



LAS MATEMÁTICAS DEL
COSMOS



IAN STEWART

La última guía de Ian Stewart sobre el cosmos describe la arquitectura del espacio y el tiempo, la materia oscura y la energía, cómo se forman las galaxias, por qué las estrellas implosionan, cómo empezó todo y cómo acabará. Considera universos paralelos, qué forma podría tomar la vida extraterrestre y la probabilidad de que la Tierra sea golpeada por un asteroide. En términos sencillos, explica los fundamentos de la gravedad, el espacio-tiempo, la relatividad y la teoría cuántica, y muestra cómo están relacionadas entre ellas. Hace ochenta años, el descubrimiento de que el universo está expandiéndose llevó a la teoría del Big Bang sobre su origen. Esto a su vez llevó a los cosmólogos a plantear elementos como la materia o la energía oscura. Pero ¿existe la materia oscura? ¿Podría otra revolución científica estar en camino para retar a la actual ortodoxia científica? Estas, entre otras cuestiones, son las que Ian Stewart plantea en su investigación a través del campo de la astronomía y la cosmología.

Prólogo

«¿Por qué? Porque lo he calculado».

Respuesta de Isaac Newton a Edmond Halley cuando le preguntó cómo sabía que la ley de la inversa del cuadrado implica que la órbita de un planeta es una elipse.

Citada en *Los grandes matemáticos*,
HERBERT WESTREN TURNBULL

El 12 de noviembre de 2014, un alienígena inteligente que hubiera observado el sistema solar habría sido testigo de un evento desconcertante. Durante meses, una máquina minúscula siguió pasivamente, como inactiva, a un cometa a lo largo de su ruta alrededor del Sol. De repente, la máquina se despertó y escupió una máquina todavía más pequeña. Esta descendió hacia la superficie de carbón negro del cometa, la golpeó y... rebotó. Cuando finalmente se detuvo, se cayó sobre uno de sus lados y se atascó contra un precipicio.

El alienígena, al deducir que el aterrizaje no había ido como se esperaba, quizá no se quedase demasiado impresionado, pero el ingeniero responsable de las dos máquinas había logrado un hito sin precedentes: aterrizar una sonda espacial en un cometa. La máquina más grande era *Rosetta*, la más pequeña *Philae*, y el cometa era 67P/Churyumov-Gerasimenko. La misión fue llevada a cabo por la Agencia Espacial Europea y solo en llegar tardó

más de diez años. A pesar del brusco aterrizaje, *Philae* consiguió la mayoría de sus objetivos científicos y envió información vital. *Rosetta* continúa activa según lo planeado.

¿Por qué aterrizar sobre un cometa? Los cometas son fascinantes por derecho propio y cualquier novedad que podamos descubrir sobre ellos es útil a la ciencia básica. En un plano más práctico, los cometas se acercan a la Tierra de vez en cuando, y una colisión podría provocar una enorme devastación, por lo que conviene averiguar de qué están hechos. Aunque se pudiera modificar la órbita de un cuerpo sólido lanzándole un cohete o un misil nuclear, si el cuerpo fuera esponjoso, este podría romperse y el problema empeoraría. Sin embargo, hay una tercera razón. Los cometas contienen material que se remonta al origen del sistema solar, de modo que pueden proporcionarnos pistas útiles sobre cómo nació nuestro mundo.

Los astrónomos creen que los cometas son bolas de nieve sucias, hielo cubierto por una fina capa de polvo. *Philae* se las arregló para confirmar esto en el cometa 67P antes de que sus baterías se descargasen y se quedara en silencio. Si la Tierra se formó a su distancia actual del Sol, tiene más agua de la que debería. ¿De dónde viene el agua extra? Una posibilidad fascinante es que llegara por el bombardeo de millones de cometas cuando el sistema solar se estaba formando. El hielo se fundió y nacieron los océanos. Puede que, sorprendentemente, haya un modo de comprobar esta teoría. El agua está hecha de hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno aparece en tres formas atómicas distintas, conocidas como isótopos. Las tres tienen el mismo número de protones y electrones (uno de cada), pero diferente número de neutrones. El hidrógeno ordinario no tiene neutrones, el deuterio tiene uno y el tritio tiene dos. Si los océanos de la Tierra provienen de los cometas, la proporción de estos isótopos en los océanos y en la corteza, cuyas rocas también contienen gran cantidad de

agua en su composición química, debería ser similar a las proporciones en los cometas.

