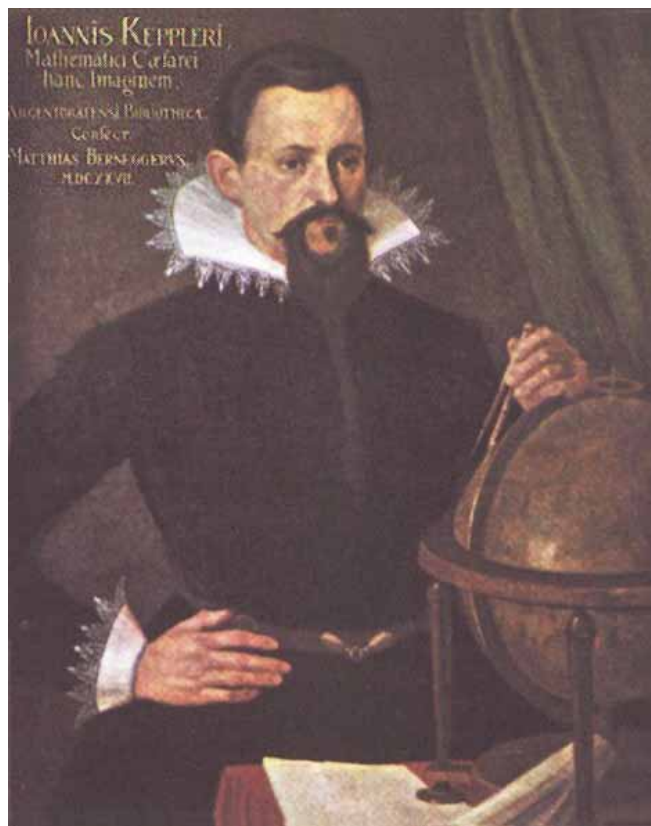


Hace cuatrocientos años ocurrieron dos acontecimientos notables para el progreso de nuestra comprensión del Universo: la publicación de la *Astronomía Nova* por parte de Kepler, con sus leyes sobre las órbitas de los planetas, y la construcción por parte de Galileo de su primer Telescopio. Precisamente, en conmemoración de semejantes sucesos, se ha declarado este 2009 como el año de la Astronomía, y no son pocos los países que lo han reflejado en la emisión de singulares sellos de correos.

Es notable el hecho de que Kepler haya obtenido sus resultados sin poseer la ayuda de un instrumento de observación tan potente como el telescopio, ya que el uso de este aparato por Galileo es posterior a los estudios reflejados en la *Astronomía Nova*. No poseía Kepler más instrumento que la observación a simple vista... y su inteligencia. Pero, ¿cómo pudo llegar a encontrar sus famosas leyes con semejante pobreza de medios?

Kepler da los primeros pasos

Johannes Kepler nació el 27 de diciembre de 1571 en la pequeña ciudad de Weil der Stadt, ciudad libre si bien se hallaba bajo la influencia del ducado de Württemberg. Según consta en el relato que él mismo escribiría a los 26 años, fue sietemesino, y esto le proporcionó de origen una salud un tanto enfermiza. En 1574, su padre se alistó en el ejército del duque de Alba para someter a los rebeldes de los Países Bajos, y al poco tiempo fue seguido por su mujer, con lo que la fami-



lia Kepler se quedó al amparo de unos abuelos que se ocupaban más bien poco de los nietos.

En 1576, vuelven los padres, y se trasladan a la cercana ciudad de Leonberg, perteneciente al ducado de Württemberg. Para el pequeño Johannes esto supuso una importante novedad, ya que aquí pudo ir a la escuela y comenzar su educación.

Santiago Gutiérrez

Sociedad Madrileña de Profesores de Matemáticas *Emma Castelnuovo*
hace@revistasuma.es

Durante la primera etapa escolar sufría de frecuentes fiebres, y sus padres, al constatar su delicada salud y su nula disposición para las labores del campo, deciden dedicarlo a la carrera eclesiástica, destino frecuente en aquella época para los jóvenes de valía intelectual. Así que a la edad de 13 años, aprobado el examen de grado, ingresa en el seminario de Alberg, donde realizará los estudios de la segunda etapa escolar, con un currículo a tenor del *trivium* y el *quadrivium* propios de la época, todo ello en latín, lengua oficial de la enseñanza y con la que se comunicaban los estudiantes.

