



LOS ORÍGENES DE LA REVOLUCIÓN CIENTÍFICA

Ángeles Gutiérrez Martín
Profesora de Filosofía
I. B. Villalba Hervás
Miguelina Quintero Barrera
Licenciada en Filosofía

Buscar una explicación sencilla y lineal al cambio paulatino del pensamiento europeo que va desde finales del siglo XV al XVII y que supone pasar del medioevo a la Edad Moderna sería ingenuo e imposible. El desarrollo de la ciencia, como todo proceso histórico, no es simple. Se debe, más que a una suma, a la compleja combinación de múltiples elementos.

Nuestro trabajo se centrará en el terreno de la astronomía, que aun siendo sólo uno de los diversos campos en que se producen cambios, tiene un papel relevante en este entramado. Y abordaremos esta ciencia a partir del intento de revisión del modelo astronómico medieval que culmina con la propuesta heliocéntrica de Copérnico y los comienzos de la astrofísica por parte de Kepler.

1. Los orígenes de esa llamada «revolución»

Existen discrepancias a la hora de señalar cuándo empieza la Revolución Científica (RC en lo que sigue) y si este término de «revolución» puede ser el adecuado para referirse a ella¹, toda vez que la misma no se produjo de forma brusca sino

1. Según Cohen, antes de la Revolución Francesa se usaban dos sentidos para referirse al término «revolución»: uno que implica un cambio radical, una ruptura de la continuidad; otro que supone evolución, fenómeno cíclico. A partir de 1789 predominará el primer significado de «revolución». Cohen, 1983, pp. 58 y ss.



que fue consecuencia de una serie de ideas y condicionantes de diverso tipo que se habían ido desarrollando sobre todo en la Alta Edad Media, más concretamente en el siglo XIV. Como señalan algunos autores, el origen de la RC permanece oscuro y debe hablarse de una multicausalidad de factores. Sea como fuere, asumiremos este término para referirnos al período conocido como RC que los autores dan por empezado en 1543, con la aparición de la obra de Copérnico *De revolutionibus Orbium Coelestium* y la de Vesalio *De humani corporis fabrica*, y que finaliza con la publicación de los *Principia* de Newton en 1678.

Sin embargo, no hay que olvidar que estos límites señalados no son más que convenciones y que no establecen distinciones tajantes entre sus antes y después; téngase en cuenta que perdurarán elementos medievales a lo largo del período que vamos a estudiar, al tiempo que elementos nuevos aparecen ya en la Edad Media.

El siglo XIV, por ejemplo, es relevante en la medida en que supone un siglo de crisis, o mejor de crítica, a lo asumido hasta entonces². Mientras que en el siglo XIII se pretende ante todo hacer grandes síntesis filosóficas, el XIV, en contrapartida, deriva en la crítica de esas síntesis pero desde sus propias bases, intentando revisar el sistema aristotélico sin aportar nada nuevo. Estos autores críticos desean hacer una interpretación de la naturaleza desde la perspectiva del verdadero Aristóteles, evitando así la parcialidad impuesta por sus intérpretes posteriores. De ahí el interés por retomar los originales griegos para su estudio y el auge que tendrá la lengua griega y todo lo referente a la cultura helenística durante este siglo y, sobre todo, en el XV.

Recordemos algunos autores ya expuestos en este Seminario como Ockam, Buridán u Oresme, que representan un patrón de crítica a lo establecido y asumido a través de los siglos.

Por ejemplo, Ockam dio el primer paso hacia el principio de inercia que iba a revolucionar la Física del siglo XVIII; Buridán, que también estudió los problemas clásicos del movimiento, formula la teoría del «impetus»³, para explicar los diferentes fenómenos del movimiento constante y acelerado, mostrando un precedente claro de cómo se pueden homogeneizar los mundos supra y sublunar, sentando así las bases que permitirán aplicar los cálculos del movimiento globalmente. Por su parte, Oresme nos muestra el estudio más esmerado sobre la rotación diaria de la Tierra que se había realizado desde los astrónomos griegos, aun cuando no afirme como real

2. No podemos tampoco olvidar el siglo XII, de interés tanto por una cierta revolución tecnológica que se da en su seno como por la construcción de las primeras Universidades laicas.

3. Esta teoría del «impetus», lo mismo que la teoría anterior de la «virtus impressa», se basaba sobre los principios aristotélicos de que todo movimiento requiere un motor y de que la causa debe ser proporcional al efecto.



el movimiento de ésta. Oresme presenta argumentos a favor de dicho movimiento para llegar a la conclusión de que tan demostrable es hablar de una Tierra en rotación como de lo contrario. Crombie opina que el estilo de la obra de Oresme anticipa las obras polémicas de Galileo ⁴.

Las especulaciones astronómicas de Nicolás de Cusa se conectan con las filosóficas, mezcla de neoplatonismo y misticismo cristiano. Según Cusa el universo es infinito en extensión y, si esto es así, ni tiene centro ni es una circunferencia. Supone que el movimiento es natural a todos los cuerpos, por tanto la Tierra no puede estar desprovista del mismo. También señala que tanto la Tierra como el Sol y los cuerpos celestes están constituidos por los mismos elementos (homogeneidad del universo) y sólo difieren en la forma y proporción en que se mezclan. No habla del movimiento de traslación.

Dreyer sostiene que estas opiniones de Cusa no representan un avance en astronomía ya que las mismas se emiten sin consideración a observaciones astronómicas y además son generalidades sin mayores precisiones.

En los siglos XV y XVI el desarrollo del Humanismo supondrá una vuelta a los clásicos y una crítica a la Escolástica. En este sentido, mientras algunos autores proponen que los humanistas demostraron un escaso interés científico, volcándose más en cuestiones filosóficas, otros señalan que el Humanismo fue un propulsor de la ciencia, ya que el platonismo, que viene de la mano de estos humanistas, a pesar de que derivó en cuestiones teológicas y místicas, ayudó también indirectamente a que las matemáticas jugaran un papel fundamental en el desarrollo de las ciencias. Además esta corriente es importante por otra razón: fue cambiando la visión de la relación hombre-naturaleza y, en este aspecto, el mundo dejaba de ser un «valle de lágrimas y de pecado» para convertirse en un lugar donde el hombre podía gozar y hacerse mejor. De esta manera se llega a la idea de que hay que conocer el mundo y manipularlo ⁵.

Existía un conjunto de problemas que ocupaban a los astrónomos renacentistas que desencadenarán a la larga la revolución copernicana. Problemas que iremos citando en lo que sigue.

El descubrimiento de América provoca la necesidad de precisar los límites geográficos y mejorar el arte de la navegación, ya que para los viajes oceánicos la orientación marítima requería unos mapas estelares más exactos.

En el siglo XV el modelo ptolemaico mantenía su vigencia con todos los añadidos y correcciones que a lo largo de más de 1000 años habían hecho los astrónomos-

4. Crombie, 1985: pp. 75.

5. Francis Bacon (1561-1626) defendió con insistencia la idea de que la ciencia debe tener un objetivo práctico y estar al servicio del hombre.



astrólogos árabes y medievales. Se seguía aceptando como un constructo geométrico que permitía una cierta explicación y predicción de lo observado, aunque todos sabían que la concordancia entre el Almagesto y lo que acontecía en el firmamento no era sino aproximada. En el siglo II cuando vivió Ptolomeo tal concordancia era grande, pero iba empeorando con el correr del tiempo, como lo evidenciaban las nuevas observaciones. Ya los árabes empezaron a corregir y completar la obra ptolemaica, seguidos después por los sabios europeos⁶. Las correcciones introducidas se limitaban a pequeñas modificaciones numéricas de magnitudes concretas tomadas de Ptolomeo (longitud, año trópico, inclinaciones de la eclíptica, etc.); los agregados en cambio consistían en incorporar nuevos círculos y circulillos al sistema de «excéntricas y epiciclos».

El mecanismo de movimiento de los cuerpos celestes se volvía por consiguiente cada vez más complicado y confuso, creciendo al mismo tiempo las divergencias entre los astrónomos, porque mientras unos aceptaban cada «corrección», otros las rechazaban o introducían las suyas propias. La astronomía teórica se sumía cada vez más en el caos y las observaciones demostraban a cada paso la falta de conformidad entre las tablas astronómicas y el cielo.

