triplanetaria* en una pista de hielo y le doy el mismo empujón. ¿Qué sucedería? Iría más lejos, mucho más lejos si la coloco en un par de patines. La fricción hace que un cuerpo se mueva más lentamente en un medio viscoso, pegajoso. En el día a día, la fricción está por todas partes y por este motivo la física aristotélica encaja con nuestra intuición mejor que la física de Galileo o Newton. Nuestro cerebro ha desarrollado un modelo interno de movimiento con fricción incorporada.

Ahora sabemos que un cuerpo cae hacia la Tierra porque la gravedad del planeta tira de él. Pero ¿qué es la gravedad? Newton pensaba que era una fuerza, pero no explicó cómo surgía. Tan solo estaba. Actuaba a distancia sin nada entre medias. Tampoco explicó cómo ocurría, tan solo lo hacía. Einstein reemplazó la fuerza por la curvatura espacio-tiempo, dejando como irrelevante «la acción a distancia», y escribió ecuaciones sobre la afectación de la curva por la distribución de la materia, pero no explicó por qué la curvatura se comporta así.

Durante milenios, antes de que nadie se diera cuenta de la existencia de la gravedad, se habían calculado diversos aspectos del cosmos, como los eclipses, pero una vez se descubrió el papel de la gravedad, nuestra capacidad para calcular el cosmos aumentó de forma considerable. El subtítulo de Newton para el Libro 3 de *Principia*, que describe sus leyes de movimiento y la gravedad, era *El sistema del mundo*. Se trataba solo de una ligera exageración. La fuerza de la gravedad y la manera con que los cuerpos responden a las fuerzas constituyen el núcleo de la mayoría de los cálculos cósmicos. Así que antes de que lleguemos a los últimos descubrimientos, tales como de qué forma escupen lunas los planetas con anillos, o cómo empezó el universo, sería mejor aclarar algunas ideas básicas sobre la gravedad.

Antes de la invención de la luz en las calles, la Luna y las estrellas eran tan familiares para la mayoría de la gente como los ríos, los árboles y las montañas. Cuando el Sol se ponía, las estrellas salían. La Luna marcaba su propio ritmo, y a veces aparecía durante el día tan pálida como un fantasma, pero brillaba mucho más vivamente de noche. Aunque había algunos patrones. Cualquiera que observara la Luna durante unos meses, incluso de modo casual, rápidamente se daría cuenta de que seguía un ritmo regular, cambiando la forma de una media luna fina a un círculo y volviendo a empezar de nuevo cada 28 días. También se desplaza de manera notable de una noche a la siguiente, trazando un camino repetitivo y cerrado en el firmamento.

Las estrellas también tienen su propio ritmo. Dan vueltas, una vez al día, alrededor de un punto fijo en el cielo, como si estuvieran pintadas en el interior de un tazón rotatorio. El *Génesis* habla del firmamento del Cielo. La palabra hebrea traducida como «firmamento» significa tazón, cuenco.

Si se observa el cielo durante unos meses, también resulta obvio que cinco estrellas, incluida algunas de las más brillantes, no giran como la mayoría de las estrellas «fijas». En lugar de estar sujetas al tazón, reptan lentamente por él. Los griegos asociaron estas pecas de luz errantes con Hermes (mensajero de los dioses), Afrodita (diosa del amor), Ares (dios de la guerra), Zeus (rey de los dioses) y Cronos (dios de la agricultura). Las deidades romanas correspondientes les han dado sus actuales nombres: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. Los griegos les llamaron planetas, «vagabundos», de ahí el nombre moderno de planetas, de los cuales ahora reconocemos tres más: la Tierra, Urano y Neptuno. Sus rutas eran extrañas, aparentemente impredecibles. Algunos se movían relativamente rápido, mientras que otros lo hacían lentamente. Algunos incluso daban una vuelta sobre sí mismos a medida que los meses pasaban.

La mayoría de las personas aceptaban las luces por lo que eran, del mismo modo que aceptaban la existencia de ríos, árboles y montañas. Pero algunos se hacían preguntas. ¿Qué son esas luces? ¿Por qué están ahí? ¿Cómo y por qué se mueven? ¿Por qué algunas muestran patrones mientras que otras los rompen?

