Stephen F. Mason

Historia de las ciencias

2. La revolución científica de los siglos XVI y XVII

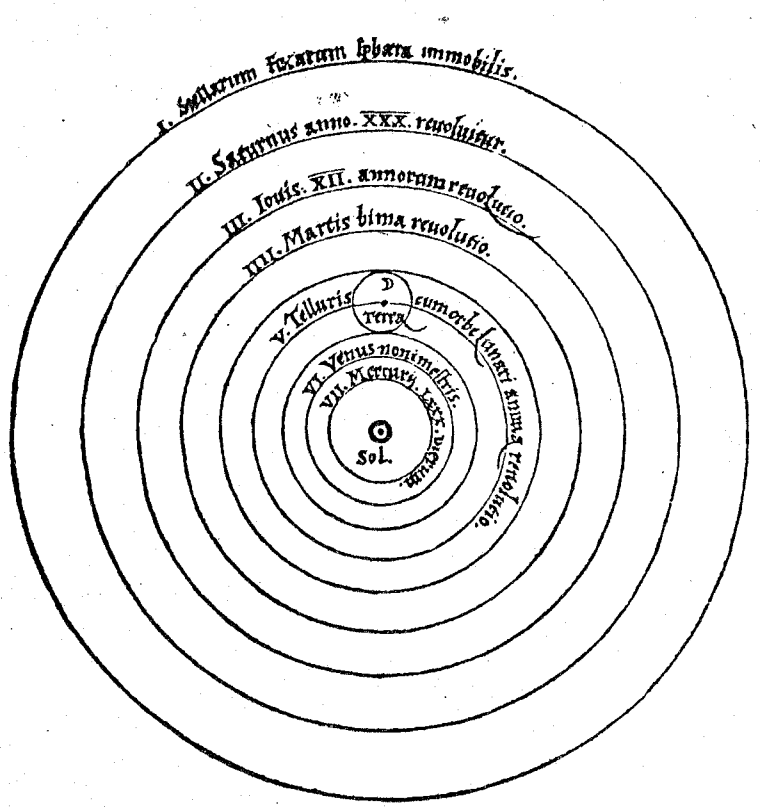
Historia de la ciencia
Alianza Editorial

1. El sistema del mundo copernicano

La astronomía de observación resurgió en el siglo XV en relación con el arte de navegar y con la reforma del calendario juliano, que se estaba desfasando respecto al año solar. Este movimiento se inició con Georg von Peurbach, 1423-1461, de la Universidad de Viena, y más especialmente con su discípulo Johannes Müller, 1436-1476, quien fue a Italia para estudiar las versiones griegas originales de la astronomía de Ptolomeo. Müller se estableció en Nuremberg, realizando observaciones con su amigo y patrón Bernhard Walther, 1430-1504, un rico comerciante que disponía de un observatorio privado. Walther tenía también una imprenta propia, con la que prepararon almanaques náuticos de gran utilidad para los navegantes portugueses y españoles. Müller fue el primero que introdujo en las observaciones astronómicas correcciones para la refracción atmosférica, así como el primero también en utilizar en astronomía el reloj mecánico. Más tarde, marchó a Roma para reformar el calendario, si bien murió antes de llevarlo a cabo. Walther y su amigo, el artista Albrecht Dürer, prosiguieron sus observaciones, de modo que cuando Nicolás Copérnico, 1473-1543, comenzó su trabajo, se disponía ya

de un volumen considerable de observaciones modernas precisas.

Copérnico era hijo de un próspero comerciante y funcionario municipal de la vieja ciudad hanseática de Thorn, sobre el Vístula, pero su padre falleció cuando contaba diez años de edad, siendo adoptado por su tío Lucas Watzelrode, que fue nombrado obispo de Ermland en 1489. Durante los años 1496-1506 estudió en Italia, volviendo para ocupar una canonjía en Frauenburg, en el Báltico, cuando su tío falleció en 1512. Las actividades de Copérnico en los treinta años que permaneció en Frauenburg fueron muy versátiles, abar-



El sistema planetario del De revolutionibus *de Copérnico.*

cando la medicina, las finanzas, la política y los asuntos eclesiásticos; pero parece haberse ocupado principalmente del nuevo sistema del mundo concebido cuando era aún muy joven, tal vez mientras estuvo en Italia.