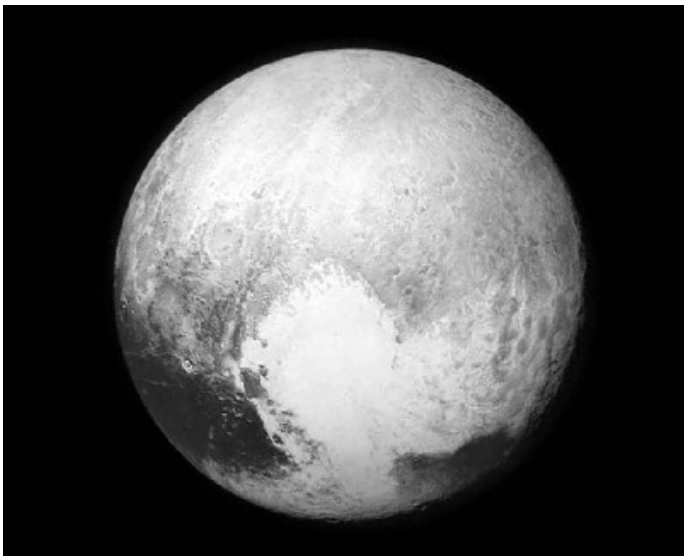
El cometa «patito de goma» 67P, imagen tomada por *Rosetta*.

El análisis de *Philae* muestra que, en comparación con la Tierra, 67P tiene una proporción de deuterio mucho mayor. Se necesita más información sobre otros cometas para estar seguros, pero la teoría del origen «cometario» de los océanos está empezando a tambalearse. Los asteroides son una apuesta mejor.

La misión *Rosetta* es solo un ejemplo de la creciente habilidad del ser humano para enviar máquinas al espacio, ya sea para exploración científica o para uso diario. Esta nueva tecnología ha ampliado nuestras aspiraciones científicas. Hasta ahora, nuestras sondas espaciales han visitado todos los planetas del sistema solar y algunos cuerpos más pequeños, y nos han enviado sus instantáneas vacacionales.

El progreso ha sido rápido. Los astronautas estadounidenses aterrizaron en la Luna en 1969. La nave espacial *Pioneer 10*, lanzada en 1972, visitó Júpiter y continuó más allá del sistema solar. *Pioneer 11* la siguió en 1973 y también visitó Saturno. En 1977, *Voyager 1* y *Voyager 2* partieron a explorar esos mundos y los planetas todavía más lejanos, Urano y Neptuno. Otra nave, lanzada por diferentes naciones o grupos de naciones, ha visitado Mercurio, Venus y Marte. Algunas incluso han aterrizado en Venus y Marte, y han enviado valiosa información. Cuando escribo esto en 2015, hay cinco sondas en órbita^[1] y dos^[2] vehículos de superficie que exploran Marte. *Cassini* está en órbita alrededor de Saturno; la nave espacial *Dawn* orbita el antiguo asteroide, recientemente ascendido a planeta enano, Ceres, y la nave *New Horizons* acaba de pasar

por el planeta enano más famoso del sistema solar, Plutón, y nos ha enviado imágenes asombrosas de él. Su información nos ayudará a resolver los misterios de este cuerpo enigmático y sus cinco lunas. Ya ha mostrado que Plutón es ligeramente más grande que Eris, un planeta enano mucho más distante que previamente se pensaba que era mayor. Plutón fue reclasificado como planeta enano para excluir a Eris del estatus de planeta, aunque ahora descubrimos que no era necesario habernos tomado esa molestia.



El 14 de julio de 2015, la sonda espacial de la NASA, *New Horizons*, envió a la Tierra esta imagen histórica de Plutón, la primera en la que aparecen con claridad las características del planeta enano.