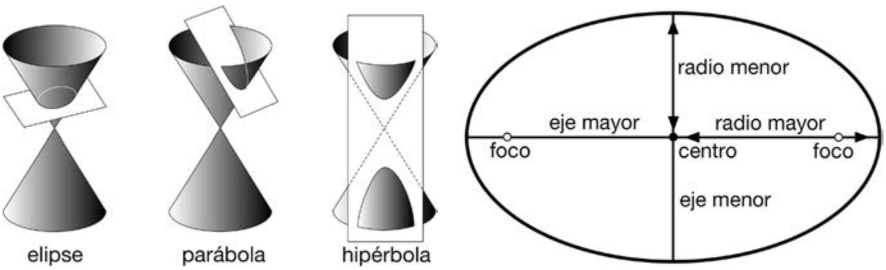
Los sumerios y los babilonios proporcionaron información básica de observaciones. Escribieron sobre tablas de barro en una escritura conocida como cuneiforme. Entre las tablas de los babilonios que han encontrado los arqueólogos hay catálogos de estrellas que detallan la posición de estas en el cielo. Datan de alrededor de 1200 a. C., pero probablemente son copias de tablas todavía más antiguas de los sumerios. Los filósofos y geómetras griegos que siguieron su senda eran más conscientes de la necesidad de lógica, prueba y teoría. Buscaban patrones —el culto pitagórico llevó esta actitud al extremo—, pues creían que el universo entero estaba dirigido por números. Hoy la mayoría de los científicos estarían de acuerdo, aunque no en todos los detalles.

El geómetra griego que tuvo más influencia en el pensamiento astronómico de generaciones posteriores fue el astrónomo y geógrafo Claudio Ptolomeo. Su primer trabajo se conoce como *Almagesto*, la traducción árabe de su título original, que primero se llamó *Composición matemática*, se transformó en *La gran composición,* hasta que se conoció como *al-Majisti*, el más grande. El *Almagesto* presenta una teoría desarrollada del movimiento planetario basado en lo que los griegos consideraban las más perfectas de las formas geométricas: las circunferencias y las esferas.

Los planetas, en realidad, no se mueven trazando una circunferencia. Esto no habría dicho nada a los babilonios, porque no encajaba con sus tablas. Los griegos fueron más lejos, preguntándose qué encajaría. La respuesta de Ptolomeo fue: combinaciones de circunferencias trazadas sobre superficies esféricas. La esfera más recóndita, el «deferente», está centrada en la Tierra. Los ejes de la segunda esfera, o «epiciclo», están fijados a la esfera interior. Cada par de esferas está desconectado de los otros pares. No era una idea nueva. Dos siglos antes, Aristóteles, basándose en ideas todavía más tempranas del mismo tipo, había propuesto un sistema complejo de 55 esferas concéntricas, con los ejes de cada esfera fijos en la esfera justo interior. La modificación de Ptolomeo utilizaba menos esferas y era más precisa, pero todavía resultaba bastante complicada. Ambas llevaban a la pregunta de si las esferas existían realmente, si se trataba de ficciones convenientes o si en la realidad sucedía algo completamente diferente.

Durante los siguientes mil años y más, Europa se volcó en temas teológicos y filosóficos, basando la mayoría de su comprensión del mundo natural en lo que Aristóteles había dicho alrededor del año 350 a. C. Se creía que el universo era geocéntrico, que todo él giraba en torno a una Tierra estacionaria. La antorcha de la innovación en astronomía y matemáticas pasó a Arabia, India y China. Sin embargo, con el amanecer del Renacimiento italiano, volvió a Europa. Posteriormente, tres gigantes de la ciencia jugaron un papel fundamental en el avance del conocimiento astronómico: Galileo, Kepler y Newton. El elenco de secundarios fue enorme.

Galileo es famoso por las mejoras que introdujo en el telescopio, con el que descubrió que el Sol tiene manchas, que Júpiter posee (al menos) cuatro lunas, que Venus presenta fases como la Luna y que hay algo extraño en Saturno. Más tarde se descubrió su sistema de anillos. Estas evidencias lo llevaron a rechazar la teoría geocéntrica y a adoptar la teoría heliocéntrica rival de Nicolás Copérnico, según la cual los planetas y la Tierra giran alrededor del Sol, lo que ocasionó problemas a Galileo con la Iglesia de Roma. También hizo un descubrimiento en apariencia más modesto, pero definitivamente más importante: un patrón matemático en el movimiento de objetos como las balas de cañón. Aquí abajo, un cuerpo que se mueva libremente o bien acelera (cuando cae) o se ralentiza (cuando sube) en una cantidad que es la misma durante un pequeño período de tiempo fijado. En resumen, la aceleración del cuerpo es constante. Al ca-



A la izquierda, secciones cónicas. A la derecha, características básicas de la elipse.

recer de relojes precisos, Galileo observó estos efectos haciendo rodar bolas por superficies ligeramente inclinadas.