Su nuevo sistema del mundo colocaba al Sol en el centro del universo, atribuyendo tres movimientos a la Tierra: un giro diario sobre su eje, una órbita anual en torno al Sol y un giro del eje de rotación de la Tierra a fin de explicar la precesión de los equinoccios. Copérnico escribió un opúsculo titulado *Commentariolus* en el que daba cuenta de su teoría y que circuló en copias manuscritas entre sus amigos desde aproximadamente el año 1530. La teoría alcanzó una mayor difusión, atrayendo a George Rheticus, 1514-1576, un matemático de Wittenberg, quien estudió un par de años con Copérnico y publicó la primera versión impresa de la teoría copernicana en 1540. Finalmente, el propio Copérnico publicó su obra principal, *De las revoluciones de los orbes celestes,* en 1543.

La obra se imprimió en Nuremberg, primero bajo la supervisión de Rheticus y luego bajo la de Andreas Osiander, un pastor luterano. Osiander añadió una nota preliminar a la obra de Copérnico señalando que la nueva teoría no era necesariamente verdadera y que podía considerarse simplemente como un método matemático conveniente para dar cuenta de los movimientos aparentes de los cuerpos celestes, prediciendo sus posiciones futuras. Copérnico no compartía este punto de vista y consideraba que su sistema del mundo era real, dado que discute problemas que no eran de carácter matemático, como las objeciones físicas a la teoría del movimiento terrestre, problemas que no habría tenido en cuenta si considerase a su teoría como algo hipotético.

Los argumentos que empleaba Copérnico para sostener su teoría eran fundamentalmente de naturaleza matemática. Consideraba que una teoría científica era un grupo de ideas

deducidas de determinadas suposiciones o proposiciones. Las suposiciones o proposiciones verdaderas, sostenía, han de realizar dos cosas. En primer lugar, han de «salvar las apariencias», esto es, dar cuenta de los movimientos observados de los cuerpos celestes. En segundo lugar, no han de contradecir los conceptos básicos pitagóricos según los cuales los movimientos de los cuerpos celestes son circulares y uniformes. En opinión de Copérnico, un supuesto que no concordase con las observaciones poseía un defecto no menos grave que aquel que discrepase del concepto básico de que los movimientos de los cuerpos celestes son circulares y uniformes.

Copérnico consideraba que el sistema ptolemaico no era «suficientemente absoluto, ni suficientemente aceptable para el entendimiento», dado que Ptolomeo había abandonado la estricta observancia de los conceptos básicos de los pitagóricos. A fin de explicar los movimientos de algunos de los cuerpos celestes, Ptolomeo había supuesto que se movían en círculos con velocidades angulares que no eran uniformes respecto a los centros de sus círculos, sino que lo eran respecto a puntos externos a sus centros. Copérnico consideraba tal expediente como una seria cortapisa de todo el esquema ptolemaico. Con todo, no era ése el problema principal. La crítica más importante que hacía Copérnico a los antiguos astrónomos era que, dados sus «axiomas físicos» y la necesidad de «salvar las apariencias», o bien habían fracasado a la hora de explicar lo que se observaba en los cielos o bien habían complicado innecesariamente sus sistemas del universo. Al hablar de sus predecesores, escribía Copérnico:

> Por tanto, en el proceso de demostración que se llama método, hallamos que o bien han omitido algo esencial, o bien han admitido algo extraño y plenamente improcedente.

Copérnico se concentró sobre este último punto. Vio que, desde este punto de vista, los antiguos habían añadido los

tres movimientos de la Tierra a cada uno de los cuerpos celestes a fin de llegar a un esquema en el que la Tierra se hallase en reposo en el centro del universo. De este modo, en los sistemas geométricos del universo de los griegos se había añadido a cada uno de los cuerpos celestes tres círculos o sistemas de círculos, a fin de dar cuenta de los movimientos aparentes de los cielos desde el punto de vista de la Tierra estacionaria. Copérnico consideraba que tales círculos eran una complicación innecesaria de los esquemas griegos y se deshizo de ellos suponiendo que la Tierra rotaba sobre su eje diariamente y se movía en torno al Sol por una órbita anual. De este modo, Copérnico redujo el número de círculos precisos para explicar los movimientos aparentes de los cielos, pasando de los aproximadamente ochenta utilizados en las versiones elaboradas del sistema ptolemaico a cuarenta y ocho. Este sistema apareció en su *De las revoluciones de los orbes celestes,* donde se explicaban los movimientos planetarios con más detalle que en el *Commentariolus,* donde había utilizado nada más que treinta y cuatro círculos. Su discípulo Rheticus señalaba por lo que respecta al movimiento apuntado de la Tierra en torno al Sol:

> Puesto que vemos que este único movimiento satisface un número casi infinito de apariencias, ¿no habríamos de atribuir a Dios, Creador de la naturaleza, esa destreza que observamos en los relojeros normales? En efecto, éstos evitan cuidadosamente insertar en el mecanismo cualquier rueda superflua o cualquiera cuya función se pueda realizar mejor con otra mediante un ligero cambio de posición.

