

# Algunas notas sobre la obra de Kepler\*

Silvia Torres Castilleja\*\*

---

## RESUMEN

Se presenta una reflexión personal sobre la obra de Kepler y las consecuencias que sus descubrimientos tuvieron sobre la astronomía, la física y la ciencia en general. Presento en este trabajo algunos de los momentos clave de su carrera científica. En particular su compromiso con el sistema copernicano, que no había tenido demasiada aceptación; más tarde el contacto que sostuvo con el astrónomo danés Tycho de Brahe lo que permitió a Kepler, con grandes dificultades usar las observaciones mas precisas de Marte; y otra influencia decisiva fueron las noticias de las observaciones espectaculares de Galileo, aunque éste nunca le respondió sus mensajes. Estoy convencida que sacó gran provecho de la época muy estimulante en la que vivió. Su trabajo modificó para siempre las perspectivas de la astronomía, de la física celeste y de la filosofía de la ciencia.

PALABRAS CLAVE: historia de la ciencia, Johannes Kepler.

## Abstract

A personal reflection on the work of Kepler and the consequences of his discoveries on astronomy, physics and science in general is presented. I briefly present some of the most important milestones in his scientific career, namely his commitment to the Copernican system, that had not been fully accepted; later, his association with the Danish astronomer Tycho Brahe which allowed Kepler, with great difficulty to get hold of the most precise observations of Mars; and even though Galileo never answered his letters, Kepler was fully aware of the spectacular observations performed by Galileo. It is my conviction that he took full advantage of the very stimulating epoch when he lived; his work modified forever the perspective of astronomy, celestial physics and philosophy of science.

KEYWORDS: History of Science, Johannes Kepler.

---

\* Trabajo presentado en el ciclo de conferencias organizado por el Fondo Antiguo y Colecciones Especiales de la Biblioteca Central de la UNAM en 2004.

\*\* Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Circuito Exterior s/n, Área de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, 04510 México D. F., México. Correo electrónico: silvia@astroscu.unam.mx

## Algunas notas sobre la obra de Kepler

### Introducción

No dejé de sentir una gran emoción cuando se presentó la oportunidad de tener en mis manos un ejemplar del libro *Epitome de la astronomía copernicana* y *La armonía de los Cielos* impreso en el año de 1635 y escrito por Johannes Kepler. Esta oportunidad se dio con motivo del ciclo de conferencias organizado por el Fondo Reservado de la Biblioteca Central de la UNAM. Esta ocasión me llevó a reflexionar sobre la importancia que tuvo la obra de Kepler en la astronomía moderna que presento en estas notas.

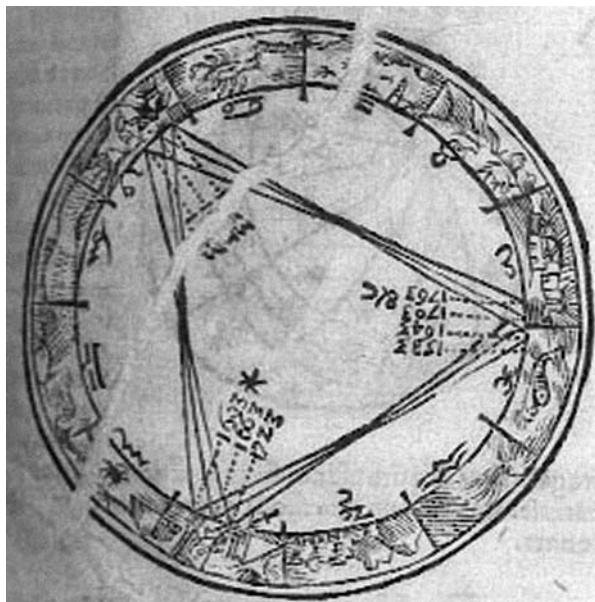
Entre las posibles representaciones del mundo, la que tenía mayor aceptación había sido descrita por Tolomeo de Alejandría en el siglo II, en el *Almagesto*; en ella, la Tierra está al centro de un conjunto de círculos en los que se mueven la Luna, los cinco planetas conocidos (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno) y por último se encuentra el círculo de las estrellas.

En su obra en 1543 Copérnico propone otra representación, en la que el Sol está al centro y se le asigna a la Tierra un círculo para desplazarse; este sistema tuvo poca aceptación por sus contemporáneos. Incluso en 1584 el astrónomo danés, Tycho de Brahe, no aceptó el modelo de Copérnico y propuso un sistema mixto para explicar los movimientos de los astros.<sup>1</sup> Fue el trabajo de Kepler, al presentar el sistema copernicano, lo que le dio mayor sustento.