Había un deseo cada vez mayor de elaborar una cosmología acorde con el sistema ptolemaico. La dicotomía establecida entre sistema físico verdadero y sistema calculístico iba convenciendo cada vez menos a diversos autores que se veían en la necesidad de encontrar un sistema que, al tiempo que predijera, explicase también cómo es el mundo en realidad.

Gracias a Peurbach y Regiomontano la teoría de Ptolomeo (osificada y dogmática) adquiere más rigor. Insatisfechos con las viejas traducciones leen directamente del original. El descubrimiento y estudio de las versiones originales griegas hacen ver que las posibles ineptitudes de Ptolomeo ya no se pueden achacar a errores en las traducciones.

Peurbach (1423-1461) escribió *Theoricæ Novæ Planetarum*, una de las más claras y concisas exposiciones de la obra ptolemaica. Es un intento de dar una interpretación cosmológica de Ptolomeo evitando las incongruencias que se derivaban de la teoría de la doble verdad. En esta obra reunió en una explicación más comprensible las esferas sólidas con las explicaciones geométricas, dejando entre aquellas sufi-

6. En el siglo X Jabir de Sevilla criticó seriamente el sistema geocéntrico, pero su crítica estuvo dirigida sobre todo contra los datos numéricos que describían este sistema. En el siglo XIII, Alfonso X reunió a los 60 mejores astrónomos árabes y judíos encomendándoles elaborar nuevamente todos los datos conocidos hasta entonces. Se confeccionaron así las *Tablas Alfonsinas*, que proporcionaban muchos datos pero no explicaciones de porqué ciertas magnitudes —anteriormente aceptadas— se habían cambiado por otras.



ciente espacio para permitir el sofisticado juego de excéntricas y epiciclos de cada planeta, de manera que la predicción fuese posible. Peurbach descubrió la ventaja de utilizar senos en lugar de cuerdas y compuso una tabla de senos para cada 10 grados⁷. Colaboró también en una revisión de las Tablas Alfonsinas.

Regiomontano (Johannes Müller, 1436-1476), discípulo de Peurbach, terminó la obra inconclusa de éste: *Epitome in Ptolemaei Almagestum*. Construyó un observatorio, compiló las *Ephemerides* astronómicas y elaboró las *Tabulae Directorium*, basadas en las Tablas Alfonsinas. Regiomontano escribió un tratado de trigonometría calculando una tabla de senos para cada minuto y una tabla de tangentes para cada grado. Aunque no logró serios avances en teoría planetaria —aceptaba el sistema de Ptolomeo en cada detalle— algunos autores le imputan el descubrimiento de la rotación de la Tierra y por este hecho le proclaman precursor de Copérnico. Esta afirmación se basa en un capítulo del libro de Schoner editado en 1533 que, a juicio de Dreyer, no da pie a tal reivindicación ya que Regiomontano redundaba en los argumentos de Ptolomeo que hacen bastante improbable pensar en la rotación terrestre.

Calcagnini (1479-1541) es el único autor del que se sabe con total seguridad que creyó en el movimiento de rotación terrestre antes de que el libro de Copérnico se publicara. En su libro *Quod caelum stet, Terra Moveatur, vel de Perenni Motu Terrae* (publicado en 1544), señala que los cielos junto con las estrellas, no giran en 24 horas sino que es la Tierra la que se mueve y ocupa el centro. Apoyándose sólo en esta premisa intentaba dar cuenta de todo el engranaje celeste. El escrito de Calcagnini es de sólo 8 páginas y hace alusiones a la semejanza de la Tierra con una flor que siempre vuelve la cara al sol. Hacia el final de este ensayo, sin embargo, parece intuir que el movimiento de rotación terrestre no es suficiente para explicarlo todo y señala que también se inclina hacia un lado y otro y que tal inclinación vendría demostrada por los equinoccios y solsticios, el incremento y decrecimiento de la Luna y la longitud variable de las sombras. Maurolico (1494-1575) refuta la opinión de Calcagnini en un escrito completamente medieval.

Otros dos autores, Fracastoro y Amici, intentan ya en pleno final del siglo XV revivir la teoría de las esferas sólidas.

G. Fracastoro (1483-1551), que conoció a Copérnico en Padua, publica en 1538 una obra titulada *Homocentrica* en la que intenta convertir el calculador ptolemaico en un sistema físico verdadero del Universo, con un lenguaje confuso que hace difícil su lectura. El resultado final no es convincente porque para abarcar todas las

7. En los círculos cultos de principios del XVI se conocían perfectamente la trigonometría alejandrina, la trigonometría esférica y la astronomía ptolemaica original.



perturbaciones observadas en los cielos necesitaba de un conglomerado intrincadamente complejo de esferas, 77 en total.

G. B. Amici, por su parte, publica un tratado independiente del de Fracastoro que, aunque escrito más claramente, presenta las mismas dificultades para explicar los cielos, ya que incluso eliminando epiciclos y excéntricas el modelo seguía siendo excesivamente complejo.

Ninguno de estos autores representa un gran avance en astronomía, pero en alguna medida sirvieron para que Copérnico encontrara un terreno más o menos abonado.

Por otra parte, desde el siglo XIII la observación astronómica y la revisión de las tablas mostraban un deseo crónico de *reformular el calendario* para ajustarlo a las demandas prácticas de la Astrología, ya que acumulaba un gran número de inexactitudes. En el Concilio de Nicea celebrado en el año 325, la Iglesia había fijado el domingo de Pascua como el primer domingo siguiente a la primera luna llena después del (o en el) equinoccio de primavera. Tal equinoccio se había fijado originalmente el 21 de Marzo, pero tomaba el año como de 365 días. Debido a esta inexacta apreciación de la duración del año el calendario Juliano establecido a partir de entonces acumuló un error que llegó en el siglo XVI a diez días.

Una cuestión de interés en este período lo representa el método que se va a emplear en ciencia. Este irá variando para convertirse en uno que ponga el énfasis en la observación y la experimentación⁸; en otras palabras, aparece una visión nueva de lo que sea la experimentación y lo matemático. Así, mientras para Aristóteles las matemáticas eran útiles para definir relaciones pero no para expresar la naturaleza de las cosas y los procesos físicos, para los físicos del XVI predominan las explicaciones de tipo cuantitativo de carácter matemático. Recordemos a los calculadores del Merton College y sus intentos de cuantificar las cualidades. En este sentido se ve de nuevo la influencia de los humanistas con su aspecto neoplatónico que redundaba en lo matemático.

Estas cuestiones reflejan lo característico de este período y permiten explicar el auge de los estudios de la época en el terreno de la astronomía. Como decíamos al principio de la ponencia no podemos explicitar claramente cuál fue el factor relevante en la producción de este cambio de mentalidad que surge con la RC porque no existe uno solo.

8. En las ciencias antigua y medieval, salvo algunas excepciones, se prima lo teórico en detrimento de la parte práctica o manipulatoria.



«La noche es para muchos, el momento de soñar con los ojos cerrados; para otros, el de soñar con los ojos abiertos»

Comediants

2. Y el sol toma el centro...

Nicolás Copérnico (1473-1543) nace en Torún el 19 de Febrero a las 4 horas, 48 minutos de la tarde ⁹. Estudia en la Universidad de Cracovia (uno de los centros de más prestigio de la Europa Central), en Bolonia, Ferrara, Padua y Roma.

No puede decirse que Copérnico sea un autor eminentemente moderno; de hecho, sus escritos conservan matices de tinte medieval como también lo es su adhesión a dos puntos concretos: el *principio de circularidad* y la *uniformidad de movimientos*. Pero tampoco puede afirmarse, en puridad, que sea un autor totalmente medieval. Si deseamos ser justos, habríamos de exponer la figura de Copérnico como la de un astrónomo renacentista en el que se conjugan dos tradiciones: la medieval y la moderna. Y esto es así porque un individuo solo no puede introducir innovaciones salvo de manera muy limitada en la medida en que hereda una educación tradicional que no puede desterrar completamente ¹⁰.

Tampoco puede decirse que su revolución se debiera a las observaciones realizadas ya que éstas no le preocuparon demasiado. Su interés se centró más en las cuestiones teóricas. Podemos preguntarnos, entonces, en qué radica la revolución llevada a cabo por este autor.

Como señala Kuhn, el *De Revolutionibus Orbium Coelestium* es más un texto provocador de revolución que un texto revolucionario propiamente dicho ¹¹. Serán más las obras de los copernicanos convencidos los que lleven a cabo dicha revolución.