La siguiente figura clave es Kepler. Su jefe, Tycho Brahe, había realizado medidas muy precisas de la posición de Marte. Cuando este murió, Kepler heredó su puesto de astrónomo del emperador del Sacro Imperio Romano Rodolfo II, además de sus observaciones, y se puso a calcular la verdadera forma de la órbita de Marte. Después de cincuenta fracasos, dedujo que tenía forma de elipse, de óvalo, como una circunferencia aplastada. El Sol se encuentra en un punto especial, el foco de la elipse.

Las elipses eran familiares para los geómetras griegos de la Antigüedad, quienes las definieron como secciones planas de un cono. Dependiendo del ángulo del plano relativo al cono, estas «secciones cónicas» incluyen círculos, elipses, parábolas e hipérbolas.

Cuando un planeta se mueve a lo largo de una elipse, su distancia al Sol varía. Al acercarse al Sol, acelera; cuando está más distante, va más lento. Fue una sorpresa que estos efectos se confabularan para crear una órbita que tiene exactamente la misma forma en ambos extremos. Kepler no se lo esperaba, y durante mucho tiempo se convenció a sí mismo de que lo de la elipse debía ser una respuesta errónea.

La forma y el tamaño de una elipse están determinados por dos longitudes: el eje mayor, que es la línea más larga entre dos puntos de la elipse, y el eje menor, que es perpendicular al eje mayor; una circunferencia es un tipo especial de elipse en la que estas dos distancias son iguales, que resulta ser el diámetro de la circunferencia. Con finalidades astronómicas, el radio es una medida más natural: el radio de una órbita circular es la distancia del planeta al Sol y las cantidades correspondientes para una elipse se llaman radio mayor y radio menor. A menudo se hace referencia a estas con los complicados términos de semieje mayor y semieje menor, porque cortan los ejes por la mitad. Menos intuitiva pero muy importante es la excentricidad de la elipse, que cuantifica lo larga y estrecha que es. La excentricidad es 0 para una circunferencia y para un radio mayor fijo se hace infinitamente grande a medida que el radio menor tiende a cero.[2]

El tamaño y la forma de una órbita elíptica pueden caracterizarse por dos números; la elección habitual es el radio mayor y la excentricidad. El radio menor se puede hallar a partir de estos. La órbita de la Tierra tiene un radio mayor de 149,6 millones de kilómetros y una excentricidad de 0,0167. El radio menor es de 149,58 millones de kilómetros, de modo que la órbita es casi un círculo, como indica su muy pequeña excentricidad. El plano de la órbita de la Tierra tiene un nombre especial: eclíptica.

La localización espacial de cualquier otra órbita elíptica del Sol puede caracterizarse por tres números más, todos ángulos. Uno es la inclinación del plano de la órbita respecto a la eclíptica. El segundo da la dirección del eje mayor en el plano. El tercero da la dirección de la recta resultado del corte de los dos planos. Finalmente, necesitamos saber dónde está el planeta en la órbita, lo cual requiere un ángulo más. De modo que indicar la órbita del planeta y su posición en ella requiere dos números y cuatro ángulos, seis elementos de la órbita. Un objetivo importante de la astronomía en sus inicios era calcular los elementos de la órbita de todos los planetas y asteroides que se descubrían. Dados estos números, se puede predecir su movimiento futuro, al menos hasta que los efectos combinados de otros cuerpos perturben la órbita de manera significativa.

Kepler finalmente dio con un conjunto de tres elegantes patrones matemáticos, sus leyes del movimiento planetario. La primera afirma que la órbita de un planeta es una elipse con el Sol en uno de los focos. La segunda dice que la recta del Sol al planeta recorre áreas iguales en períodos de tiempo iguales. Y la tercera indica que el cuadrado del período de revolución es proporcional al cubo de la distancia.