También estamos empezando a explorar cuerpos menores pero igual de fascinantes: lunas, asteroides y cometas. Quizá no sea *Star Trek*, pero la frontera final se está abriendo.

La exploración espacial es una ciencia básica y, mientras la mayoría de nosotros estamos intrigados por los nuevos descubrimientos, algunos prefieren que sus im-

puestos produzcan rendimientos más terrenales. En lo que se refiere al día a día, nuestra habilidad para crear modelos matemáticos precisos de cuerpos que interactúan bajo la gravedad ha ofrecido al mundo una gama de maravillas tecnológicas que dependen de satélites artificiales: televisión por satélite, una red telefónica internacional muy eficiente, satélites meteorológicos, satélites de observación de las tormentas magnéticas del Sol, satélites que observan el medio ambiente y mapean el globo, e incluso satélites de navegación para los coches, gracias al Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés: *global positioning system*).

Estos logros habrían asombrado a las generaciones anteriores. Incluso en la década de 1930, la mayoría de las personas pensaba que ningún ser humano podría poner un pie en la Luna. (Hoy en día un montón de teóricos de la conspiración bastante ingenuos todavía creen que nadie lo ha puesto, pero mejor no hablemos de ellos). Incluso hubo vehementes discusiones acerca de la simple posibilidad de realizar viajes espaciales^[3]. Algunas personas defendieron que los cohetes no funcionarían en el espacio porque «no hay nada ahí que les oponga resistencia», ignorando la tercera ley del movimiento de Newton: para toda acción hay una reacción igual en sentido opuesto^[4].

Científicos serios afirmaron categóricamente que un cohete no funcionaría nunca porque necesitaría mucho combustible, luego más combustible para levantar el combustible, luego más combustible que levantase... y eso a pesar de que ya una imagen del siglo XIV del *Huolongjing* (Manual de Dragón de Fuego) chino de Jiao Yu representa un dragón de fuego o lo que se conoce como cohete multietapa. Esta arma naval china lanzaba impulsores desechables a una plataforma superior en forma de cabeza de dragón cargada con flechas de fuego que salían disparadas de su boca. Conrad Haas hizo el primer experimento europeo con cohetes multietapa en 1551. Los pioneros en

cohetes del siglo XX indicaron que en la primera etapa un cohete multietapa sería capaz de alcanzar una segunda etapa con su combustible, y entonces dejaría caer todo el exceso de peso de la ya acabada primera etapa. Konstantin Tsiolkovsky publicó cálculos detallados y realistas sobre la exploración del sistema solar en 1911.

Pues bien, llegamos a la Luna a pesar de los detractores, aplicando precisamente las ideas que ellos estaban demasiado ciegos para contemplar. Hasta ahora, solo hemos explorado nuestra región local del espacio, que parece insignificante comparada con la vasta envergadura del universo. Todavía no hemos hecho aterrizar a seres humanos en otro planeta, e incluso la estrella más cercana parece totalmente fuera de nuestro alcance. Con la tecnología existente, se necesitarían siglos para llegar hasta allí, incluso si pudiéramos construir una nave espacial fiable. Pero estamos en camino.

Estos avances en la exploración espacial y su utilización no solo dependen de una tecnología inteligente, sino también de una extensa serie de descubrimientos científicos que se remontan al menos hasta la época de los babilonios, hace tres milenios. Las matemáticas se encuentran en el corazón de estos avances. La ingeniería también es vital, por supuesto, y fueron precisos descubrimientos en muchas otras disciplinas científicas para fabricar los materiales necesarios y ensamblarlos de manera que formaran una sonda espacial que funcionase, pero me concentraré en cómo las matemáticas han mejorado nuestro conocimiento del universo.

La historia de la exploración espacial y la historia de las matemáticas han ido de la mano desde el principio de los tiempos. Las matemáticas han resultado esenciales para comprender el Sol, la Luna, los planetas, las estrellas y el amplio abanico de objetos que forman el cosmos, el uni-

verso considerado a gran escala. Durante cuatro mil años, las matemáticas han sido nuestro método más efectivo para comprender, registrar y predecir sucesos cósmicos. De hecho, en algunas culturas, como en la antigua India de alrededor del año 500, las matemáticas eran una subrama de la astronomía. Y al revés, los fenómenos astronómicos han influido en el desarrollo de las matemáticas durante tres milenios, inspirando de todo, desde las predicciones babilónicas de eclipses hasta el cálculo, el caos y la curvatura del espacio-tiempo.