El hecho de dotar a la Tierra de movimiento no era nuevo por entonces ¹², aunque bien es verdad que una cosa era dotar a la Tierra de un movimiento de rotación (como habían hecho algunos) y otra muy distinta dotarla de tres movimientos como hace Copérnico.

Pero quizás sea más revolucionario el hecho de haber despojado a la Tierra de ser el centro del Universo (aunque en lo que sigue comprobaremos que los movimientos de los cuerpos se remiten no al Sol, sino al centro de la órbita terrestre,

9. La exactitud se debe a la popular «fijación» de la época por los horóscopos. Una copia del de Copérnico fue descubierto por L. A. Birkenmajer a finales del siglo XIX.

10. Kuhn, 1978: pp. 242.

11. Kuhn, op. cit., pp. 186.

12. Entre los que señalaron la idea del movimiento terrestre, ya fuera éste cosmológico o geométrico, manteniendo o no su verdad física, cabe citar a: Filolao, Hicetas, Ecfanto, Aristarco, Heráclides, Capella, Erígena, Bacon, Grosseteste, Escoto, Ockam, Alberto de Sajonia, Buridán, Oresme y Cusa.



lo cual equivale a darle a la Tierra un estatus especial). Mas, independientemente de que pueda considerarse revolucionaria una cosa u otra, el mayor logro copernicano reside en el carácter interconexo de su sistema, que él obtiene por primera vez en la historia de la astronomía. Logró reunir en un conjunto tanta precisión descriptiva y predictiva como las que poseían las técnicas ptolemaicas al uso y una explicación cosmológica relativamente satisfactoria.

Copérnico se sumerge en la búsqueda de soluciones geométricas que, aplicadas a la astronomía, cumplan con los postulados de homogeneidad y armonía del Cosmos y libren a esta ciencia de incoherencias como la del ecuante¹³. Cierta resentimiento contra esta artimaña geométrica u operación de prestidigitación fue lo que impulsó a Copérnico, en opinión de Butterfield, a cambiar todo el sistema¹⁴.

Esto le llevará a una teoría del Universo centrado en el Sol y en el que los cuerpos describen círculos perfectos. Según Hanson es este interés por buscar una explicación y comprensión de la *totalidad de los movimientos celestes* lo que define el enfoque genuino copernicano¹⁵.

Copérnico como astrónomo busca una precisión descriptiva y predictiva superior al Almagesto, como matemático y filósofo natural busca más orden y sistema, mayor inteligibilidad y comprensión. Parece ser que todos los historiadores están de acuerdo en que como astrónomo teórico es digno de gran admiración aunque como cosmólogo discursivo tenga menor categoría.

Dos libros para un cambio

Los motivos que llevan a Copérnico a la confección de su obra los expone él mismo en la introducción al *De Revolutionibus...*, aunque ya los había esbozado en un corto manuscrito llamado *Commentariolus* que iba dirigido a aquellos que estaban ya familiarizados con la astronomía. En él intenta explicar de forma global las ventajas que ofrece su modelo. La pequeña obra, que contiene 7 postulados y otros capítulos en que describe los movimientos celestes, puede darnos una idea más explícita de la construcción de Copérnico:

PRIMER POSTULADO: No existe un centro único de todos los círculos o esferas celestes.

13. Ptolomeo había pretendido seguir los principios de Aristóteles reduciendo los movimientos de los planetas a combinaciones de movimientos circulares uniformes; pero en realidad no se trataba siempre de un movimiento uniforme alrededor del centro; alguna vez no era uniforme salvo si se consideraba como movimiento angular alrededor de un punto que no era el centro.

14. Butterfield, 1982: pp. 35.

15. Hanson, 1978: pp. 207-208.



SEGUNDO POSTULADO: El centro de la Tierra no es el centro del mundo, sino tan sólo el centro de gravedad y el centro de la esfera lunar.

TERCER POSTULADO: Todas las esferas giran en torno al Sol, que se encuentra en medio de todas ellas, razón por la cual el centro del mundo está situado en las proximidades del Sol.

CUARTO POSTULADO: La razón entre la distancia del Sol a la Tierra y la distancia a la que está situada la esfera de las estrellas fijas es mucho menor que la razón entre el radio de la Tierra y la distancia que separa a nuestro planeta del Sol, hasta el punto de que esta última resulta imperceptible en comparación con la altura del firmamento ¹⁶.

QUINTO POSTULADO: Cualquier movimiento que parezca acontecer en la esfera de las estrellas fijas no se debe en realidad a ningún movimiento de ésta, sino más bien al movimiento de la Tierra. Así, pues, la Tierra —junto a los elementos circundantes— lleva a cabo diariamente una revolución compleja alrededor de sus polos fijos, mientras que la esfera de las estrellas y último cielo permanece inmóvil.

SEXTO POSTULADO: Los movimientos de que aparentemente está dotado el Sol no se deben en realidad a él, sino al movimiento de la Tierra y de nuestra propia esfera, con la cual giramos en torno al Sol exactamente igual que los demás planetas. La Tierra tiene, pues, más de un movimiento.

SEPTIMO POSTULADO: Los movimientos aparentemente retrógrados y directos de los planetas no se deben en realidad a su propio movimiento, sino al de la Tierra. Por consiguiente, éste por sí solo basta para explicar muchas de las aparentes irregularidades que en el cielo se observan ¹⁷.

En los siguientes capítulos del *Comentariolus* nos hablará de: el orden de las esferas; los movimientos aparentes del Sol; los movimientos uniformes no deben referirse a los equinoccios, sino a las estrellas fijas; la Luna; los tres planetas superiores: Saturno, Júpiter y Marte; Venus y Mercurio.

Pasaremos ahora a exponer una síntesis de *De revolutionibus*... que es donde presenta su teoría de forma completa.

En el *Prefacio*, dedicado a Pablo III, expone las razones, temores y dudas que le han llevado a la confección del libro. Es aquí donde hace referencia a los pensadores clásicos que han tenido un enfoque similar al suyo.

El *Libro primero* trata los fundamentos de la astronomía. En los primeros capítulos expone el axioma básico de la astronomía: *el movimiento de los cuerpos celestes es circular y uniforme* (I,4). Pasa a tratar el movimiento circular de la Tierra (I,5);

16. Este postulado se esgrime como argumento para salvar la objeción de la paralaje y sienta las bases para la concepción de un universo infinito.

17. Copérnico, 1983: pp. 26-28.



el orden de los astros (I,10) y las ventajas de simetría y armonía que se obtienen al situar al Sol en el centro. En el libro (I,11) demuestra el triple movimiento de la Tierra, que explicaremos con más detalle más adelante. Los libros (I,13) y (I,14) tratan de geometría celeste (trigonometría de triángulos planos y esféricos)¹⁸.

El *Libro segundo* trata de astronomía esférica esencialmente. En él no hay vinculación directa con las tesis básicas copernicanas. Aparece en la obra global como un elemento de la exposición completa de astronomía, por analogía con los correspondientes capítulos del *Almagesto*. Con ello quiere Copérnico dar a entender que su obra tiene el mismo rigor que la Ptolemaica. Define el círculo (II,1); determina el ángulo de oblicuidad de la eclíptica (II,2); nos da definiciones y mediciones de los parámetros astronómicos del (II,3) al (II,10); trata las fases visibles de estrellas y planetas (II,11) y (II,12) y nos ofrece un catálogo de estrellas (II,13) y (II,14).

En el *Libro tercero* estudia los fenómenos relacionados con el movimiento aparente del Sol. Desarrolla la distinción entre año trópico y sidéreo (III,1); de los libros (III,2) al (III,12) explica su teoría de la precesión; en el (III,13) introduce la teoría solar y entre los (III,14) y (III,26) trata las primeras y las segundas desigualdades¹⁹.

El *Libro cuarto* está dedicado al estudio de los movimientos de la Luna y a los métodos para calcular los eclipses.

Los *Libros quinto y sexto* están dedicados a los planetas.

Copérnico no emplea el mismo sistema a lo largo de su vida. Así, en el *De revolutionibus...* usa un sistema excéntrico-epicíclico mientras que en el *Commentariolus* el sistema es concéntrico y con dos epiciclos. Aunque algunos autores señalan que este empleo de dos sistemas se debe a que el *Commentariolus* representa un boceto de una idea más elaborada con el tiempo, hemos de decir que la razón de este cambio se deberá a la necesidad de explicar las primeras desigualdades.