### Vida y obra de Kepler

La vida de Kepler fue un tanto desventurada, pues además de ser enfermizo, vivió en épocas de gran turbulencia religiosa y tuvo serios problemas familiares y económicos. Por ser un luterano convencido fue perse-

<sup>1</sup> Este sistema supone que el Sol gira alrededor de la Tierra, y que a su vez, los planetas giran alrededor del Sol. El modelo había sido ya propuesto en la antigüedad.



*Diagrama en el que se representan los triángulos inscritos en un círculo y a su vez éstos delimitan un círculo menor. Kepler estaba preocupado porque al buscar relaciones geométricas entre las distancias de los planetas, encontró que el cociente de los radios de estos círculos corresponde al cociente de las distancias de Saturno y Júpiter (Epitome).*

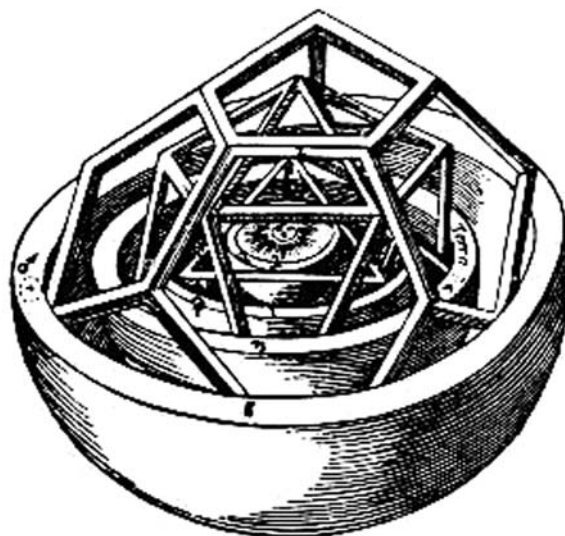
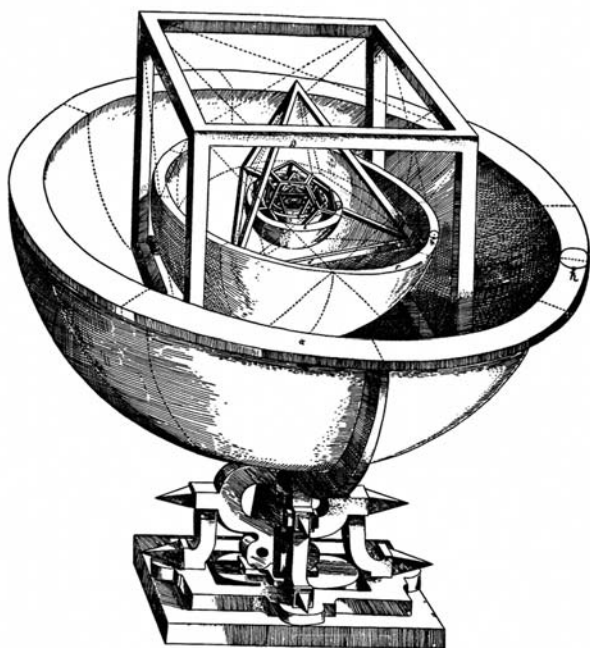
guido por la contra-reforma; al mismo tiempo por pertenecer a una corriente de luteranismo poco ortodoxo, le fue negada la comunión en la iglesia luterana. En diversas ocasiones tuvo que viajar a distintas ciudades no solamente en busca de empleo, sino huyendo de persecuciones religiosas. Nació el 27 de diciembre de 1571 en Weil der Stadt, en el sudeste de Alemania y murió el 15 de noviembre de 1630 en Regensburg.

Ingresó a estudiar teología en la Universidad de Tübingen, institución luterana. Como parte de sus estudios cursó matemáticas, astronomía y física, así como ética, dialéctica, retórica, griego y hebreo. En esta ciudad conoció a Michael Maestlin, un distinguido astrónomo, y una de las mayores influencias en su vida, quien le enseñó matemáticas y astronomía. Maestlin introdujo a Kepler a las ideas copernicanas alabando las ventajas matemáticas del sistema copernicano sobre el tolemeico.