Newton reformuló las observaciones de Galileo sobre cuerpos en movimiento libre como las tres leyes del movimiento. La primera afirma que los cuerpos continúan moviéndose en línea recta a una velocidad constante a menos que una fuerza actúe sobre ellos. La segunda afirma que la aceleración de cualquier cuerpo multiplicada por su masa es igual a la fuerza que actúa sobre ella. La tercera afirma que toda acción produce una reacción igual y en sentido contrario. En 1687, Newton reformuló las leyes planetarias de Kepler como una regla general del movimiento de los cuerpos celestes: la ley de la gravitación, una fórmula matemática para la fuerza de la gravedad con la que cualquier cuerpo atrae a otro.

De hecho, dedujo su ley sobre esta fuerza a partir de las leyes de Kepler haciendo una suposición: el Sol ejerce una fuerza atractiva, siempre dirigida hacia su centro. Con esta suposición, Newton probó que la fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, lo que de un modo sofisticado quiere decir que, por ejemplo, multiplicando la masa de cualquier cuerpo por tres también se triplica la fuerza, pero multiplicando la distancia entre ellos por tres la fuerza se reduce a un noveno. Newton también probó lo contrario: esta «ley del cuadrado de la inversa» de atracción implica las tres leyes de Kepler.

El mérito de la ley de la gravedad se atribuye a Newton, pero la idea no fue originalmente de él. Kepler dedujo algo parecido por analogía con la luz, pero pensaba que la gravedad empujaba a los planetas alrededor de sus órbitas. Ismaël Bullialdus no estaba de acuerdo y argumentaba que la fuerza de la gravedad debe ser inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. En una conferencia en la Royal Society en 1666, Robert Hooke dijo que todos los cuerpos se mueven en línea recta a menos que una fuerza actúe sobre ellos, todos los cuerpos se atraen los unos a los otros gravitacionalmente y la fuerza de la gravedad decrece con la distancia mediante una fórmula que «yo mismo no he descubierto». En 1679 se decidió por una ley de la inversa del cuadrado para la atracción y escribió a Newton sobre ello.[3] De modo que Hooke se molestó de forma clara cuando esto exactamente apareció en *Principia,* incluso aunque Newton lo mencionase por ello, junto con Halley y Christopher Wren.

Hooke sí que aceptó que Newton fue el único que había deducido que las órbitas cerradas eran elípticas. Newton sabía que la ley de la inversa del cuadrado también permitía órbitas parabólicas e hiperbólicas, pero estas no eran curvas cerradas, de modo que el movimiento no se repetía periódicamente. Órbitas de estos tipos también tienen aplicaciones astronómicas, principalmente en los cometas.

La ley de Newton va más allá que la de Kepler debido a una característica más, una predicción más que un teorema. Newton se dio cuenta de que la Tierra atrae a la Luna, por lo que parece razonable que la Luna también debería atraer a la Tierra. Son como dos bailarines de *country*, dándose la mano y girando y girando. Cada bailarín siente la fuerza ejercida por el otro tirando de sus brazos. Cada bailarín se mantiene en su sitio por esa fuerza; si se dejaran ir, acabarían dando vueltas por el suelo de la pista. Sin embargo, la Tierra es mucho más grande que la Luna, como un hombre gordo bailando con un niño pequeño. El hombre parece que gira en el sitio mientras que el niño da vueltas alrededor. Pero si se observa con cuidado, se verá que el hombre gordo también está dando vueltas, que sus pies se mueven formando una pequeña circunferencia y que el centro sobre el cual rota está ligeramente más cerca del niño que si estuviera dando vueltas solo.

Este razonamiento llevó a Newton a proponer que todo cuerpo en el universo atrae a cualquier otro cuerpo. Las leyes de Kepler se aplican solo a dos cuerpos: el Sol y el planeta. Las leyes de Newton se aplican a cualquier sistema de cuerpos cualesquiera que sean, porque proporciona tanto la magnitud como la dirección de todas las fuerzas que se dan. Introducidas en las leyes del movimiento, la combinación de todas estas fuerzas determina la aceleración de cada cuerpo, y por consiguiente la velocidad y la posición en cualquier momento. El enunciado de la ley universal de gravitación fue un momento épico en la historia y el desarrollo de la ciencia, al revelar la maquinaria matemática escondida que mantiene al universo en marcha.

Las leyes de Newton del movimiento y la gravitación desencadenaron una alianza duradera entre la astronomía y las matemáticas, conduciéndonos a la mayoría de las cosas que ahora conocemos sobre el cosmos. Pero incluso cuando se entiende de qué van las leyes, no es sencillo aplicarlas a problemas específicos. La fuerza de la gravitación, en concreto, es «no lineal», un término técnico cuyas principales implicaciones son que las ecuaciones no se pueden resolver con fórmulas agradables. Es más, ni desagradables.