En 1588 aprueba el examen que le permite acceder a la Universidad de Tubinga, uno de los centros de estudios superiores más prestigiosos del mundo protestante. Pero, su ingreso en la Universidad no se realizará hasta el año siguiente, debido a la falta de plazas disponibles de becarios como era su caso. Por entonces su padre, alistado en los ejércitos de Nápoles, desaparece definitivamente de su vida.

En Tubinga, encuentra notables profesores que van a tener una gran influencia en su formación. Destaca sobre todos Michael Maestlin, su profesor de Astronomía, quien de modo privado, fuera del ámbito escolar, le da a conocer la teoría copernicana. Esto provocó en el joven Kepler un enorme impacto, según él mismo nos relataría en el prefacio de su primera obra, *El secreto del universo*:

Ya en Tubinga, cuando seguía atentamente las enseñanzas del famoso maestro Michael Maestlin, percibí hasta que punto estaban mal dispuestas en muchos aspectos las nociones acerca de la estructura del mundo mantenidas hasta entonces. Me encontraba muy impresionado por Copérnico, a quien mi maestro citaba muy a menudo, hasta el punto que no sólo defendía sus puntos de vista en las disputas, sino que también hice una cuidadosa *disputatio* acerca de las tesis del movimiento de las estrellas fijas como resultado de la rotación de la Tierra.

El nuevo rumbo

Se encontraba Kepler en el tercer año de sus estudios, último para cumplir su gran deseo de convertirse en clérigo, y dedicarse a la difusión de las ideas luteranas por el sur de Alemania, cuando una circunstancia fortuita alteró totalmente sus planes. En el año 1594, la Universidad de Tubinga, donde cursaba Kepler sus estudios, recibió la petición de un profesor para cubrir la plaza que había quedado vacante en el seminario protestante de Graz. Debía enseñar Matemáticas y Astronomía, además de desempeñar el cargo de Matemático Provincial, que le obligaba a elaborar los almanaques y realizar los pronósticos astrológicos anuales. La Universidad decide enviar a Kepler considerando que es la persona más idónea para ocupar el puesto.

No poseía Kepler más instrumento que la observación a simple vista... y su inteligencia

No volvió Kepler a Tubinga a terminar sus estudios de Teología. Atrás quedaba su carrera como clérigo. Y a partir de su estancia en Graz, sin perder su profundo espíritu religioso, surge un nuevo Kepler, ocupado ahora apasionadamente en las Matemáticas y la Astronomía. Así se lo comunica a Maestlin, con quien no cesa de cartearse para pedirle opinión sobre los trabajos astronómicos que va desarrollando:

...yo deseaba llegar a ser un teólogo, y por mucho tiempo estuve desasosegado. Ahora, sin embargo, me doy cuenta de cómo con mi esfuerzo Dios puede ser celebrado a través de la Astronomía.



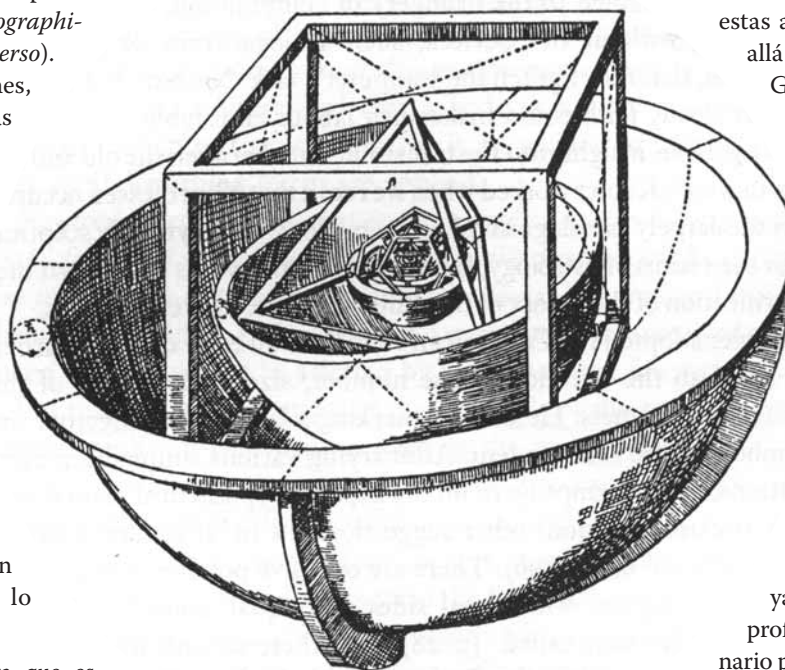
Sus primeras preguntas: ¿Por qué son seis los planetas, y están a las distancias que están, y se mueven como lo hacen? Durante un tiempo, estuvo trabajando con los datos proporcionados por Copérnico, buscando relaciones entre las diferencias, los cocientes, las distancias, los tiempos... Pero, sin conseguir encontrar ninguna constante o ninguna relación, tan solo, como él mismo nos dice, memorizar los datos de Copérnico sobre distancias y tamaños.