La extraña danza de los cuerpos celestes

Veamos cómo explica Copérnico las segundas desigualdades de los planetas interiores y exteriores de una manera muy esquemática (Figura 1)²⁰:

18. Estos dos capítulos habían sido publicados como tratado aparte por el discípulo de Copérnico, Rheticus, en 1542.

19. En lo que respecta a la explicación del movimiento de los cuerpos celestes podemos hablar de dos tipos de desigualdades: las «primeras» que aluden a la variación de las velocidades angulares y de los planetas y las «segundas» que hacen referencia a la posición de los planetas en la conjunción y oposición, así como sus puntos estacionarios y retrógrados.

20. La figura ha sido tomada de Hanson, op. cit., pp. 206.

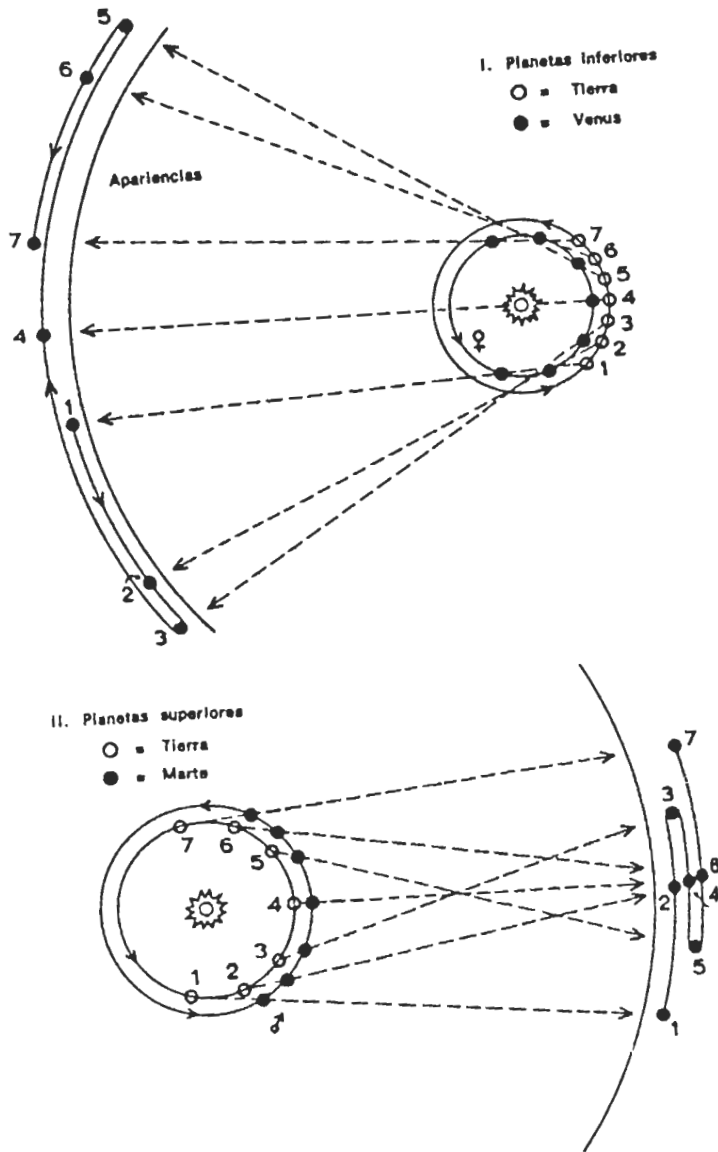


Fig. 1



La curva numerada muestra el movimiento observado en el cielo, mientras que los círculos numerados mostrarían el movimiento real. Copérnico explica de este modo las segundas desigualdades, pero para las primeras la tarea es más ardua, ya que necesita de la excentricidad, y es por esto que introduce un sistema excéntrico-epicíclico. No obstante, este tipo de desigualdades nunca serán explicadas satisfactoriamente, ya que para ello se requerirá la aceptación de órbitas elípticas y una ley de áreas que no llegará hasta Kepler ²¹. Sin embargo, a pesar del tratamiento insatisfactorio de estas primeras desigualdades el hecho de prestar atención a las segundas permitió una interconexión sistemática de todas las perturbaciones planetarias.

El sistema copernicano no estaba absolutamente centrado en el Sol. Debido a estas primeras desigualdades, y para explicar el ritmo acelerado con que el Sol atraviesa los signos del zodiaco durante el invierno, Copérnico desplaza al Sol del centro de la órbita terrestre, manteniendo también esta solución para explicar las otras desigualdades. De esta forma, a juicio de Dreyer, Copérnico guardó una fidelidad a Ptolomeo mayor de la que debiera, ya que la Tierra seguía siendo un cuerpo tan importante en este sistema como en el viejo.

En el sexto postulado Copérnico afirma que la Tierra posee más de un movimiento, en concreto tres. Detengámonos un poco en la explicación copernicana de los tres movimientos terrestres:

— El movimiento de *rotación* diaria hacia el Este explica los círculos cotidianos aparentes descritos por las estrellas, el Sol, la Luna y los planetas.

— El movimiento de *translación* hace que la Tierra gire en torno al Sol en un año describiendo un círculo. La observación sólo nos obliga a mantener la Tierra dentro de una pequeña esfera concéntrica a la esfera estelar. Dentro de los límites de esa esfera interior la Tierra puede desplazarse con toda libertad sin violar las apariencias si tenemos en cuenta el tamaño inmenso del cielo.

— El movimiento de *oscilación* nos muestra que mientras el centro de la Tierra es arrastrado por la esfera que la contiene alrededor del Sol, su eje permanece constantemente paralelo a una línea fija que atraviesa el Sol. Este movimiento sería el resultado de dos movimientos matemáticos simultáneos.

Como la Tierra está fijada sólidamente a una esfera (Copérnico seguía creyendo en la existencia de las esferas sólidas), su eje no podría permanecer constantemente

21. El principio de circularidad nunca se llegó a poner en tela de juicio durante los 2.000 años de astronomía computacional. Y esto tanto por razones observacionales (no hay nada que a simple vista haga pensar en una órbita elíptica de los cuerpos celestes) como por consideraciones filosóficas (propuestas por Aristóteles y sustentadas en la distinción de dos mundos, en el carácter perfecto del mundo supralunar y en el movimiento circular adecuado a este mundo perfecto). Hanson op. cit., pp. 255 y ss.



paralelo a la línea que atraviesa el Sol, por lo que hay que dotarla de este tercer movimiento. Es decir, después de girar 180° , el eje de la Tierra seguiría teniendo una inclinación de $23,5^\circ$ con respecto a la perpendicular al plano de la eclíptica, pero en dirección simétrica a la del comienzo²². Para compensar esto Copérnico añade un giro exclusivo al eje terrestre de forma que éste describe un pequeño cono. Este movimiento cónico hace girar los extremos norte y sur de los ejes en una revolución anual hacia el Oeste, con el fin de compensar con exactitud los efectos del movimiento orbital. Con ello podía Copérnico establecer la velocidad del movimiento de precesión o, más exactamente, el valor medio de ésta.

Un pequeño debate a posteriori

Copérnico se mostró indiferente a las consecuencias físicas del movimiento terrestre, lo que da a entender, según refiere Kuhn²³, que su espíritu se hallaba absorto por las armonías geométricas y que precisamente por ellas se adhirió a la idea de un movimiento terrestre. Aunque bien es cierto que Copérnico no dió respuestas físicas o cosmológicas completamente convincentes, esto no tiene por qué hacernos pensar que su adhesión al sistema era una mera cuestión de armonía.

Hanson, por su parte, no cree que el neoplatonismo de Copérnico al que se refiere Kuhn sea tan exacerbado. Este autor opina que el deseo de dar una explicación sistemática e inteligible tiene más importancia para Copérnico que su indudable estima al Sol²⁴.