Tras Newton, los matemáticos salvaron este obstáculo trabajando también con problemas muy artificiales (aunque fascinantes), tales como tres masas idénticas colocadas como un triángulo equilátero, u obteniendo soluciones aproximadas a problemas más realistas. El segundo enfoque era más práctico, aunque en realidad se extrajeron ideas mucho más útiles del primero, por muy artificial que fuera.

Durante mucho tiempo, los herederos científicos de Newton tuvieron que realizar sus cálculos a mano, a menudo una tarea heroica. Un ejemplo extremo es Charles-Eugène Delaunay, quien en 1846 empezó a calcular una fórmula aproximada para el movimiento de la Luna. La hazaña duró más de veinte años y publicó sus resultados en dos volúmenes. Cada uno tiene más de 900 páginas y el segundo volumen consta exclusivamente de la fórmula. A finales del siglo XX, su respuesta fue comprobada aplicando álgebra computacional (sistemas de software que pueden manipular fórmulas, no solo números). Solo se descubrieron dos pequeños errores, uno a consecuencia del otro. Ambos tienen un efecto insignificante.

Las leyes del movimiento y la gravedad son de un tipo especial, llamado «ecuación diferencial». Dicha ecuación especifica la tasa de cambio de las cantidades a medida que pasa el tiempo. La velocidad es la tasa de cambio de la posición; la aceleración, la tasa de cambio de la velocidad. La tasa con la que cambia una cantidad nos permite proyectar su valor en el futuro. Si un coche viaja a diez metros por segundo, entonces en un segundo a partir de ahora se habrá movido diez metros. Sin embargo, este tipo de cálculo requiere que la tasa de cambio sea constante. Si el coche está acelerando, entonces en un segundo a partir de ahora se habrá movido más de diez metros. Las ecuaciones diferenciales sortearon este problema especificando la tasa de cambio instantánea. De hecho, funcionan con intervalos de tiempo muy pequeños, de modo que la tasa de cambio puede considerarse constante durante ese intervalo de tiempo. Hicieron falta varios cientos de años para que los matemáticos diesen sentido a esta idea con todo el rigor lógico, porque ningún período de tiempo finito puede ser instantáneo a menos que sea cero, y nada cambia si el tiempo es igual a cero.

Los ordenadores crearon una revolución metodológica. En lugar de calcular fórmulas aproximadas para el movimiento, y luego poner los números en fórmulas, se puede trabajar desde el principio con los números. Supongamos que queremos predecir dónde estará dentro de cien años algún sistema de cuerpos, por ejemplo las lunas de Júpiter. Se empieza por la posición y los movimientos iniciales de Júpiter, sus lunas y cualquier otro cuerpo que pudiera ser importante, como el Sol o Saturno. Entonces, en minúsculos espacios de tiempo, se calculan los números que describen todos los cambios de los cuerpos. Se repite hasta que se alcancen cien años y se para. Un ser humano con lápiz y papel no podría utilizar este método para ningún problema realista, porque necesitaría toda una vida. Sin embargo, con un rápido ordenador, el método es absolutamente factible. Y los ordenadores modernos son muy rápidos.

No es tan fácil, para ser honestos. Aunque el error en cada paso sea muy pequeño, provocado por suponer una tasa de cambio constante cuando realmente varía poco, hay que emplearlo en una cantidad inmensa de pasos. Un error pequeño un número grande de veces no es necesariamente pequeño, pero métodos elaborados cuidadosamente mantienen el error bajo control. La rama de las matemáticas conocida como análisis numérico apunta justo a este tema. Es conveniente referirse a esos métodos como «simulaciones», lo que refleja el papel crucial del ordenador. Es importante apreciar que no se puede resolver un problema simplemente «poniéndolo en un ordenador». Alguien tiene que programar la máquina con reglas matemáticas que hagan que sus cálculos concuerden con la realidad.