Con pesar, Kepler interrumpió sus estudios de teología al ser invitado a enseñar matemáticas en un seminario protestante en Graz en Austria. Durante su estancia en esta ciudad se obsesionó con el problema de por qué Dios creó exactamente 6 planetas, precisamente a las distancias a las que se encuentran. Desde su perspectiva, Dios habría de ser un geómetra, y habría creado el mundo para representar formas geoméricamente interesantes. Propuso la tesis de que todas las proporciones en los cielos podrían explicarse usando combinaciones estéticamente interesantes de figuras geométricas para construir los movimientos circulares en el cielo. Este trabajo lo plasmó en su primer libro, *Mysterium Cosmographicum*.<sup>2</sup> A partir de una figura geométrica en la que en un círculo se inscribe una secuencia de triángulos o casi triángulos, Kepler notó que el cociente entre el círculo exterior y el

que se forma con los triángulos es muy semejante al cociente entre las distancias de las órbitas de Saturno y Júpiter, lo que lo entusiasmó a desarrollar estas ideas a mayor profundidad. La búsqueda de la explicación de los movimientos planetarios a través de las relaciones entre las órbitas de los planetas lo persiguió toda su vida, y los trató de representar como el cociente del tamaño de las esferas en las que se anidan los poliedros perfectos (tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro). Más adelante propuso que las velocidades de los planetas corresponden a las armonías musicales.

Kepler trató de entablar correspondencia con Galileo (con poca fortuna) y con el danés Tycho, quien lo invitó a trabajar con él. Éste había sido invitado a la corte del Emperador Rodolfo II en Praga como Matemático Imperial. Debido a un desafortunado incidente entre Nicholas Reymers Baer (Ursus) y Tycho, fue necesario que Kepler escribiera un tratado *Apologia*<sup>3</sup> en el que



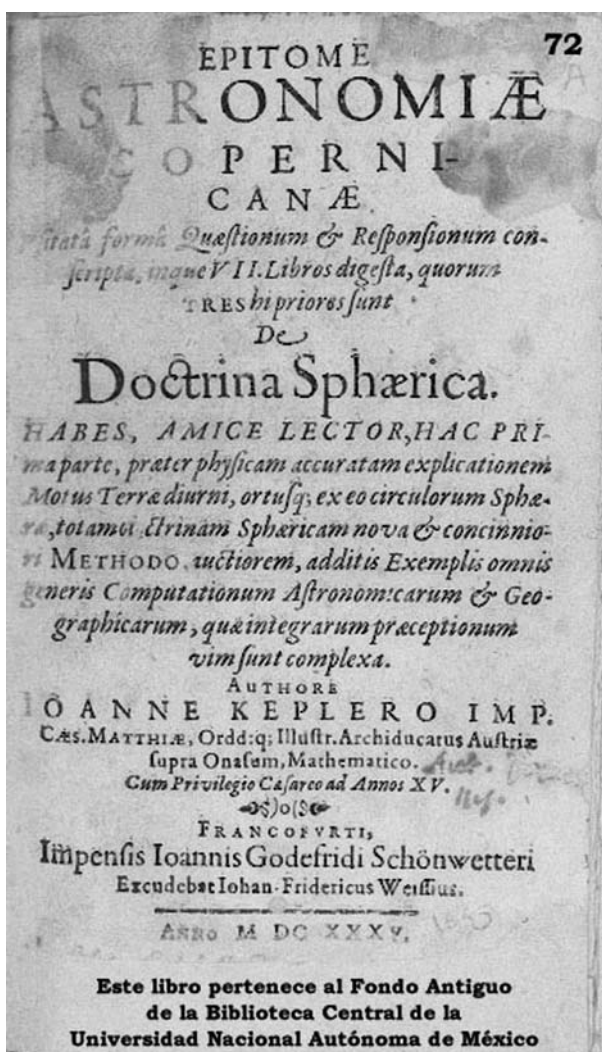
En su afán por buscar la armonía de los cielos, Kepler propuso que la relación entre las distancias de los planetas es semejante a los cocientes de las esferas que limitan la sucesión de cuerpos platónicos concéntricos. (izquierda) Representación de los planetas externos. (derecha) Detalle de representación de los planetas internos (Harmonice).