En efecto, Copérnico suministró la respuesta más sencilla al problema griego de explicar los movimientos aparentes de los cuerpos celestes en términos de movimientos que fuesen circulares y uniformes. Nada nuevo había en este método, pues ya había sido utilizado por los astrónomos desde los tiempos de Pitágoras. Recurriendo a los conceptos básí-

cos de los griegos, había refutado los sistemas griegos, si bien había un concepto básico al que no recurría, el único que de hecho rechazaba su sistema, cual es la idea de que los cielos eran divinos y la Tierra imperfecta.

En el sistema copernicano, la Tierra giraba en torno al Sol como los demás planetas. Poseía los mismos movimientos circulares y uniformes que los otros cuerpos celestes, movimientos que habían sido exclusivos de las cosas perfectas e incorruptibles según los viejos esquemas. Además, Copérnico subrayaba la similaridad entre la Tierra y los cuerpos celestes al sugerir que todos ellos poseían gravedad. Dicha gravedad no actuaba a través del espacio, sino que tan sólo existía en los agregados de materia, como la Tierra y los cuerpos celestes, suministrándoles la fuerza de cohesión y otorgándoles la forma perfecta de la esfera. Su argumentación era finalista y teleológica:

> Creo que la gravedad no es más que una apetencia natural conferida a las partes por la Divina Providencia del Creador del universo, a fin de que puedan establecer su unidad y su integridad combinándose en la forma de una esfera. Es probable que esta afección competa también al Sol, la Luna y los planetas a fin de que, con su concurso, puedan persistir en su redondez.

El sistema copernicano era más simple y elegante que el esquema ptolemaico. En el sistema antiguo, los cuerpos celestes tenían movimientos de este a oeste y rotaciones en la dirección opuesta. Ahora la Tierra y todos los planetas se movían en torno al Sol en la misma dirección con velocidades que decrecían con la distancia al Sol, hallándose estacionarios el Sol en el centro y las estrellas en la periferia del universo. Ahora se comprendía por qué los planetas parecían acercarse y alejarse de la Tierra, puesto que en unas ocasiones estaban del mismo lado del Sol que la Tierra, mientras que en otras estaban del lado opuesto. Mediante una hábil combinación de epiciclos, Copérnico explicaba el hecho de

que el diámetro aparente de la Luna no varía mucho, mientras que los epiciclos supuestos por Ptolomeo exigían que el diámetro aparente de la Luna variase por un factor de cuatro.

El esquema copernicano hacía más fáciles los cómputos merced al número menor de círculos implicados en los cálculos, aunque las predicciones de las posiciones de los planetas y demás no eran más precisas que las ptolemaicas, entrañando ambas un error de un uno por ciento aproximadamente. Además, había serias objeciones físicas al sistema copernicano. Una de ellas, quizá no muy seria en la época, era el hecho de que el centro del universo no caía exactamente en el Sol. Copérnico lo situaba en el centro de la órbita de la Tierra, que se hallaba un tanto desplazado respecto al Sol, a fin de explicar la desigualdad de la longitud de las estaciones. Algunos filósofos habían exigido que fuesen cuerpos físicos reales los que oficiasen de centros de rotación del universo, si bien se aceptaba generalmente que bastaban puntos geométricos para este fin, como en el propio expediente del epiciclo. Además, los aristotélicos contemporáneos sostenían que la gravedad actuaba hacia un punto geométrico, el centro del universo, que no coincidía necesariamente en su esquema con el centro de la Tierra.

Más seria era la objeción de que, en caso de que la Tierra rotase, el aire tendería a quedarse atrás, produciendo un constante viento del este. Copérnico ofreció dos respuestas a esta objeción. La primera consistía en un tipo de explicación medieval, según la cual el aire rota con la Tierra por contener partículas terrosas que poseen la misma naturaleza que la Tierra, impulsando así al aire para que se mueva con ella. Su segunda explicación es más moderna: el aire rota «sin resistencia, dado que el aire se halla contiguo a la Tierra en rotación constante». Una objeción similar señalaba que una piedra arrojada al aire hacia arriba había de quedar retrasada debido a la rotación de la Tierra, cayendo al oeste del punto de proyección. A esta objeción Copérnico opuso tan

sólo el tipo medieval de explicación: «Puesto que los objetos oprimidos por su peso son fundamentalmente térreos, no cabe duda de que las partes mantienen la misma naturaleza que su todo», por lo que rotan con la Tierra.