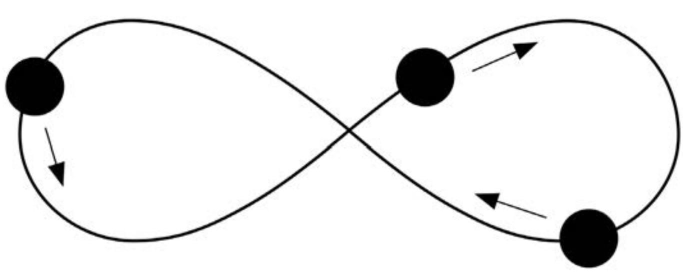
De modo que esas reglas con las que los astrónomos pueden predecir los eclipses del Sol y la Luna al segundo son exquisitamente exactas y predicen en un radio de pocos kilómetros dónde ocurrirán en el planeta cientos de años después. Estas «predicciones» también pueden ir hacia atrás en el tiempo para indicar exactamente cuándo y dónde ocurrieron eclipses registrados históricamente. Tales datos se han empleado, por ejemplo, para datar observaciones hechas hace miles de años por astrónomos chinos.

Incluso hoy en día, los matemáticos y los físicos descubren nuevas e inesperadas consecuencias de la ley de la gravedad de Newton. En 1993, Cris Moore utilizó métodos numéricos para mostrar que tres cuerpos con masas idénticas pueden perseguirse unos a los otros repetidamente a lo largo de una órbita con forma de número 8 y, en 2000, Carles Simó demostró numéricamente que esta órbita es estable, excepto quizá por una lenta deriva. En 2001, Alain Chenciner y Richard Montgomery dieron una prueba rigurosa de que la órbita existe, basada en el principio de mínima acción, un teorema fundamental en mecánica clásica.[4] Simó ha descubierto muchas «coreografías» similares, en las cuales varios cuerpos con la misma masa se persiguen uno a otro a lo largo de exactamente la misma (y complicada) trayectoria.[5]

La estabilidad de la órbita de tres cuerpos con forma de número 8 parece persistir si las masas son ligeramente diferentes, abriendo una pequeña posibilidad de que tres estrellas reales podrían comportarse de este modo extraordinario. Douglas Heggie estima que podría haber un sistema triple de este tipo por galaxia, y hay una posibilidad razonable de al menos uno en algún lugar del universo.

Estas órbitas existen todas en un plano, pero se da una posibilidad tridimensional innovadora. En 2015 Eugene Oks se dio cuenta de que en la gravedad newtoniana también podrían aparecer órbitas inusuales de electrones en «cuasi-moléculas de Rydberg». Demostró que un planeta puede ser golpeado de un lado a otro entre dos estrellas de un sistema binario en una órbita con forma de tirabuzón que gira alrededor de la recta que las une.[6] Las espirales se pierden en el medio pero se hacen más cerradas cerca de las estrellas. Pensemos en unir las estrellas por un muelle saltarín o resorte mágico (el juguete infantil con forma de muelle y muy flexible), que se estira en el medio y se vuelve a estrechar sobre sí mismo en los extremos. Para las estrellas con masas diferentes, el muelle debería estrecharse como un cono. Órbitas como esta pueden ser estables, incluso si las estrellas no se mueven en círculos.

El colapso de nubes de gas crea órbitas planas, así que es improbable que un planeta se forme en una órbita de este tipo. Pero un planeta o aste-



Órbita en forma de 8 de tres cuerpos.

roide que se altera y pasa a una órbita más inclinada rara vez podría ser capturado por el sistema binario de estrellas y acabar trazando tirabuzones entre ellas. Hay indicios inciertos de que Kepler-16b, un planeta que orbita en una estrella lejana, podría ser uno de ellos.

Hubo un aspecto de la ley de Newton que molestó al propio Newton, es más, le molestó a él más que a la mayoría de los que basaron su trabajo en él. La ley describe la fuerza que un cuerpo ejerce sobre otro, pero no indica cómo trabaja la fuerza. Propone una misteriosa «acción a distancia». Cuando el Sol atrae a la Tierra, de algún modo, la Tierra debe «saber» cuánto de lejos está del Sol. Si, por ejemplo, algún tipo de cuerda elástica los uniera, entonces la cuerda podría propagar la fuerza y la física de la cuerda controlaría lo fuerte que es la fuerza. Pero entre el Sol y la Tierra solo hay espacio vacío. ¿Cómo sabe el Sol cuánto debe tirar de la Tierra, o cómo sabe la Tierra con qué fuerza se tirará de ella?[7]

Pragmáticamente, podemos aplicar la ley de la gravedad sin preocuparnos del mecanismo físico que transmite la fuerza de un cuerpo a otro. En su conjunto, eso fue lo que hizo todo el mundo. Sin embargo, algunos científicos se aferraron a una veta filosófica. Un ejemplo espectacular es Albert Einstein. Su teoría de la relatividad especial, publicada en 1905, cambió la visión del espacio, el tiempo y la materia de los físicos. Su extensión en 1915 a la relatividad general cambió su visión de la gravedad y resolvió la controvertida cuestión de cómo una fuerza podría actuar a distancia casi como una cuestión secundaria. Lo hizo deshaciéndose de la fuerza.