<sup>2</sup> *Misterio cosmografico*, 1597, Tübingen

<sup>3</sup> *Apología de Tycho contra Nicolai Ursum*

## Algunas notas sobre la obra de Kepler

hacía una defensa del trabajo de Tycho. En este texto metodológico, Kepler presentó sus puntos de vista sobre como se deben de construir y probar hipótesis. Argumenta por primera vez la necesidad de que la astronomía se base en la física, y así puso los cimientos de la revolución kepleriana en el método astronómico.



Portada de la edición de 1635 del libro *Epitome de la Astronomía Copernicana* de Kepler.

Durante 1600 Kepler visitó a Tycho unos meses, y más tarde huyendo de la persecución religiosa regresó a

Praga para establecerse con su familia. A su vez Tycho había prometido al emperador el cálculo de tablas astronómicas las que llamaría *Tabulae Rudolphinae*<sup>4</sup>, en honor al monarca, y como parte del proyecto solicitó el salario de un ayudante, que sería Kepler. Por su parte Kepler deseaba tener acceso a las mediciones de Tycho, que eran las observaciones más precisas disponibles en esa época de las posiciones de los planetas, para avanzar en sus teorías, pero Tycho apenas se las permitía conocer a cuentagotas. Durante su primera estancia en Praga, Kepler trabajó con las observaciones de Tycho, coincidiendo con Christian Sorensen Longberg (Longomontanus), ayudante de Tycho, cuando éste intentaba determinar la órbita del planeta Marte. Fue afortunada esta circunstancia ya que la órbita del planeta rojo presenta la mayor desviación de un círculo, exceptuando la de Mercurio. A Kepler no le fue posible representar la órbita de Marte mediante una órbita simple. Aunque originalmente pensó que resolvería el problema en 8 días, terminó trabajando en este tema durante muchos años.

Su colaboración con Tycho duró apenas 18 meses, pues el 24 de octubre de 1601 Tycho murió dejando el trabajo inconcluso. Kepler lo sustituyó en el cargo de Matemático Imperial con la obligación de mantener los instrumentos en buen estado y completar las publicaciones inconclusas de Tycho. La de mayor importancia sería de las *Tabulae Rudolphinae*. A pesar de su nombramiento tan prestigioso, el monto de su salario, resultó ser mucho menor del que recibía Tycho, y para colmo nunca le fue cubierto en su totalidad. Adicionalmente, tuvo dificultades con los herederos para poder usar los preciados datos de Tycho.

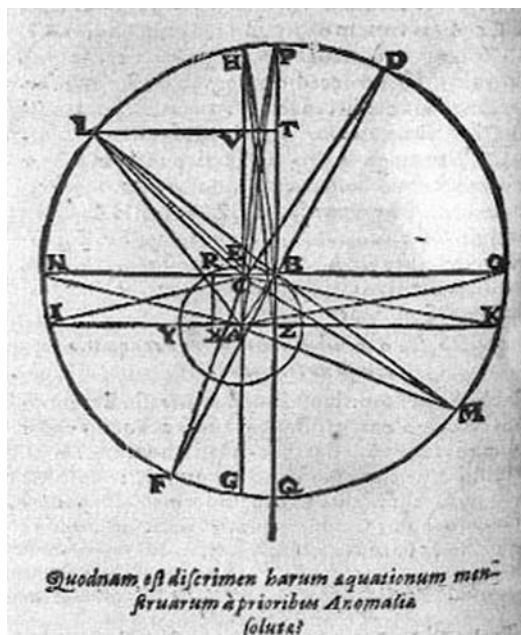
En 1602 se convenció que la órbita de Marte no es circular y a partir de estos estudios en ese mismo año introdujo la Ley de las áreas (ahora conocida como la Segunda ley de Kepler). Fue en 1605 cuando descubrió

<sup>4</sup> *Tablas Rudolfinas*, de 1616 a 1617, Ulm

que la órbita de Marte es una elipse con el Sol, en la posición de uno de sus focos (Primera ley). Estos descubrimientos los escribió en un libro que le llevó varios años terminar y que habría de ser uno de los documentos más importantes en la historia de la astronomía, *Astronomia Nova*.<sup>5</sup> Una vez más tuvo dificultades financieras para imprimirlo. En esta obra Kepler propuso que hay una fuerza que emana del Sol que impulsa a los planetas en sus órbitas, y no se conformó con una descripción geométrica sin causa física. Visualizó a esta fuerza como una escoba que barre al planeta y propuso que el Sol gira y que la fuerza que de éste surge gira con él y hace que los planetas lo sigan en su rotación; para oponerse a este movimiento propuso la existencia de una resistencia del planeta.