Sus primeras preguntas: ¿Por qué son seis los planetas, y están a las distancias que están, y se mueven como lo hacen?

Su método de trabajo a ningún científico podría extrañarle en la actualidad, consistía en intuir, imaginar, especular, elaborar una hipótesis, y contrastarla con los datos de la realidad. De este modo obtiene sus primeros resultados, y los expone en su libro *Mysterium cosmographicum* (*El secreto del Universo*).

Entre otras consideraciones, trata en este libro sobre las razones por las que resultan adecuadas las hipótesis de Copérnico, si bien lo corrige en algunos datos, además de pronunciarse radicalmente a favor de la idea de que el Sol ocupa el centro geométrico del Universo, cosa que no hacía Copérnico, que lo consideraba ligeramente desplazado del centro. En cuanto a su contenido, lo explica así:

La Tierra es una esfera que es medida de todo. Circunscribe un dodecaedro. La esfera que lo circunscribe será Marte. Circunscribe a Marte con un tetraedro, la esfera que comprenda a éste será Júpiter. Circunscribe a Júpiter con un cubo. La esfera que comprenda a éste será Saturno. Ahora inscribe en la Tierra un icosaedro. La esfera inscrita en éste será Venus. Inscribe en Venus un octaedro. La esfera inscrita en él será Mercurio. Tienes la razón del número de los planetas.



Kepler da un paso más respecto a todos los estudios astronómicos anteriores. Se pregunta no solo por la posición, las distancias, los caminos recorridos y los tiempos, sino también por cual es la causa del movimiento de los planetas. ¿Por qué se mueven? Se introduce así la Física en la Astronomía. Sobre la distinta velocidad con que se mueven los planetas, tanto menor cuanto mayor es su alejamiento del Sol y por tanto mayor es su órbita, piensa que debe haber algo así como un *anima motrix* en el Sol que va disminuyendo en influencia y fuerza según el planeta se va alejando de él.

En 1597, Kepler, ya con cierto prestigio en Graz, debido a sus éxitos en los pronósticos que realiza como Matemático Provincial, se casa con Barbara Müller, hija de un hacendado comerciante, que a pesar de contar con solo 23 años era ya doblemente viuda y madre de Regina una niña de 7 años. En 1598, nace de este matrimonio un hijo, que torna la alegría del nacimiento por la tristeza de su temprana muerte, a los dos meses de venir al mundo.

Por esas fechas toma el poder en Estiria el archiduque Fernando, de la familia de Habsburgo, dispuesto a imponer el catolicismo en toda Austria. Las luchas que se producen por la resistencia de las comunidades protestantes, obligan a estas al abandono de la ciudad, y allí se va Kepler, dejando en Graz a la familia y todos sus bienes. Pero, para Kepler este exilio dura poco tiempo, ya que su buen hacer como Matemático Provincial y su anterior amistad con el canciller de Baviera, Herwart von Hohenburg, le permiten regresar a su domicilio de Graz y reunirse con su familia.