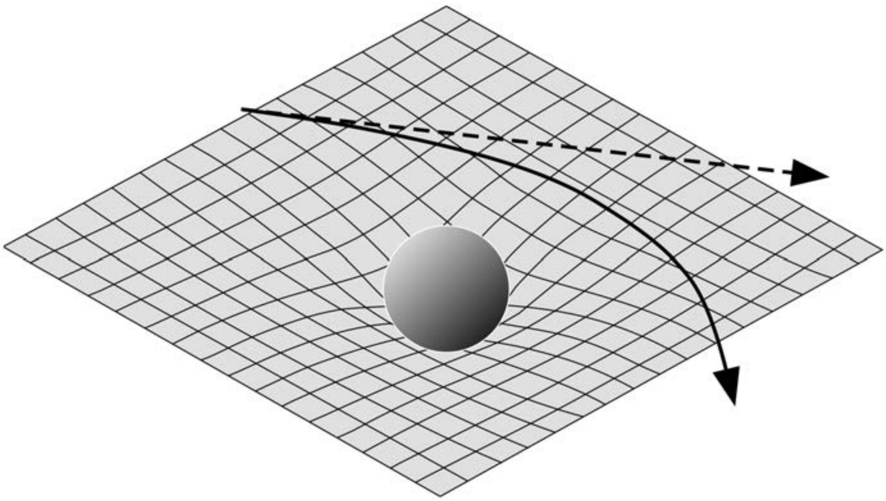
Einstein dedujo la relatividad especial a partir de un único principio fundamental: la velocidad de la luz no cambia ni siquiera cuando el observador se mueve a una velocidad constante. En la mecánica newtoniana, si estamos en un coche descapotable y lanzamos una bola en la dirección en la que el coche se mueve, entonces la velocidad de la bola medida por un observador quieto en el arcén será la velocidad de la bola respecto al coche más la velocidad del coche. De modo similar, si encendemos una linterna en el coche, la velocidad de la luz medida por alguien en el arcén debería ser su velocidad habitual más la del coche.

Datos experimentales y algunos experimentos intencionados persuadieron a Einstein de que la luz no es así. La velocidad de la luz observada es la misma para la persona que lleva la linterna que para la que está en el arcén. Las consecuencias lógicas de este principio, el cual yo siempre he pensado que debería llamarse no-relatividad, son sorprendentes. Nada puede viajar más rápido que la luz.[8] A medida que un cuerpo se aproxima a la velocidad de la luz, se contrae en la dirección del movimiento, su masa se incrementa y el tiempo pasa más lentamente. A la velocidad de la luz, si fuese posible, sería infinitamente delgado, tendría masa infinita y el tiempo se detendría. La masa y la energía están relacionadas: la energía es igual a la masa multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz. Finalmente, los sucesos que un observador considera que ocurren al mismo tiempo podrían no ser simultáneos para otro observador que se moviera a una velocidad relativa constante respecto al primero.

En la mecánica newtoniana, estas cosas extrañas no suceden. El espacio es el espacio y el tiempo es el tiempo, y ambos nunca se deben encontrar. En la relatividad especial, el espacio y el tiempo son hasta cierto punto intercambiables, limitados por la velocidad de la luz, formando juntos un continuo espacio-tiempo único. A pesar de sus extrañas predicciones, la relatividad especial ha sido aceptada como la teoría del espacio y el tiempo más de acuerdo con la realidad. La mayoría de sus efectos más salvajes solo se hacen evidentes cuando los objetos viajan muy rápido, por lo cual no los notamos en la vida diaria.

El ingrediente más obvio que se echa en falta es la gravedad. Einstein pasó años tratando de incorporar la fuerza de la gravedad a la relatividad, motivado en parte por una anomalía en la órbita de Mercurio.[9] El resultado final fue la relatividad general, la cual extiende la formulación de la relatividad especial de un continuo espacio-tiempo «plano» a uno «curvo». Podemos comprender aproximadamente lo que esto implica reduciendo el espacio a dos dimensiones en lugar de tres. Ahora el espacio se convierte en un plano, y la relatividad especial describe el movimiento de las partículas en el plano. En ausencia de la gravedad, estas siguen líneas rectas. Como señaló Euclides, la línea recta es la distancia más corta entre dos puntos. Al introducir la gravedad en la imagen, se coloca una estrella en el plano. Las partículas ya no siguen líneas rectas, sino órbitas curvas en torno a la estrella, como las elipses.