A raíz de un eclipse parcial de Sol en 1600, se interesó por estudiar la óptica y su relación a fenómenos astronómicos. Publicó su trabajo en *Astronomia pars Optica*<sup>6</sup> en el que presenta la explicación teórica de la cámara oscura, el primer estudio de la visión y el ojo, y determinó que la lente proyecta en el ojo la imagen en la superficie de la retina.

En marzo de 1610 llegaron las noticias de las observaciones de Galileo: la existencia de las lunas de Júpiter, de la superficie rugosa de la Luna y que la Vía Láctea está compuesta por miles de estrellas. La validez de estos descubrimientos no fue aceptada inmediatamente, pues observar estos fenómenos con el telescopio requería gran pericia y agudeza visual, además de romper con los esquemas previos. Como Matemático Imperial, la opinión de Kepler tuvo mucho peso en estos debates. Fue la primera voz pública de una autoridad científica reconocida que defendió a Galileo, pues recibió las noticias con gran entusiasmo. Al leer un ejemplar del libro de Galileo, que le fue prestado por el emperador, Kepler respondió a



Representación de las posiciones de Marte en oposición para determinar las características de la órbita. El Sol está en el punto A, fuera de centro, y el planeta describe el círculo (Epitome).

Galileo con una carta que publicó bajo del título de *Dissertatio cum nuncio sidereo*<sup>7</sup> en la que a pesar de no disponer de un telescopio para verificar las observaciones, apoyaba que éstas fueran plausibles.

Estimulado por las noticias del telescopio de Galileo, y para apoyar la validez de sus observaciones se propuso determinar los principios físicos de éste, y elaboró un apéndice a su anterior obra de óptica en la que propuso la teoría para un telescopio de dos lentes e incluso el diseño de un telescopio con dos lentes convexas. Este complemento lo publicó bajo el título de *Dioptrice*.<sup>8</sup>

Las lunas de Júpiter fueron los descubrimientos de Galileo más importantes para Kepler, ya que aunque su existencia no demostraba que Copérnico tenía razón, sí eliminaban definitivamente el modelo de la Tierra como centro del Universo. Fue hasta el verano de ese mismo año que pudo observar con sus propios ojos tal portento, pues el Duque de Bavaria le prestó su telescopio. Kepler presentó sus

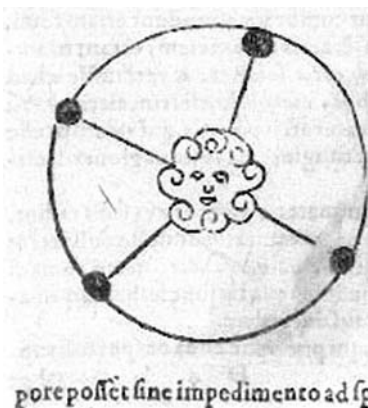
<sup>5</sup> *Astronomia Nueva*, 1609

<sup>6</sup> *La parte óptica de la Astronomía*, 1604, Frankfurt

<sup>7</sup> *Conversación con el mensajero sideral*, 1610

<sup>8</sup> *Dioptrías*, 1611

## Algunas notas sobre la obra de Kepler



Representación de la fuerza que emana del Sol y afecta a los planetas (*Epitome*).

telescopio.

En 1612 Kepler se mudó a Linz donde trabajó durante 14 años. En esa ciudad escribió y publicó las obras *Epitome Astronomiae Copernicanae*<sup>10</sup> y *Harmonice Mundi*.<sup>11</sup> La primera es un tratado en varios libros que fueron publicados por partes y que representan sus ideas ya más asentadas y maduras sobre la astronomía copernicana, la segunda fue una exploración de la naturaleza armoniosa y divina de los cielos, en una síntesis de geometría, música, astrología, astronomía y epistemología.

Una vez más la desgracia lo alcanzó, pues en 1616 su madre fue acusada de brujería, por lo que la familia incurrió en una serie de gastos inesperados y en gran desasosiego. Después de 14 meses de cárcel, el proceso terminó felizmente en 1621 cuando se liberó a la anciana. Durante este periodo el trabajo de Kepler fue interrumpido en varias ocasiones.

observaciones en un pequeño texto *Reporte de observación de los cuatro satélites errantes de Júpiter*<sup>9</sup> en el que confirma los descubrimientos de Galileo.