Inicialmente, el principal papel astronómico de las matemáticas era registrar observaciones y realizar cálculos útiles sobre fenómenos como eclipses solares, en los que la Luna temporalmente tapa al Sol, o eclipses lunares, cuando la sombra de la Tierra oculta la Luna. Pensando en la geometría del sistema solar, los pioneros de la astronomía se dieron cuenta de que la Tierra rota alrededor del Sol, aun cuando visto desde aquí parece que sea al revés. En la Antigüedad también combinaron las observaciones con la geometría para estimar el tamaño de la Tierra y la distancia a la Luna y al Sol.

Patrones astronómicos más profundos empezaron a emerger alrededor de 1600, cuando Johannes Kepler descubrió tres regularidades matemáticas, «leyes», en las órbitas de los planetas. En 1679, Isaac Newton reinterpretó las leyes de Kepler para formular una teoría ambiciosa que describía no solo cómo se mueven los planetas del sistema solar, sino el movimiento de cualquier sistema de cuerpos celestes. Esta fue su teoría de la gravedad, uno de los descubrimientos centrales de su revolucionario *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (*Principios matemáticos de filosofía natural*). Las leyes de la gravedad de Newton describen cómo se atraen entre sí los cuerpos en el universo.

Combinando la gravedad con otras leyes matemáticas sobre el movimiento de los cuerpos, enunciadas por Gali-

Un siglo antes, Newton explicó y predijo numerosos fenómenos celestiales. De manera más general, cambió cómo pensamos en el mundo natural, creando una revolución científica todavía vigente hoy en día. Newton mostró que los fenómenos naturales con frecuencia siguen patrones matemáticos y, al comprender estos patrones, podemos mejorar nuestra comprensión de la naturaleza. En la época de Newton, las leyes matemáticas explicaban qué pasaba en los cielos, pero estas no tenían otros usos prácticos que la navegación.

Todo cambió cuando el satélite *Sputnik* de la Unión Soviética entró en una órbita terrestre baja en 1957, dando el pistoletazo de salida de la carrera espacial. Cuando vemos el fútbol en la televisión por satélite, series o documentales científicos, estamos contemplando en el mundo real los frutos de la perspicacia de Newton.

Inicialmente, sus éxitos llevaron a que se impusiera una visión del cosmos como la de un universo que funcionaba como un mecanismo de relojería, en el cual todo seguía majestuosamente unas rutas trazadas en los albores de la creación. Por ejemplo, se creía que el sistema solar fue creado en un estado bastante parecido al actual, con los mismos planetas moviéndose a lo largo de órbitas casi circulares. Ciertamente es que todo se movió un poco: los progresos en observaciones astronómicas de largos períodos lo han dejado muy claro. Pero había una creencia extendida de que nada había cambiado, cambiaba o cambiaría de modo drástico durante innumerables eras. En la religión europea era impensable que la perfecta creación de Dios pudiese haber sido diferente en el pasado. La visión mecánica de un cosmos regular y predecible persistió durante trescientos años.

Pero ya no. Las innovaciones recientes en matemáticas, como la teoría del caos, junto con los potentes ordenado-

res actuales, capaces de calcular números relevantes a una velocidad sin precedentes, han cambiado enormemente nuestra visión del cosmos. El modelo de mecanismo de relojería del sistema solar sigue siendo válido durante períodos cortos de tiempo, y en astronomía un millón de años normalmente es corto, pero nuestro patio trasero cósmico se descubre ahora como un lugar donde los cuerpos celestes migraron y migrarán de una órbita a otra. Sí, hay períodos largos de tiempo de comportamiento regular, pero de vez en cuando son interrumpidos por estallidos de actividad salvaje. Las leyes inmutables que dieron lugar a la noción de un universo-reloj también pueden causar cambios repentinos y un comportamiento muy errático.