En la física newtoniana, estas trayectorias son curvas debido a una fuerza que desvía la partícula de la línea recta. En la relatividad general,



Efecto de la curvatura/gravedad en una partícula al pasar
sobre una estrella o planeta.

se obtiene un efecto similar de curvar el espacio-tiempo. Supongamos que la estrella distorsiona el plano, creando un valle circular, un «pozo gravitatorio» con la estrella en el fondo, y supongamos que las partículas en movimiento siguen la trayectoria más corta. El término técnico es geodésica. Como el continuo espacio-tiempo está curvado, las geodésicas ya no son líneas rectas. Por ejemplo, una partícula puede estar atrapada en el valle, dando vueltas y vueltas a una altura fija, como un planeta en una órbita cerrada.

En lugar de una fuerza hipotética que causa que la trayectoria de las partículas se curve, Einstein la sustituyó por un espacio-tiempo, que ya está curvado y cuya curvatura afecta a la trayectoria de una partícula en movimiento. No se necesita una acción a distancia, el espacio-tiempo está curvado porque las estrellas así lo hacen y los cuerpos en órbita responden a la curvatura próxima. Lo que nosotros y Newton denominamos gravedad, y pensamos en ello como una fuerza, es realmente la curvatura del espacio-tiempo.

Einstein escribió las fórmulas matemáticas, las ecuaciones de campo de Einstein,[10] que describen cómo afecta al movimiento de las masas la curvatura y cómo la distribución de las masas afecta a la curvatura. En ausencia de cualquier masa, la fórmula se reduce a la relatividad especial. Así todos los efectos raros, tales como el tiempo ralentizándose, también suceden en la relatividad general. De hecho, la gravedad puede provocar una desaceleración del tiempo, incluso en un objeto que no se está moviendo. Normalmente estos efectos paradójicos son pequeños, pero en circunstancias extremas el comportamiento que la relatividad (de cualquier tipo) predice difiere significativamente de la física de Newton.

¿Que todo esto suena a locura? Muchos lo creen, en principio. Pero cualquiera que disponga de navegación por satélite en su coche depende tanto de la relatividad especial como de la general. Los cálculos que nos dicen que estamos en las afueras de Bristol y vamos en dirección sur por la autopista M32 dependen de señales de tiempo de los satélites en órbita. El chip del coche que calcula nuestra localización tiene que corregir esos tiempos debido a dos fenómenos: la velocidad con la que se mueve el satélite y su posición en el pozo gravitatorio de la Tierra. El primero requiere de la relatividad especial, el segundo de la relatividad general. Sin estas correcciones, la navegación por satélite nos situaría en unos cuantos días en medio del Atlántico.

La relatividad general muestra que la física de Newton no es la verdad, no es el «sistema del mundo» exacto que él (y casi todos los otros científicos anteriores al siglo XX) creían que era. Sin embargo, ese descubrimiento no se tradujo en el fin de la física newtoniana. De hecho, ahora se aplica mucho más ampliamente y para propósitos más prácticos de los que tenía en la época de Newton. La física newtoniana es más sencilla que la relatividad, y es lo suficientemente buena. Las diferencias entre las dos teorías se hacen visibles sobre todo cuando se consideran fenómenos exóticos como los agujeros negros. Los astrónomos e ingenieros de misiones espaciales, principalmente contratados por los gobiernos o por gobiernos y organizaciones como la NASA y la ESA, todavía emplean la mecánica newtoniana para casi todos sus cálculos. Hay algunas excepciones en las que la elección del momento es delicado. A medida que se desarrolle la historia, veremos la influencia de la ley de gravitación de Newton una y otra vez. Realmente es así de importante, uno de los grandes descubrimientos científicos de todos los tiempos.

Sin embargo, para referirnos a la cosmología, el estudio de todo el universo y especialmente de su origen, debemos abandonar la física de Newton, pues esta no puede explicar las observaciones clave. En su lugar, se debe invocar la relatividad general, hábilmente asistida por la mecánica cuántica. E incluso estas dos grandes teorías parecen necesitar ayuda extra.