No obstante, se queda prácticamente sin trabajo, ya que con el exilio se han ido profesores y alumnos del seminario protestante donde él impartía sus clases, y el cargo de Matemático Provincial le lleva muy poco tiempo, y sólo en determinados momentos del año. De modo que se dedica por entero a sus estudios astronómicos.

El encuentro con Tycho Brahe

En la primavera de 1597, había recibido Kepler los primeros ejemplares de *El secreto del Universo*, y había distribuido algunos de ellos a diversos científicos, con el objeto de que valoraran su obra y le remitieran los oportunos comentarios. Entre esos científicos se encontraban dos de particular relieve: Galileo y Tycho Brahe. Galileo le había contestado inmediatamente agradeciéndole el envío, pero que había leído sólo el prefacio. En cuanto a Tycho, al hallarse viajando por Dinamarca y Alemania, no pudo recibir y leer el libro, en su residencia habitual de Praga, hasta un año después. Galileo no contestaría a un nuevo requerimiento de Kepler. Por su parte, los comentarios de Tycho incluían una crítica bastante sensata en el sentido de que utilizaba excesivamente sus presupuestos geométricos para obtener conclusiones y que debía tener más en cuenta los datos, aunque no los copernicanos, cuya inexactitud el propio Tycho conocía por propia experiencia.

*Su método de trabajo ...
consistía en intuir, imaginar,
especular, elaborar una
hipótesis, y contrastarla con los
datos de la realidad*

El caso es que, sin trabajo con el que justificar su sueldo, Kepler decide visitar a Tycho, con quien se carteaba a menudo y que tanto y tan bien le hablaba de la calidad de los datos que obtenía en sus observaciones.



Una vez en Praga, recibe una invitación de Tycho para que se traslade a su residencia de Benatky y se sume a su trabajo. Tycho era una persona muy distinta a Kepler, procedía de una distinguida familia, y había sido nombrado Matemático Imperial por Rodolfo II, con un salario de 3.000 guldens. Gozaba pues de una posición económica más que desahogada, por lo que podía darse el lujo de disponer de varios ayudantes y servidores, con los que mantenía un trato distante un tanto despótico. Era altivo y orgulloso. Kepler, al contrario era una persona humilde, de trato cercano, preocupado por su trabajo, con un salario de 200 guldens, y tuvo una vida llena de penalidades, tanto económicas como familiares.

Kepler participaba del trabajo de Tycho, colaborando con sus ayudantes Tanagel y Longomontano, y creía que la obtención de los datos que necesitaba, sobre excentricidades y distancias, sería cosa de poco tiempo. Pero, Tycho no proporcionaba sus datos así como así, lo hacía lentamente, muy poco a poco. No obstante, Kepler continuaba en Benatky, con el único objetivo de conseguir esos datos que tanto necesitaba para desvelar la armonía universal, idea directriz de todo su esfuerzo. El mismo nos lo dice:

Tycho posee las mejores observaciones y consecuentemente en ellas se encuentra el material para la elaboración de una nueva estructura; también tiene ayudantes y todo lo que uno pudiera desear. Solo carece del arquitecto que emplee todo eso de acuerdo con un plan.

Por su parte a Tycho le venía muy bien Kepler, un teórico con una gran y profunda imaginación, capaz de deducir, a partir de los datos, cual pudiera ser la estructura del sistema planetario. Ante la magnitud del trabajo, y dado que ambos se necesitan, Kepler inicia con Tycho unas negociaciones de colaboración, que tras muchas vicisitudes acaban felizmente. Intenta entonces que en Graz se le conceda el traslado a Praga, durante dos años, manteniéndole el sueldo, para trabajar como ayudante del Matemático Imperial. Pero en Graz se encuentra con un recrudecimiento de la intolerancia religiosa que le obliga a renunciar a su cargo y marcharse de la ciudad.

Vuelve a Praga, y Tycho le presenta al emperador, no sin aprovechar la ocasión para ofrecerle a Rodolfo II las tablas con las observaciones que entre los dos están realizando. Serán las llamadas *Tablas Rudolfinas*, en las que se recogían las posiciones y los cálculos más exactos para el servicio de los astrónomos de todo el mundo.