Para algunos autores, como es el caso de Price, R. Hall y otros, el sistema heliocéntrico era geoméricamente equivalente al sistema geocéntrico, por lo que no podemos hablar de una mayor precisión en los cálculos ni de una ventaja clara del primero con respecto al segundo. En este punto es interesante recurrir al estudio que expone Hanson²⁵ y que se dirige a demostrar que estos autores se equivocan y que la equivalencia entre ambos sistemas lo es sólo a un nivel puramente observacional. Si no es así, sólo podríamos concluir que la elección de Copérnico y de sus seguidores vino dada por una cuestión de armonicidad o por mero gusto estético y que nada

22. El eje terrestre jamás apunta hacia un mismo lugar de la esfera celeste desde el principio al final del año. La prolongación del eje terrestre dibuja a lo largo del año dos pequeños círculos sobre la esfera de las estrellas alrededor del polo Norte y del polo Sur celestes. En términos observacionales las estrellas deberían mostrar un ligero cambio en su posición sobre la esfera estelar a lo largo del tiempo. Tal movimiento se detecta con el uso del telescopio en 1838.

23. Kuhn, op. cit., pp. 240.

24. Hanson, op. cit., pp. 213.

25. Hanson, op. cit., pp. 223 y ss.



tuvieron que ver cuestiones o elementos internos a la propia teoría; en definitiva, la elección vendría determinada por elementos externos ²⁶.

El núcleo de la discusión de Hanson estriba en señalar que tanto el sistema de Ptolomeo como el de Copérnico tenían como finalidad salvar las apariencias ²⁷ y, en esta medida, debían ser *observacionalmente equivalentes*, es decir, son equivalentes con respecto a lo que se ve, pero no en cuanto a la estructura interna de dichas teorías. Esto significaría que, si eludimos los diagramas representativos, lo observable sería igual en ambos sistemas. Pero esto no implica que podamos hablar de una equivalencia formal entre ambas teorías ya que tienen distintas consecuencias derivables. Un análisis similar queda expuesto al comparar los sistemas heliocéntrico y tychónico.

Pero aceptemos por un momento que Hanson no tiene razón; podemos preguntarnos entonces dónde residen las ventajas del sistema heliocéntrico y por qué será el que se convierta en el aceptado con el paso de los años.

Se han aducido una serie de razones, entre ellas la de la *simplicidad*, en la medida en que Copérnico emplea menos círculos que Ptolomeo. Sin embargo, este rasgo de la simplicidad no debe engañarnos porque Ptolomeo, a pesar de usar un número más elevado de círculos que Copérnico, nunca utiliza más de cuatro de una vez, ya que las explicaciones de Ptolomeo se dirigen a problemas concretos y en ningún modo se interconectan unas con otras.

El sistema heliocéntrico necesita de 34 círculos (menos que el de Ptolomeo en conjunto) pero su carácter interconexo supone emplear muchos más círculos de una vez ya que las explicaciones comprometen a un número mayor de cuerpos. Por ejemplo, en el caso más simple, Copérnico ha de orientar la Tierra o los planetas con respecto al Sol, que es el centro del sistema, y luego ha de conectar al planeta en cuestión tanto con respecto al Sol (a efectos de cómputo) como con respecto a la Tierra (a efectos de observación). De este modo, la simplicidad en el sistema copernicano no es tanta; sólo cabe hablar en cualquier caso de una simplicidad sistemática.

Salvando lo dicho, la explicación de Mercurio y Venus sí es más simple que la que ofrece Ptolomeo. Según el sistema ptolemaico Mercurio, Venus y el Sol precisaban de un año para recorrer la eclíptica por lo que la disposición relativa que

26. Cuestión que sería defendida por aquellos que propugnan un acrecimiento al estudio de la ciencia de carácter sociológico.

27. Aunque hay también una distinción semántica entre lo que signifique este término en uno y otro autor; así, para Ptolomeo, significaría descripciones fenomenológicas particulares de los fenómenos a cualquier costo, mientras que en Copérnico estas palabras se usan con respecto a las consecuencias observacionales de una teoría en su conjunto.



ocupaban sus órbitas había sido fuente de discusión. En el sistema copernicano no se dan estas controversias toda vez que no hay dos planetas que tengan el mismo período orbital.

Existe una *armonía* en el sistema copernicano de tal suerte que si algo se trastoca en un punto repercute en el resto del sistema. Cada una de las partes está fundamentalmente determinada por las demás por lo que respecta al orden, magnitud, dimensión, velocidad y diámetro aparente de los cuerpos.

Quizás el valor de esta «armonicidad» hoy sea nulo, pero pudo atraer a un buen número de astrónomos neoplatónicos que prefirieron esta armonía a las cuestiones de una mayor simplicidad y precisión, aunque esto pudiera no valer en el caso del propio Copérnico.

En cualquier caso, existen respuestas para todos los gustos y no podemos dar una definitiva al por qué de la aceptación paulatina del sistema heliocéntrico. Sólo es posible señalar los puntos de discusión entre aquellos que se ocupan del tema de una forma más profunda.

El largo y tortuoso camino para la aceptación

Hasta el último decenio del siglo XVI no comenzarán a aparecer los verdaderos copernicanos y con ellos la posibilidad de un conflicto entre astronomía realista por un lado y filosofía y religión por otro. La adopción del heliocentrismo fue lenta y gradual. Al principio la teoría sólo era conocida por los profesionales de la astronomía y no todos ellos la compartían. Para muchos ojos profanos la innovación de Copérnico era absurda, impía y ridícula. No había aún ninguna observación importante que explicara la teoría copernicana²⁸ y la de Ptolomeo no, ni anomalía nueva que desterrara el viejo modelo. El lento desarrollo de la física teórica tampoco permitía al principio desterrar la física aristotélica.

Debido a que las verdades morales y religiosas de esta época tienen más peso que las científicas, durante un tiempo no se persiguieron las ideas copernicanas. Se interpretaban como un artilugio geométrico sin correlato físico²⁹ y esto permitió su primera expansión. Sólo cuando se cayó en la cuenta de que la teoría de Copérnico tomada en serio podía plantear una amenaza para el orden establecido e innumerables problemas al universo cristiano se desataron las tempestuosas controversias.

La moral y la teología cristianas tradicionales habían hecho suyo el modelo cosmológico aristotélico-ptolemaico, finito, supra y sublunar, con todas las alegorías

28. El descubrimiento de las aberraciones estelares se realiza en 1727 y la comprobación de la rotación terrestre a mediados del siglo XIX.

29. Recuérdese el prólogo de Andreas Ossiander al *De Revolutionibus...* insistiendo en este sentido.



religiosas que de él se derivaban. En una época de reformas religiosas, donde cada una de las alternativas estaba buscando el camino más puro que condujera a Dios, la Biblia se tomó de nuevo como guía de la verdadera fe. Se utilizó la palabra divina como un serio argumento de peso en contra del modelo heliocéntrico, dado que en ella hay un pasaje donde Dios manda explícitamente a parar el Sol. La teoría del movimiento terrestre tenía implicaciones teológicas que podían provocar una transformación profunda de la relación del hombre con Dios y de las bases de la moral. La resistencia a las ideas de Copérnico se convirtieron a la larga en causa común de las Iglesias Católica y Protestante.

Según R. Hall la evolución de la astronomía heliostática tuvo que superar diversas etapas hasta lograr una aceptación generalizada. Tenía que disolver los prejuicios contrarios a la idea de que la Tierra se movía y desacreditar de manera general la autoridad de Aristóteles. Había que criticar detenidamente las ideas cosmológicas antiguas a fin de que tal movimiento fuera verosímil. Era imprescindible hacer una revisión de las teorías físicas para demostrar que no eran válidos los reparos a la teoría copernicana nacidos de fenómenos mecánicos terrestres. Además de salvar con el tiempo estos obstáculos, la nueva astronomía se vio enriquecida por la observación cualitativa y cuantitativa.

En opinión de Crombie³⁰ el sistema copernicano, pese a todos los inconvenientes, se fue imponiendo debido a una serie de intereses fundamentalmente externos:

— Las Tablas Alfonsinas habían causado insatisfacción porque eran antiguas y no se correspondían ya con las posiciones observadas de los astros. Diferían de Ptolomeo en la precesión de los equinoccios y añadían otras esferas más allá de su novena³¹. Tal desviación parecía ofensiva a los humanistas que creían en la perfección del conocimiento que se había de encontrar en las obras de los clásicos. Todos los astrónomos prácticos se cambiaron a las Tablas Prusianas del siglo XVI, calculadas según el sistema copernicano, aunque eran escasamente más exactas³².