Una ulterior objeción consistía en señalar que si la Tierra rotase, se desharía en pedazos por la fuerza centrífuga. Copérnico respondía que si la Tierra no rotase, entonces habría de hacerlo la inmensamente mayor esfera de las estrellas fijas con una velocidad muy grande, por lo que sería mucho más susceptible de fragmentación debido a la fuerza centrífuga. Este argumento no era realmente concluyente en la época, ya que se pensaba que los cielos estaban compuestos del perfecto y sin peso quinto elemento, la quintaesencia, que no estaba influenciado por acciones terrestres del tipo de la fuerza centrífuga. No obstante, la idea aristotélica original de la quintaesencia se había tornado un tanto grosera durante la Edad Media, considerándose las esferas celestes como algo rígido, vítreo o cristalino, lo que sustanciaba el argumento de Copérnico. También hallaba otra salida a la dificultad sugiriendo que la fuerza centrífuga tan sólo se daba en los movimientos violentos y no naturales o artificiales, y no en los naturales, como los de la Tierra y los cuerpos celestes. Argumentaba que,

> las cosas regidas por la naturaleza producen efectos contrarios a los de las regidas por la violencia. Las cosas en las que se imprime fuerza e ímpetus han de disolverse, no pudiendo subsistir durante mucho tiempo; mas lo que hace la naturaleza se ordena correctamente y preserva su óptima composición. Así pues, hierra Ptolomeo al temer que la Tierra y las cosas terrestres se puedan dispersar por la rotación producida por la acción de la naturaleza.

Como se ve, Copérnico no aceptaba ni la teoría aristotélica ni la del *impetus* por lo que respecta al movimiento, puesto que consideraba que tanto la acción de los motores como la del *impetus* eran inaugurales y artificiales. Sostenía

que la rotación y el movimiento uniforme en un círculo eran atributos naturales y espontáneos de la forma geométrica perfectamente esférica, la forma que se da en la Tierra y en los cuerpos celestes. Así pues, Copérnico no recurrió a una jerarquía de ángeles para impulsar a los cuerpos celestes en torno a sus órbitas, con los ángeles de las esferas superiores dominando sobre los de las inferiores, tal y como ocurría en la aceptada modificación de Dionisio del esquema aristotélico-ptolemaico. Los cuerpos celestes poseían movimientos propios naturales y espontáneos. Rheticus nos dice que,

> según la hipótesis de mi maestro, que acepta, como se ha explicado, que la esfera estelar es el límite, la esfera de cada planeta avanza uniformemente con el movimiento que le ha asignado la naturaleza y completa su período sin verse forzada a ninguna irregularidad en virtud de la esfera superior. Además, las esferas mayores giran más lentamente y, tal y como conviene, las que se hallan más próximas al Sol, que puede considerarse como la fuente del movimiento y de la luz, giran más aprisa.

Así pues, con Copérnico emerge un conjunto de valores cósmicos completamente nuevo. El Primer Motor de la periferia del universo dejó de ser importante, siendo el Sol, en el centro del universo, el que regía los cielos. El propio Copérnico escribía:

> En el centro de todo reina el Sol, pues en este hermosísimo templo ¿quién habría de colocar esta luminaria en otro lugar mejor que éste, desde donde puede iluminarlo todo de una vez? [...] De hecho, sentado en un real trono, el sol guía en torno a sí la familia de los astros [...] la Tierra concibe gracias al Sol, quedando de él preñada con sus frutos anuales. Así pues, en esta disposición hallamos una admirable armonía del mundo y una constante conexión armoniosa entre el tamaño y el movimiento de las órbitas que de otro modo no se daría.

Un personaje intermedio entre los aristotélicos que subrayaban el poder del Primer Motor en la periferia del uni-

verso y Copérnico, que exaltaba al Sol en el centro, es Nicolás de Cusa, quien al defender la infinitud del espacio había sostenido que el mundo es tal que su «centro coincide con su circunferencia». Con todo, la reforma de Copérnico resultó mucho más plena. La fuerza en el universo ya no quedaba delegada a una jerarquía de ángeles, desde el Primer Motor en la circunferencia del universo hasta la Tierra inferior en el centro, sino que estaba regida plenamente por el Sol, que gobernaba cuerpos de condición aproximadamente igual, tanto la Tierra como los planetas, los cuales poseían asimismo gravedad y circularidad de movimientos.