Ocurre que el destino juega una mala pasada, pero esta vez en favor de Kepler. En octubre de 1602 muere Tycho, no sin antes, en el lecho de muerte, confiar a Kepler todo el conjunto de sus observaciones y encargarle de finalizar las *Tablas Rudolfinas*.

A los dos días de la muerte de Tycho, Kepler es nombrado Matemático Imperial por Rodolfo II, con lo que su vida va a dar un cambio radical, tanto en lo económico como sobre todo en el reconocimiento social y científico.

Se inicia un periodo especialmente fructífero para Kepler. Dedicado intensamente a su trabajo escribe una decena de obras, entre ellas la *Dióptrica*, producto de la correspondencia que mantiene con Galileo, y la *Astronomía nova*, cuya conmemoración nos ocupa.

La vida familiar se ve también favorecida por la fortuna. Tiene tres hijos y se casa su hijastra Regina.

El problema de Marte

Además de las obligaciones del cargo, en cuanto a las relaciones sociales y la atención a los científicos que venían a consultarle, Kepler debía de seguir trabajando en su tarea de completar las *Tablas*, según el encargo de Tycho. Para ello era necesario resolver el problema de la órbita de Marte. Se trataba de determinar el plano de la órbita de modo que contuviera al sol real, y no al sol medio que hubo de definir Copérnico, dado que el sol real, según él, se hallaba desplazado del centro del círculo de las órbitas planetarias.

En 1602, recién llegado a Praga, liberado de las presiones de Tycho sobre la dirección de sus investigaciones, se pone de nuevo manos a la obra, y calcula que el plano de la órbita de Marte se inclina $1^{\circ}58'$ sobre la eclíptica. A partir de aquí encamina sus esfuerzos a determinar la órbita utilizando las observaciones de Tycho y dado que conocía el periodo de Marte. Se podía así determinar el círculo al que se ajustaban los datos y establecer la excentricidad, todo ello a través de largos cálculos, un tanto pesados.

Pero, utilizar movimientos circulares y con velocidad uniforme le conducía a errores. Pensó entonces que debía rehacer los cálculos de Tycho, realizados sobre el esquema tolemaico del Sol girando alrededor de la Tierra. Se trataba de volver a determinar la órbita de la Tierra y a partir de ella la de Marte.

Sus trabajos le llevan a resultados que difieren sensiblemente de los de Tycho. La Tierra en su órbita mostraba excentricidad lo mismo que cualquier otro planeta, lo cual confirmaba una vez más la teoría de Copérnico. Así que la aparente variación de velocidad que observaba comenzaba a tener visos de realidad. Vuelve a sus consideraciones dinámicas. La vaporosa idea del *anima motrix* se convertía en una auténtica fuerza que emanaba del Sol y originaba el movimiento de los planetas, decreciendo de modo inversamente proporcional a la distancia a que se hallaban estos del Sol.

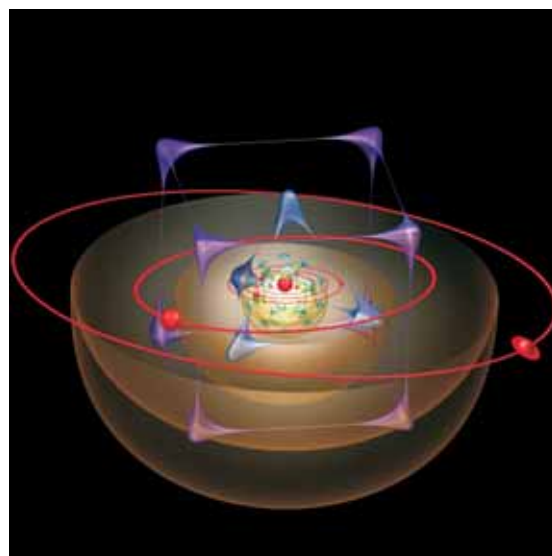
Para confirmar su teoría necesita encontrar una regla que le permita calcular el tiempo empleado por el planeta en recorrer el espacio ocupado entre dos posiciones. Parte de una hipótesis: los tiempos empleados en recorrer pequeños arcos (infinitesimales, diríamos hoy) son proporcionales a su distancia al Sol. Lo aplica al caso de la Tierra y obtiene resultados satisfactorios.