— Algunos humanistas consideraron a Copérnico como el restaurador de la pureza clásica de Ptolomeo. Otros como Benedetti, Bruno y Petrus Ramus, vieron en su sistema un palo para golpear a Aristóteles.

30. Crombie, op. cit., pp. 161 y ss.

31. Las esferas van conteniendo los cuerpos celestes desde la Tierra a las estrellas fijas (octava esfera). La novena esfera no contiene ni planetas ni estrellas, pero tiene que existir porque es el «primum mobile».

32. Erasmus Reinhold (1511-1553), ocho años después de la publicación del *De Revolutionibus*, publicó un conjunto de tablas astronómicas calculadas según los métodos matemáticos desarrollados por Copérnico que se hicieron imprescindibles a partir de entonces. Se llamaron *Tablas Prusianas* en honor al protector del autor, el Duque de Prusia. Eran las primeras tablas completas que se elaboraban en Europa desde hacía tres siglos.



— Científicos como Brahe, Kepler, Gilbert o Galileo comprendieron toda la significación del *De Revolutionibus...* e intentaron unificar las observaciones, las descripciones geométricas y la teoría física.

Butterfield hace hincapié en que el cambio no se produjo por nuevas observaciones ni pruebas inusitadas, sino por el cambio de visión en las mentes de los hombres de ciencia, que colocaban los datos ya conocidos en nuevos sistemas de relaciones.

Sean unas causas, sean otras, las semillas de la moderna astrofísica quedaban sembradas.

«Mirar las estrellas: el espectáculo nocturno más antiguo del mundo»

Comediantes

3. Tycho: la mirada más aguda

El período que va desde 1543, cuando se publica el *De revolutionibus...* y 1609, con la aparición del libro de Kepler sobre Marte, se puede considerar de transición, ya que no todos los astrónomos, en contra de lo que podría suponerse, aceptan el sistema heliocéntrico, aunque sí las Tablas Prusianas, como hemos señalado anteriormente.

En este interregno que va de Copérnico a Kepler cabe citar una serie de autores como, por ejemplo, Digges, que acepta el movimiento de la Tierra como algo real y no como mera hipótesis; o Gilbert, que considera la revolución diaria de la Tierra no sólo como probable sino como cierta, argumentando un principio de economía de la naturaleza; otros como Benedetti y Francesco Patrizio admiten la rotación terrestre y se preocupan por refutar la física aristotélica que no cuadra con la teoría heliocéntrica; también Mästlin, Rothmann y David Tost pueden catalogarse como copernicanos; una mención aparte la merece Giordano Bruno que ya ha sido estudiado en este Seminario; y cabe señalar a un español, Stúñiga, que en 1584 publicó en Salamanca un comentario sobre el libro de Job que hace concordar con la idea de una Tierra en movimiento.

No obstante, el hombre que descuella en este período de transición será un anticopernicano: Tycho Brahe (1546-1601). En 1563 se produjo una gran conjunción de Saturno y Júpiter que él esperaba ansiosamente. Esto demostraba que las Tablas Alfonsinas estaban equivocadas en un mes mientras que las copernicanas, más recientes, lo estaban en unos días. Esto convenció a Tycho para dedicarse a trazar de nuevo el mapa de las posiciones de las estrellas más brillantes y, una vez establecida la carta fundamental del cielo, hacer observaciones detalladas para realizar cálculos sin errores y recopilar tablas exactas con vistas al futuro.



Brahe intentaba escapar del sistema ptolemaico ya que, al igual que Copérnico, deseaba fundir la astronomía predictiva con la cosmología explicativa, pero tampoco pudo desatarse del principio de circularidad y del movimiento uniforme de los planetas. Sus observaciones, rigurosas, precisas y sistemáticas, le llevaron a formular una teoría planetaria nueva e interesante³³.

Estas observaciones eran realizadas con instrumentos que él mismo perfeccionaba. Determinó los errores de los instrumentos, estableció límites de precisión en sus observaciones y tuvo en cuenta el efecto de la refracción atmosférica sobre las posiciones de los cuerpos celestes. Fue el primer astrónomo de Europa que utilizó las primeras coordenadas celestes, calculando las posiciones de las estrellas con referencia al ecuador celeste y no a la eclíptica.

Las observaciones sistemáticas de Brahe le llevaron a la revelación de problemas ocultos hasta entonces. Así, en 1572 se observó la aparición de una supernova en la constelación de Casiopea, y aunque Tycho nunca la aceptó totalmente, sirvió como avance para demostrar empíricamente la mutabilidad de la sustancia celeste. Otra de las observaciones de este autor se refería al cometa de 1577; según ésta, se concluyen dos cuestiones: la órbita del cometa no es circular sino ovalada³⁴ y además se halla más allá del Sol, por lo que debía haber atravesado las esferas sólidas, luego estas esferas *no existen*.

Tycho siguió pensando que los copernicanos no podían responder a las objeciones físicas que se les planteaban, pero no fue este tipo de reparos lo que le llevó a formular su sistema, sino otros distintos: antes del invento del telescopio se creía que las estrellas fijas brillaban por la luz reflejada y su brillo se tomaba como medida de su magnitud (ya que se consideraban como discos y no como puntos luminosos). Brahe observó que al no existir paralaje estelar observable el sistema copernicano implicaba que las estrellas tenían un diámetro de dimensiones increíbles³⁵.

Es así como concibió su propio sistema en el que la Tierra permanece en el centro, inmóvil, el Sol gira alrededor de la Tierra y los planetas lo hacen alrededor de aquél (salvando de esta forma las objeciones físicas planteadas al movimiento terrestre). Hay que decir que este sistema, conocido como tychónico, es equivalente

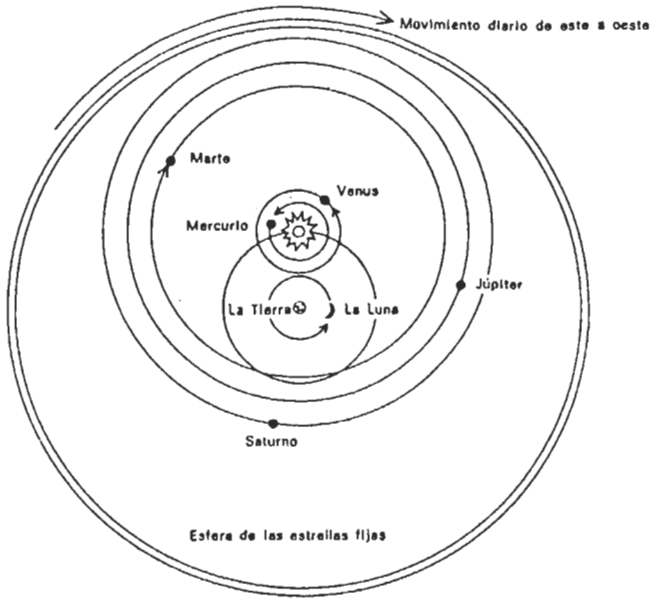
33. Tycho inaugura la técnica de efectuar observaciones regulares durante toda la trayectoria. Previamente a él sólo se observaban los puntos de conjunción y oposición y otros momentos relevantes.

34. Y aquí Tycho no señala que esta forma oval sea consecuencia de la combinación de círculos, lo que supone un rasgo original.

35. Esta objeción de Tycho al heliocentrismo quedaría eliminada cuando Galileo, empleando el telescopio, probó que las estrellas fijas no tienen esas dimensiones increíblemente enormes. Sin embargo, la objeción del paralaje siguió presentando un problema al sistema heliocéntrico.



observacionalmente al de Copérnico y se erigió como alternativo a los sistemas heliocéntrico y geocéntrico durante dos generaciones (Figura 2) ³⁶.



Sistema tychonico simplificado.

Fig. 2

* * *

El sistema tychonico tiene sus propias incongruencias: la mayor parte de los planetas se hallan descentrados, el centro geométrico del universo ha dejado de ser el centro de la mayoría de los movimientos y es muy difícil imaginar un mecanismo físico que pueda producir, aunque sea de forma aproximada, movimientos planetarios como los propuestos por Brahe. No convence a los copernicanos ni a los neoplatónicos, pero sí a los no copernicanos, ya que mantenía las ventajas matemáticas del sistema de Copérnico y suprimía los inconvenientes físicos, cosmológicos y teológicos. Tycho, como dice Hanson, y a pesar de su intento conservador, remachó el último clavo del ataúd de la astronomía ptolemaica de finales de la Edad Media ³⁷.