Por cierto, Galileo nunca aceptó las leyes de Kepler como válidas para explicar el movimiento de los planetas, ni reconoció sus descubrimientos de óptica y nunca se refirió a su diseño de

En mayo de 1618, al mismo tiempo que estallaba la guerra de los 30 años, que devastó Austria y Alemania, Kepler descubrió la ley de la relación entre las distancias y los periodos de los planetas (Tercera ley). A pesar de todas estas dificultades, Kepler terminó y publicó la *Harmonice Mundi* y los capítulos restantes del *Epitome*.

En 1626 Kepler se trasladó de Linz a Ulm donde finalmente terminó las *Tabulae Rudolphinae*. Este trabajo monumental, basado en las observaciones de Tycho y bajo la formulación de las órbitas elípticas; es principalmente un conjunto de tablas y reglas para calcular las posiciones de los planetas, además contiene las posiciones de 1055 estrellas. Más que sus trabajos anteriores estas tablas le aseguraron la fama pues fueron las tablas astronómicas más extensas y de mayor exactitud; debido a éstas, muchos astrónomos del siglo XVII leyeron sus otras obras. Esta obra fue durante más de un siglo referencia obligada para el estudio del cielo, tanto para planetas como para estrellas.

Una vez más en 1627 Kepler tuvo que mudarse, para dirigirse a Sagan bajo la protección del General Wallenstein de quien sería su matemático personal, con el encargo de darle consejos astrológicos para sus decisiones políticas y militares. Las condiciones de trabajo eran favorables, pues le permitirían continuar sus investigaciones. Tres años después, sin haber realmente encontrado un ambiente cultural propicio, ni facilidades de impresión, emprendió el viaje a Linz para cobrar el dinero que todavía le debían, y para entregar el volumen de efemérides para los años 1621 a 1636 que había completado para Wallenstein. En esta ocasión las dificultades provenían de que su protector había caído en desgracia con el Emperador.

En octubre de 1630, sin empleo, Kepler se dirigió a Regensburg a tratar de cobrar los casi 12,000 florines que le adeudaban. Durante el viaje falleció.

<sup>9</sup> *Narratio de Orbitabis Quatur Jovis Satellitibus*

<sup>10</sup> *Epitome de la Astronomia Copernicana* publicado por secciones, 1617 a 1621, Frankfurt

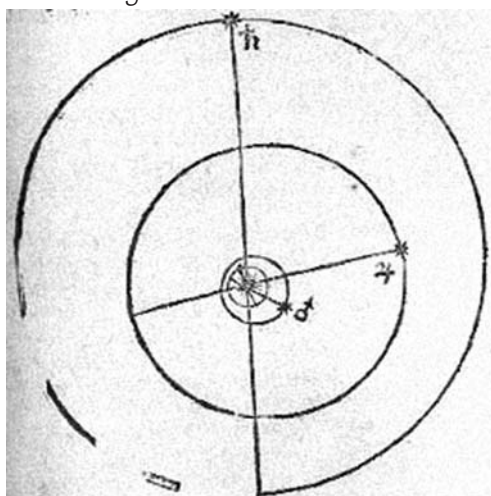
<sup>11</sup> *Armonía de los mundos*, 1619, Linz

## Principales aportaciones científicas

Fueron 37 años de trabajo en los que Kepler plasmó su pensamiento en varios libros que cambiaron la perspectiva de la astronomía y contribuyeron en forma importante a la óptica, física celeste y la filosofía de la ciencia.

Una de sus mayores aportaciones fue romper con la representación de los movimientos por medio de círculos. Antes de la obra de Kepler no había ninguna razón para sospechar que los movimientos planetarios no fueran circulares. Se creía que al ser los cielos el reino de la perfección, y por ser el círculo y la esfera las figuras más perfectas geométricamente, éstos representaban el movimiento natural para los cuerpos celestes. La idea de un movimiento circular perfecto era tan bella que era imposible considerar ningún otro tipo de figura geométrica al construir modelos planetarios.