Puede decirse que Copérnico estaba interesado en promover estos nuevos valores, pues si se hubiese conformado sencillamente con un sistema del mundo más simple, no es improbable que se le hubiera ocurrido el esquema posteriormente adoptado por Tycho Brahe, 1546-1601. En él los planetas se movían en órbitas en torno al Sol, mientras que el Sol y los planetas formaban un todo que giraba en torno a la Tierra, que se hallaba estacionaria en el centro del universo. Tal sistema era matemáticamente equivalente al esquema copernicano, no planteando por añadidura los problemas físicos de la Tierra en movimiento que este último entrañaba. No obstante, en su mayor parte mantenía los viejos valores cósmicos, razón por la cual Copérnico prefirió su nuevo esquema heliocéntrico.

Resulta curioso que Copérnico, a pesar de presentar valores y concepciones nuevas, fuese con todo conservador por lo que al método respecta. A lo largo de toda su vida se mantuvo fiel al prejuicio griego según el cual los movimientos de los cuerpos celestes habían de ser circulares y uniformes, de modo que aunque su sistema fuese mucho más simple que el defendido por Ptolomeo, resultaba complicado por respecto al sistema posteriormente elaborado por Johannes Kepler, 1571-1650. Kepler explicaba los movimientos aparentes de los cuerpos celestes mediante siete

elipses, frente a los treinta y cuatro círculos utilizados por Copérnico. Como decía Kepler, Copérnico no era consciente del tesoro que tenía al alcance de la mano. Copérnico sabía que la combinación de círculos producía una elipse, si bien nunca empleó tal figura para describir las órbitas de los cuerpos celestes. Además, inicialmente tenía en gran estima el trabajo observacional de la Antigüedad, llegando a escribir una carta en términos duros contra el astrónomo Werner, quien había sugerido que las observaciones más recientes de Peurbach y Müller eran más exactas que las de Ptolomeo. De hecho eran unas tres veces más precisas.

El trabajo observacional más importante de los primeros tiempos de la época moderna lo desarrolló Tycho Brahe, cuyas observaciones eran unas cincuenta veces más precisas que las de Müller, alcanzando los límites de la visión sin instrumentos ópticos. Tycho Brahe era un noble danés a quien Federico II de Dinamarca otorgó una pensión y la isla de Hveen en la bahía de Copenhague para que realizase allí sus trabajos astronómicos. En dicho lugar construyó un castillo, talleres, una imprenta privada y un observatorio en el que trabajó con sus numerosos asistentes desde 1576 hasta 1597, recopilando gran cantidad de observaciones precisas. Señalaba la imposibilidad de realizar observaciones sin la guía de un sistema del mundo de carácter teórico, por lo que abrazó el sistema geocéntrico modificado que hemos mencionado. Con todo, su interés primordial descansaba en la observación, tarea en la que descolló.

Tras la muerte de Federico II, su sucesor no renovó la protección a Tycho Brahe, por lo que éste marchó a Praga en 1599, donde el emperador Rodolfo II le otorgó una pensión. Al año siguiente se le unió el joven astrónomo alemán Johannes Kepler, que era fundamentalmente un matemático de la tradición copernicana. Kepler era hijo de un oficial del ejército de Würtenburg y de una hija de posadero. Estudió en Tübingen, donde se convirtió al copernicanismo gracias

al influjo de Michael Maestlin, que era allí profesor de astronomía. El período durante el cual Kepler cooperó con Tycho Brahe en Praga fue breve, ya que este último murió en 1601, legando a Kepler su colección de observaciones. Kepler permaneció en Praga preparando tablas de los movimientos planetarios para su patrón, y en conexión con esta tarea prosiguió sus propias investigaciones sobre la naturaleza de las órbitas planetarias. Sus *Tablas Rudolfinas,* aparecidas en 1627, eran mucho más precisas que las usuales en la época, como las *Tablas Prusianas* de 1551, debidas a Reinhold y basadas en la teoría de Copérnico, o las *Tablas Alfonsíes* del siglo XIII, basadas en el sistema ptolemaico. Estas tablas anteriores poseían un grado similar de precisión. Las *Tablas Rudolfinas* eran más exactas que las de sus predecesores porque se basaban en observaciones precisas de Tycho Brahe y en una nueva geometría de las órbitas planetarias que Kepler había desarrollado a partir de dichas observaciones.