Y sobre las impresionantes observaciones de este astrónomo se alzaría el genio teórico de Johannes Kepler.

36. La figura ha sido tomada de Hanson, op. cit., pp. 271.

37. Hanson, op. cit., pp. 276.



«...el círculo es como una prostituta voluptuosa que seduce a los astrónomos para apartarlos de la naturaleza honesta y virginal... Copérnico había preferido la mujerzuela»

J. Kepler

4. Una admirable obsesión

Johannes Kepler (1571-1630) nace en Württemberg. Estudia teología y astronomía, entendiéndola esta última como el camino más adecuado para la teología, al igual que las matemáticas. Sin embargo, las circunstancias hicieron que fuera un astrónomo, aunque siempre perduró en sus obras la preocupación teológica y un cierto pitagorismo y neoplatonismo. Trabajó con Tycho Brahe en Praga y a la muerte de éste le sustituyó como astrónomo imperial. Escribió seis tratados de astronomía, dos de óptica y otras obras menores.

Puede decirse que Kepler no es un simple copernicano ya que precisamente desbancará los dos principios medievales a los que Copérnico no pudo decir que no: el de circularidad y el de movimiento uniforme. Sí fue, en cambio, un heliocentrista convencido desde el principio y opinaba que este sistema superaba con creces al de Ptolomeo, considerándolo verdadero bajo el argumento de que sólo accidentalmente pueden obtenerse consecuencias verdaderas de premisas falsas y el sistema heliocéntrico tiene muchas consecuencias verdaderas allí donde Ptolomeo no daba respuestas.

Otro rasgo que caracteriza a Kepler es su idea de que el universo constituye una estructura racional y perfecta en la que se manifiesta la sabiduría de Dios. Se propuso como objetivo el desentrañar esa estructura profunda. Recordemos que precisamente los dos siglos que dura la RC darán lugar al intento de formular leyes racionales que permitan desentrañar la naturaleza, la cual posee un carácter matemático. Y esta es la idea de Kepler.

Para él la teoría astronómica debía ser algo más que un conjunto de recursos matemáticos con los que podían darse cuenta de los fenómenos observados; la misma tenía que asentarse sobre principios físicos correctos de los que pudieran deducirse los movimientos de los planetas a partir de las causas que los producen. En otras palabras, lo que pretendía era obtener leyes matemáticas que interpretasen la realidad física de las estrellas. Así llegamos a otra característica de Kepler: su empirismo marcado, de tal suerte que es precisamente a los datos a los que han de adecuarse las teorías o hipótesis. Kepler rechaza por tanto cualquier tipo de apriorismo.

Sería ardua la tarea de explicar toda la labor de Kepler a lo largo de los años; baste con decir que cuenta con las observaciones realizadas por Tycho y que las mismas eran sometidas a los sistemas de Ptolomeo, Copérnico, Tycho y al suyo propio, como si la labor de corroboración de todas ellas fuera la tarea principal para poder abordar la verdadera trama de los cielos. Sin embargo, no podemos obviar algunos



de los pasos que da este autor, aunque sólo sea para hacernos una idea algo más clara de cómo llega a esa fórmula general que relaciona todos los planetas.

La primera obra de Kepler es *Mysterium Cosmographicum* (publicado en 1569) cuyo título se muestra menos misterioso que su contenido; en él Kepler se propone demostrar la validez del sistema heliocéntrico en base al número de planetas: seis. Mientras que en el sistema ptolemaico la Luna era considerada como un planeta más, el sistema copernicano no la consideraba como tal (lo cual representó una anomalía a dicho sistema durante mucho tiempo) y, en consecuencia, se hablaba de seis planetas. Kepler quería descubrir por qué Dios había creado un universo heliocéntrico con seis planetas y para ello intentó demostrar que existía una correlación entre los seis planetas y los cinco sólidos regulares; estos sólidos definirían los espacios entre las seis esferas y, puesto que sólo existen cinco sólidos regulares, sólo existen seis planetas.

Este no es el tipo de cuestiones que se plantean normalmente en la ciencia, pero no podemos olvidar que Kepler estaba impregnado del neoplatonismo renacentista que, aunque le condujo a elaboraciones como las referidas, también le proporcionó la posibilidad de mejorar el sistema copernicano en tanto estaba convencido de que la construcción del universo seguía principios geométricos.

El eterno rompecabezas

Kepler comienza por el estudio de la órbita de Marte que había ocasionado verdaderos problemas a los astrónomos desde los tiempos de Eudoxo³⁸ y somete el cálculo de esta órbita a los tres sistemas conocidos comparándolos con los resultados obtenidos por las observaciones de Brahe. Se da cuenta entonces de que Copérnico había complicado las cosas excesivamente al no permitir que las órbitas de todos los planetas pasaran por el Sol. Intenta explicar el movimiento orbital de Marte por medio de una excéntrica, pero esto se torna insuficiente y ha de añadir un punto ecuante con su correspondiente círculo con el fin de que las observaciones de que dispone concuerden lo máximo posible. Aunque esto supone volver a un estadio precopernicano, Kepler no duda en dar este paso con el fin de evitar un cúmulo de epiciclos y, consecuentemente, una construcción muy artificiosa. Sin embargo, aun con la introducción de un punto ecuante, aparece una diferencia de 8' entre las posiciones observadas y las calculadas³⁹, lo que hace que Kepler abandone el estudio de la órbita de Marte por el momento.

38. La cantidad de irregularidades de Marte sólo han sido superadas por las de Mercurio.

39. Los errores de Tycho nunca excedían de 2' por ello Kepler no podía aceptar un error de tal calibre en sus propios cálculos.



Algún tiempo después comienza a estudiar el movimiento de la Tierra alrededor del Sol recurriendo siempre a los datos de Tycho. Aquí Kepler da muestras de su genio al emplear un método tan sencillo como ignorado por los astrónomos previos: estudia la trayectoria de la Tierra como si el observador estuviera en una plataforma exterior. Esto surge de la necesidad de conocer también cómo se mueve el lugar desde el que se realizan las observaciones del movimiento de los demás planetas⁴⁰. Esto representa una de sus rupturas con la tradición.

De esta investigación concluye Kepler que la estructura del movimiento terrestre es semejante a la calculada para Marte y que también requiere la introducción del ecuante. Por tanto los movimientos de los planetas y de la Tierra son semejantes y dichos movimientos, en un plano real, son *no uniformes*, ya que se precisa del ecuante para ajustarse a la órbita de más precisión.

En su *Mysterium Cosmographicum* Kepler ya argumentaba que el Sol, al estar cerca del centro del sistema planetario y al ser tan grande, debía ser de algún modo el responsable *causal* de que los planetas se movieran como lo hacen; pero no elabora matemáticamente esta idea. Para ello habrá que esperar a la aparición de Newton. La convicción de que la *causa* de los desplazamientos planetarios se debe al Sol y no al Primer Motor, constituye una idea profundamente antiaristotélica. Kepler sabía igual que Tycho que las esferas cristalinas no existían. De ser esto cierto había que establecer una nueva física celeste que diera cuenta de los movimientos planetarios.

Kepler conocía el trabajo de Gilbert sobre magnetismo, lo que puede ayudarnos a comprender su idea de dar un estatus de causalidad al Sol. Esta afirmación en boca de Kepler, sin sustentarse en nada más definitivo, ha sido tomada por algunos autores como muestra de su interés por la explicación en base a «almas»; pero esto es cierto sólo para el comienzo de su obra ya que tal sugerencia sufrió una transformación gradual a lo largo de su vida. Cuando Kepler escribe su *Mysterium...* denomina a la energía que irradia el Sol «anima motriz», expresión cargada de connotaciones espiritualistas. En 1621, al preparar una segunda edición a esta obra, escribe en una nota a pie de página lo siguiente: «Si sustituís la palabra *anima* por la palabra fuerza (*vis*), tendréis el principio mismo en que se basa la física celeste del *Comentario sobre Marte*. Antes creía firmemente que la causa que mueve los planetas era un alma... Pero cuando reconocí que esta causa motriz se debilita a medida que aumenta la distancia al Sol, al igual que la luz se atenúa, concluí que tal fuerza debía ser parecida a una fuerza corpórea»⁴¹. Vemos como Kepler va pasando de lo espiritualista a lo mecanicista.