Adicionalmente el pensamiento de la época partía del concepto de velocidad uniforme de las esferas. Concebir que una esfera rotara en forma no uniforme era antagónico a la idea de la esfera, pues son éstas las que representan el movimiento inmutable. La mayor influencia en la astronomía matemática era el sistema de Tolomeo. En el *Almagesto* Tolomeo desarrolló la teoría de los epiciclos,



Esquema de las órbitas de la Tierra, Marte, Júpiter y Saturno (Epitome).

para explicar el movimiento retrógrado de los planetas. El modelo básico del epiciclo consiste en un círculo principal, (deferente) y un círculo secundario (epiciclo). Adicionalmente, para explicar que el Sol y la Luna pasan mayor tiempo de un lado

del círculo que otro, salvando el principio de movimiento circular uniforme, postuló que la Tierra está fuera del centro del círculo (excéntrica). En sentido estricto el sistema Tolomaico no era completamente compatible con la descripción física de los cielos de la tradición aristotélica, sin embargo lograba predecir las posiciones aproximadas de los planetas.<sup>12</sup> Por su parte, Copérnico en su nueva propuesta de colocar el Sol al centro del Universo, también requirió de epiciclos para explicar las posiciones relativas del Sol, la Luna y los planetas.<sup>13</sup>

Otra enorme aportación de Kepler fue que introdujo el concepto de que los movimientos de los planetas podrían estar sujetos a causas físicas, a diferencia de que anteriormente se planteaban exclusivamente modelos geométricos para predecirlos. Hasta entonces la separación entre la Tierra y el Cielo era tal que no se podía usar información obtenida al estudiar los objetos en la Tierra en la exploración de los Cielos. De acuerdo a Aristóteles la física celeste y la física terrestre eran dos disciplinas completamente distintas. Sin embargo Kepler propuso que los movimientos obedecen a fuerzas que emanan del Sol, y que esta fuerza es menor a mayor distancia de él; ya que los planetas se mueven más rápidamente cuanto más cerca están del Sol.

Formuló lo que se conoce como las Leyes de Kepler:

1.) Los planetas se mueven en órbitas elípticas y el Sol está en uno de los focos; 2.) La línea que conecta al planeta y al Sol barre áreas iguales en tiempos iguales y 3.) El cuadrado de los periodos de los planetas es proporcional al cubo de las distancias de éstos al Sol. Aunque no alcanzó las interpretaciones físicas correctas, ciertamente sentó las bases para los desarrollos de Newton sobre la gravitación universal. Estas tres leyes son los pilares en los que descansa la cosmología moderna.

<sup>12</sup> de acuerdo a Koestler este sistema consiste de 48 epiciclos


<sup>13</sup> Aunque Galileo indicó que con 34 epiciclos se podían explicar la estructura del Universo y la danza de los planetas.

## Algunas notas sobre la obra de Kepler

Es menos conocida su aportación a la óptica, pero debe señalarse que sus estudios sobre esta disciplina fueron fundamentales en el desarrollo de la óptica del siglo XVII.

### Conclusiones

En la era actual en la que recibimos información de las galaxias más distantes gracias al desarrollo vertiginoso de la tecnología, los grandes telescopios y los telescopios a bordo de las naves espaciales, resulta una gran satisfacción para mí el sorprenderme una vez más con los logros y descubrimientos que Johannes Kepler alcanzó hace cuatro siglos. Proponer que los movimientos de los planetas no son círculos y demostrar que efectivamente se pueden representar mejor las posiciones de los mismos fue un rompimiento con las ideas tradicionales. Argumentar por primera vez la necesidad de que la astronomía se base en la física, sentaron los cimientos de la revolución kepleriana en el método astronómico.

Fueron varios los libros que Kepler escribió y que cambiaron el pensamiento de su época. Su legado representó una enorme revolución que permitió avanzar a sus sucesores hasta conformar la visión que hoy tenemos del Universo. 

## Obras Consultadas

ÁLVAREZ, J. L. La innovación de Copérnico. *Boletín de la Sociedad Mexicana de Física*, 2004, vol. 18, p. 221.

CASPAR, Max. *Kepler*. New York : Dover, 1993. 441 p.

KEPLER, Johann. *Epitome of Copernican Astronomy; Harmonies of the World*. Tr. de Charles Glenn Wallis. [New York] : Prometheus Books, 1955.

KOESTLER, Arthur. *Los sonámbulos*. México : CONACYT, 1981. 598 p.

MARTENS, Rhonda. *Kepler's Philosophy and the New Astronomy*. Princeton, New Jersey : Princeton University, 2000. 201 p.

VOELKEL, James Robert. *The Composition of Kepler's Astronomy Nova*. Princeton : Princeton University, 2001.

----- *Johannes Kepler and the New Astronomy*. New York : Oxford University, 1999. 141 p.