Los escenarios que los astrónomos conciben ahora son con frecuencia dramáticos. Durante la formación del sistema solar, por ejemplo, cuerpos celestes enteros colisionaron con consecuencias apocalípticas. Un día, en un futuro lejano, probablemente lo harán de nuevo. Hay una pequeña posibilidad de que Mercurio o Venus estén sentenciados, pero no sabemos cuál. Podrían ser los dos, y podrían llevarnos con ellos. Una colisión de ese tipo probablemente llevó a la formación de la Luna. Suena como algo de ciencia ficción y lo es... pero del mejor tipo, ciencia ficción «dura» en la cual solo la nueva invención fantástica va más allá de la ciencia conocida. Excepto que no hay una invención fantástica, solo un descubrimiento matemático inesperado.

Las matemáticas han instruido nuestro conocimiento del cosmos en todas las escalas: el origen y el movimiento de la Luna, los movimientos y formas de los planetas y las lunas que los acompañan, las complejidades de los asteroides, cometas y objetos del cinturón de Kuiper y el agotador baile celestial de todo el sistema solar. Nos han enseñado que las interacciones con Júpiter pueden arrojar asteroides a Marte, y por tanto a la Tierra, por qué Saturno

no es el único que posee anillos, cómo se formaron estos y por qué se comportan como lo hacen, con trenzas, ondas y extraños radios que rotan. Nos han mostrado que los anillos de los planetas pueden escupir lunas, de una en una.

El mecanismo de relojería ha dado paso a los fuegos artificiales.

Desde un punto de vista cósmico, el sistema solar es simplemente un montón insignificante de rocas entre cuatrillones. Cuando contemplamos el universo a mayor escala, las matemáticas desempeñan un papel más crucial. Los experimentos no son posibles casi nunca y las observaciones directas son difíciles, de modo que, en lugar de ello, tenemos que hacer inferencias indirectas. Las personas con convicciones anticencia a menudo atacan esta característica como un tipo de debilidad. En realidad, una de las grandes fortalezas de la ciencia es la habilidad para inferir cosas que no podemos observar directamente a partir de las que sí podemos. La existencia del átomo fue establecida de manera concluyente mucho antes de que ingeniosos microscopios nos permitieran verlos, e incluso «verlos» depende de una serie de inferencias sobre cómo se forman las imágenes que nos conciernen.

Las matemáticas son un potente motor de inferencia: nos permiten deducir las consecuencias de hipótesis alternativas buscando sus implicaciones lógicas. Juntarlas con la física nuclear, que ya tiene un alto componente matemático, nos ayuda a explicar las dinámicas de las estrellas, y sus muchos tipos, sus diferentes constituciones químicas y nucleares, sus retorcidos campos magnéticos y sus manchas solares oscuras. Proporciona conocimiento sobre la tendencia de las estrellas a agruparse en vastas galaxias, separadas por vacíos más vastos todavía, y explica por qué las galaxias tienen esas formas tan interesantes. Nos

dice por qué las galaxias se combinan para formar cúmulos de galaxias, separados por vacíos todavía mayores.

Aun hay una escala mayor, la del universo como un todo. Este es el reino de la cosmología. Aquí la fuente de inspiración racional de la humanidad es casi por completo matemática. Podemos observar algunos aspectos del universo, pero no podemos experimentar sobre ellos como un todo. Las matemáticas nos ayudan a interpretar observaciones, permitiéndonos comparaciones «y si» entre teorías alternativas. Pero incluso en este aspecto, el punto de partida estaba más cerca de casa. La teoría general de la relatividad de Einstein, en la que la fuerza de la gravedad es reemplazada por la curvatura del espacio-tiempo, reemplaza a la física newtoniana. Los geómetras y filósofos de la Antigüedad lo habrían aprobado: la dinámica se reducía a geometría. Einstein vio sus teorías verificadas por dos de sus propias predicciones: cambios en la órbita de Mercurio, conocidos pero desconcertantes, y la desviación de la luz por el Sol, observada durante un eclipse solar en 1919. Pero no podía haberse dado cuenta de que su teoría llevaría al descubrimiento de uno de los objetos más extraños de todo el universo: los agujeros negros, tan grandes que ni siquiera la luz puede escapar de su atracción gravitatoria.