La obra cosmológica anterior de Kepler, *El misterio del universo,* aparecida en 1596, poseía un carácter un tanto místico. Buscaba armonías matemáticas entre las órbitas de los planetas del sistema copernicano, hallando que los cinco sólidos regulares podían hacerse encajar entre las esferas de las órbitas planetarias. Cuando se vio en posesión de las observaciones de Tycho Brahe, su obra tornóse más concluyente, si bien durante mucho tiempo se sintió obsesionado por la idea de que los movimientos de los cuerpos celestes habían de ser circulares y uniformes. Con todo, halló que tal idea no conseguía arrojar predicciones tan exactas como las mediciones de Tycho Brahe, ni con el sistema copernicano, ni con el ptolemaico ni con el tychónico. Consiguientemente abandonó la idea y, al ensayar otras figuras geométricas, halló en 1609 que la elipse encajaba perfectamente, arrojando predicciones con el grado deseado de precisión. Los movimientos de los planetas nunca más fueron ya circulares ni uniformes, pues sus dos leyes del movimiento planetario, publicadas en

1609, enunciaban en primer lugar que cada planeta describe una elipse con el Sol en uno de los focos y, en segundo lugar, que la línea trazada desde el Sol al planeta barre áreas iguales en tiempos iguales. Nueve años después descubrió su tercera ley; a saber, que los cuadrados de los tiempos que emplean los planetas para completar sus órbitas son proporcionales a los cubos de sus respectivas distancias medias al Sol.

En su *Epítome de la astronomía copernicana,* escrito en 1618-21, Kepler da una descripción del método astronómico que difiere enormemente del de Copérnico. En la Astronomía, decía Kepler, hay cinco partes. En primer lugar, la observación de los cielos; en segundo lugar, las hipótesis para explicar los movimientos aparentes observados; en tercer lugar, la física o metafísica de la cosmología; en cuarto lugar, el cómputo de las posiciones pasadas o futuras de los cuerpos celestes; y en quinto lugar, una parte mecánica que versa acerca de la fabricación y uso de los instrumentos. Kepler sostenía que la tercera parte, la metafísica de la cosmología, al igual que el prejuicio griego de que los movimientos planetarios habrían de ser uniformes y circulares, no era esencial para el astrónomo. Si sus hipótesis casaban con un sistema metafísico, tanto mejor, pero en caso contrario había que eliminar la metafísica. La única restricción de las hipótesis, decía Kepler, era que debían ser razonables, siendo el objetivo principal de una hipótesis «la demostración del fenómeno y su utilidad en la vida diaria».

Kepler tomó y sin duda desarrolló los valores cósmicos de Copérnico. También él pensaba que el Sol era el que gobernaba el universo, siendo el Alma del Mundo, situada en el Sol, la que dirigía a los planetas en torno a sus órbitas. El Sol, pensaba Kepler, era, de todos los cuerpos celestes,

el único que habríamos de considerar digno del Altísimo Dios, si tuviese a bien disponer de un habitáculo material y eligiese un lugar donde morar con los ángeles benditos.

Sostenía que el universo en su conjunto era la imagen y analogía de la Trinidad. El Padre era el centro, el Hijo las esferas en torno, mientras que el Espíritu era el complejo de relaciones dentro del universo.

Con Kepler se despeja finalmente la configuración espacial del sistema solar, quedando expedito el camino para la interpretación del patrón celeste en términos del equilibrio dinámico de fuerza mecánicas. Se trata de una gran conquista de la ciencia moderna en ciernes. Los griegos se habían ocupado fundamentalmente del patrón estático del universo, enfrentándose a los movimientos tan sólo en la medida en que recurrían uniformemente, trazando figuras geométricas. Debido a sus prejuicios, los patrones de los sistemas griegos del mundo siempre resultaron complicados. Al abandonar uno de los prejuicios, a saber, la distinción cualitativa entre los cielos y la Tierra, Copérnico obtuvo un sistema mucho más simple, mientras que al abandonar la mayor parte de los restantes prejuicios griegos Kepler consiguió el sistema más simple de todos. De este modo abrieron el camino para la interpretación de los movimientos celestes en términos de mecánica terrestre, desarrollo que habría resultado inconcebible a las escuelas de pensamiento griegas dominantes si hubiesen dispuesto de una ciencia de la dinámica, lo que no es el caso.