Animado por el éxito, extiende su idea a arcos grandes, considerando que el conjunto de distancias al Sol de todos los puntos constituyen el área subtendida por el arco y los radios vectores extremos, y formulando su conclusión de que la razón entre el tiempo transcurrido en recorrer un pequeño arco y su distancia al Sol es igual a la razón entre el tiempo transcurrido en recorrer un arco cualquiera y el área subtendida por el arco. Y de ahí pasa a establecer que esta razón es constante cualquiera que sea el arco recorrido por el planeta, o bien, que en tiempos iguales el planeta barre áreas iguales. Es decir, si son T_1 y T_2 los tiempos que tarda el planeta en recorrer dos arcos cualesquiera, y A_1 y A_2 las respectivas áreas contenidas entre los radios vectores de los extremos, se verifica:

$$\frac{T_1}{A_1} = \frac{T_2}{A_2}$$

Intenta aplicar esta conclusión a Marte, y obtiene el fatídico error de que le persigue de antiguo. Retoma entonces valores especialmente precisos de Tycho y calcula de nuevo la órbita. Determina con ellos una trayectoria que encaja en un círculo pero que se achata en los 90° y los 270° . Aplica entonces el método, ya utilizado con Mercurio, de considerar un pequeño epiciclo, y obtiene una curva ovoidal. Dice:

...si la figura fuera una elipse, entonces lo que sabemos gracias a Arquímedes y a Apolonio nos sería suficiente.



Todavía se le resistía el acuerdo entre esta hipótesis de la elipse y su ley de las áreas. La cuestión podía resolverse si pudiera encontrar la forma de calcular el tamaño de la *lúnula* encerrada entre el círculo y la elipse. Después de muchos trabajos consigue su propósito de ver que la elipse encontrada se ajusta perfectamente a los datos y a la ley de las áreas.

Así consigue Kepler demostrar que los planetas se mueven describiendo elipses uno de cuyos focos es el Sol, de tal modo que los tiempos empleados en recorrer sus arcos son proporcionales a las áreas barridas por sus radios vectores. Estos resultados constituyen las conocidas como dos primeras leyes de Kepler.



Estos resultados, le permitirán terminar las *Tablas Rudolfinas* y cumplir con el encargo de Tycho. Todo ello lo publica Kepler el año 1609 en su *Astronomía Nova*, aunque al parecer tenía acabado el original desde 1605. Incluye además, en la introducción de esta obra, sus consideraciones dinámicas acerca del origen de los movimientos planetarios, auténtico precedente de las teorías newtonianas, como puede verse por ejemplo en párrafos como este:

Si dos piedras fueran colocadas en cualquier parte del universo, cerca una de otra y lejos de la esfera de influencia de un tercer cuerpo, entonces, las dos piedras, como cuerpos magnéticos, se unirían en un punto intermedio, aproximándose cada una de ellas una distancia proporcional a la otra.

El mérito de Kepler es grande. Pues, si bien las teorías heliocéntricas estaban en boca de los científicos de la época desde hacía más de medio siglo, la teoría de las órbitas elípticas, en lugar de las circulares copernicanas, y la introducción de la fuerza solar como causa de los movimientos planetarios, eran obra exclusiva de Kepler.

Para realizar semejante hazaña se apoyó, desde luego, en los datos observados por Tycho, pero quedaba casi todo por hacer. Hacía falta el tesón, la intuición, la imaginación y la asombrosa capacidad matemática de un genio como el de Kepler para llegar hasta el final.

El final de la vida de Kepler no es menos desgraciado en el terreno familiar de lo que fue su vida. En 1611 mueren su segundo hijo y su mujer Barbara. El año siguiente y a la muerte de su protector, Rodolfo II, parte para Linz, donde se casa de nuevo con Susanne Reuttinger. Con ella tiene 7 hijos, de los cuales 5 mueren a poco de nacer. En 1618 muere su segunda hija de Barbara. Finalmente, en 1630, muere el propio Kepler en Ratisbona, con 58 años, a donde se había desplazado dos años antes.

HACE ■

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

García Hourcade, J.L. (2000): *La rebelión de los astrónomos. Copérnico y Kepler*. Madrid: Nivola.