Definitivamente falló al no reconocer una consecuencia potencial de su teoría: el Big Bang. Esta es la propuesta de que el universo se originó a partir de un único punto, en algún momento, en un pasado distante, hace alrededor de 13 800 millones de años según las estimaciones actuales, en algo así como una explosión gigantesca. Pero fue el espacio-tiempo lo que explotó, no alguna otra cosa explotó en el espacio-tiempo. La primera evidencia de esta teoría fue el descubrimiento de Edwin Hubble de que el universo se expande. Hagamos todo el recorrido hacia atrás en el tiempo, todo se colapsa en un punto; ahora rei-

niciemos el tiempo en la dirección normal para volver aquí y ahora.

Einstein se lamentó de que podía haber predicho esto si hubiese creído en sus propias ecuaciones. Por esto podemos estar seguros de que no se lo esperaba.

En ciencia, nuevas respuestas desvelan nuevos misterios. Uno de los más grandes es la materia oscura, un tipo de materia completamente nueva que parece ser necesaria para conciliar las observaciones de cómo giran las galaxias con lo que conocemos de la gravedad. Sin embargo, en la búsqueda de materia oscura se ha fracasado de manera rotunda. Además, para que el cosmos cobre algo de sentido, se requieren otros dos complementos de la teoría original del Big Bang. Uno es la inflación cósmica, un efecto que provocó que el universo inicial creciese una cantidad verdaderamente enorme en un instante de tiempo verdaderamente pequeño. Se necesita para explicar por qué la distribución de la materia en el universo actual es casi, pero no del todo, uniforme. La otra es la energía oscura, una fuerza misteriosa que provoca que el universo se expanda a un ritmo cada vez más rápido.

El Big Bang es aceptado por la mayoría de los cosmólogos, pero solo cuando estos tres extras (materia oscura, inflación cósmica, energía oscura) se añaden a la mezcla. Sin embargo, como veremos, cada una de estas *dei ex machina* acarrea una multitud de problemas. La cosmología moderna parece que ya no es tan segura como hace una década y quizá haya una revolución en camino.

Las leyes de la gravedad de Newton no fueron los primeros patrones matemáticos que se discernieron en los cielos, pero concretaron el enfoque completo, además de haber llegado más lejos que cualquier otro descubrimiento anterior. Constituyen un tema central de *Las matemáticas del cosmos*, un descubrimiento clave que recae en el

corazón del libro. En concreto, hay patrones matemáticos en los movimientos y estructuras tanto de cuerpos celestes como de cuerpos terrestres, desde las partículas de polvo más pequeñas hasta el universo como un todo. Comprender estos patrones nos permite no solo explicar el cosmos, sino también explorarlo, explotarlo y protegernos de él.

Se podría decir que el mayor avance ha sido darse cuenta de que hay patrones. A partir de esto, ya se sabe qué buscar, y aunque sea difícil encontrar las respuestas, los problemas se convierten en un tema de procedimientos. A menudo hay que inventarse ideas matemáticas completamente nuevas, pero no digo que esto sea fácil o directo, porque es una carrera de fondo y todavía se está corriendo.

El planteamiento de Newton también desencadenó un reflejo estándar. Tan pronto como el último descubrimiento sale del cascarón, los matemáticos empiezan a preguntarse si una idea similar resolvería otros problemas. El deseo de hacer todo más general es propio de la psique matemática. No está bien echarle la culpa a Nicolas Bourbaki^[5] y la «matemática moderna»: se remonta a Euclides y Pitágoras. A partir de este reflejo, nació la física matemática. Los contemporáneos de Newton, principalmente en la Europa continental, aplicaron los mismos principios con los que habían profundizado en el cosmos para comprender el calor, el sonido, la luz, la elasticidad y más tarde la electricidad y el magnetismo. Y el mensaje sonó incluso más claro:

La naturaleza tiene leyes.

Estas son matemáticas.

Podemos encontrarlas.

Podemos utilizarlas.

Por supuesto, no fue tan simple.