40. Este recurso había sido utilizado ya por Kepler en su obra *Somnium*, relato de divulgación en el que los protagonistas viajan a la luna y desde allí observan el movimiento terrestre. Es uno de los primeros escritos de ciencia ficción.

41. Citado en Westfall, 1980: pp. 24.



Al igual que Descartes, Kepler estaba convencido de que en el sistema solar debía haber alguna fuente de fuerza o tensión. No podía ser un complejo formado por cuerpos totalmente independientes sin interacción mutua. Para Galileo los movimientos naturales del universo eran básicamente sencillos, eternos y libres de fuerza, en la visión de Kepler, más realista, los movimientos son complejos y resultantes de una interacción de «fuerzas corporales» análogas a las magnéticas o gravitacionales.

En este sentido Galileo aún pertenecía a un universo geométrico que Kepler había rechazado en aras de un universo físico sin lugar para las ideas puramente geométricas desprovistas de equivalentes empíricos.

Las tinieblas se hacen ley

La dura labor de sus cálculos lleva a Kepler al descubrimiento de sus tres famosas leyes, con las que describe un universo en el que las órbitas de los planetas no son circulares ni uniformes y el tamaño de las mismas está relacionado con las velocidades de los planetas.

PRIMERA LEY: los planetas se mueven en elipses con el Sol en uno de sus focos (*Astronomía Nova*, 1609).

SEGUNDA LEY: cada planeta se mueve, no uniformemente, sino de forma que la línea que une su centro con el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales (*Astronomía Nova*, 1609).

TERCERA LEY: los cuadrados de los períodos de revolución de los planetas son proporcionales a los cubos de sus distancias medias al Sol (*Harmonice Mundi*, 1619).

Mantendremos en nuestra explicación el mismo orden que sigue Kepler en sus deducciones, ya que, realmente, Kepler formuló en primer lugar su Segunda Ley, más conocida como «Ley de áreas» con la que intenta explicar matemáticamente los cambios de velocidad. En esta búsqueda juega un papel importante la pregunta de por qué los planetas más cercanos al Sol marchan a velocidad superior con respecto a los más alejados, al tiempo que cada planeta va más deprisa cuando está más cerca del Sol que cuando se halla más lejos. Es curioso como Kepler llega a su segunda Ley partiendo de tres hipótesis incorrectas:

a) Cree que cualquier fuerza ha de tener la misma magnitud en todos los puntos de la circunferencia de un círculo en cuyo centro se halla el objeto que provoca la fuerza y en la circunferencia el objeto sobre el que ésta se ejerce: a mayor distancia, menos fuerza⁴². Pensaba que la velocidad debía ser proporcional a la fuerza im-

42. Esto es una verdad relativa y funciona si se refiere a la fuerza de gravedad, pero no ocurre lo mismo con todo tipo de fuerza; la fuerza elástica, por ejemplo, aumenta con la distancia.



pulsora e inversamente proporcional a la distancia. Esta es la conocida —y errónea— *ley de velocidades*⁴³ a partir de la que deduce su ley de áreas.

b) Observa que si la velocidad varía inversamente a la distancia al Sol, la distancia a éste de cada segmento de una órbita ha de ser proporcional al tiempo que el planeta emplea en recorrerlo; además, creía que la suma de los radios de los pequeños segmentos de dicha órbita podía ser considerada igual al área que el radio barre a medida que se mueve el planeta.

c) Todavía supone Kepler que la órbita es circular, ya que aún no ha establecido su primera ley.

De estos tres supuestos se extrae la Segunda Ley que queda formulada como la expusimos más arriba. Esta ley describe con bastante exactitud el movimiento de cualquier planeta alrededor del Sol y era la mayor aproximación matemática a la que Kepler podía llegar. El cálculo infinitesimal desarrollado posteriormente por Newton y Leibniz demostrará que la ley es exacta siempre que pueda despreciarse la influencia de un tercer cuerpo.

Una vez que queda establecido el movimiento de los planetas, es necesario explicar sus trayectorias. Kepler necesita una fórmula con la que calcular con exactitud la posición de un planeta en un momento dado. Vuelve a considerar entonces la trayectoria de Marte. Tycho había deducido de sus observaciones que la órbita del planeta rojo mostraba una forma oval, lo que no dejaba de ser una extravagancia si tenemos en cuenta el arraigado principio de circularidad. Con su Primera Ley Kepler elimina tal principio.

Los primeros intentos por salir de éste se exponen en *De Motibus Stellae Martis*, donde nos relata cómo el supuesto de la órbita circular resultaba irreconciliable con los datos. El cálculo de las distancias demostraba que la órbita «circular» de Marte se estrechaba en ciertos puntos formando una especie de óvalo, como ya había observado Tycho. En sus primeros intentos Kepler colocaba al Sol en el foco de tal figura, pero seguían presentándose ligeros desajustes entre el plano geométrico y el observacional. Tras varios intentos con órbitas ovales, Kepler prueba la elipse como una aproximación matemática a dicha órbita, ya que la elipse proporciona una función matemática uniforme. Durante un tiempo mantuvo el ovoide como hipótesis física y la elipse como supuesto matemático. Poco a poco ésta se convierte en hipótesis física: la órbita no sólo se aproxima a una elipse sino que realmente lo es y el Sol ocupa uno de sus focos. Queda establecida así su Primera Ley.

43. Errónea porque la fuerza es proporcional a la aceleración y no a la velocidad.



Dice Hanson que «al tener que terminar poniendo en tela de juicio el principio de circularidad, Kepler estaba enfrentando su fortaleza intelectual contra uno de los megalitos de la historia del pensamiento científico occidental» ⁴⁴.

Tras diez años aparece la Tercera Ley, llamada «ley de las armonías», objetivo que Kepler anduvo buscando desde los comienzos de su tarea astronómica y a la que llegó, al parecer, tras varios ensayos. Losee señala que entre los intentos keplerianos de buscar correlaciones matemáticas que armonizaran el tamaño de las órbitas con el tiempo que los planetas tardan en recorrerlas, surgen algunas propuestas bastante curiosas como aquella en la que relaciona las distancias planetarias con sus «densidades», sugiriendo que éstas son inversamente proporcionales a las raíces cuadradas de sus distancias al Sol ⁴⁵. Kepler estaba convencido de que al investigar las diferentes posibilidades encontraría una relación matemática simple que ligase todos los movimientos que ocurren en el sistema solar.

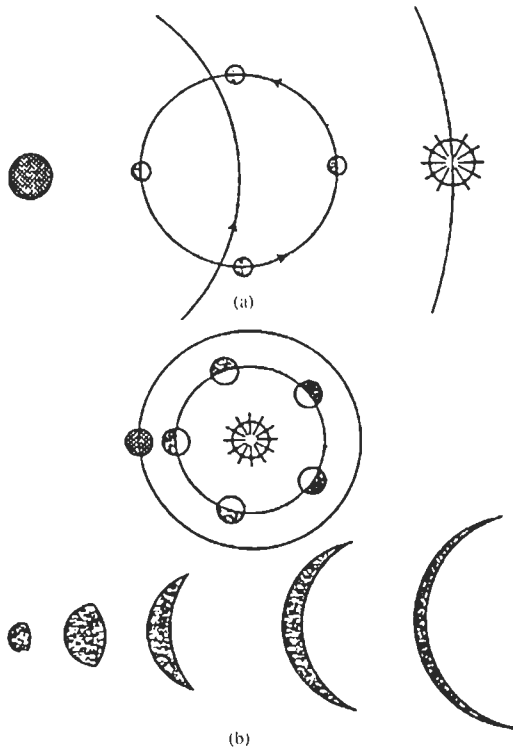
Las tres leyes de Kepler suministraron una solución definitiva al viejo problema de descubrir un sistema astronómico que salvara las apariencias, al tiempo que describiera las trayectorias reales de los cuerpos celestes, con lo que ya no se hacía necesario recurrir a la tan manida teoría de la doble verdad. No obstante, el coste de aceptar la simplicidad de la elipse venía dado por el abandono del círculo y todas las connotaciones de perfección, inmutabilidad y orden. Al mismo tiempo, el sentido común seguía rechazando esta nueva dinámica celeste y antes de que se aceptara plenamente el sistema kepleriano se debieron justificar los inconvenientes que éste tenía: para esta labor fue precisa la aportación de Galileo. Su uso del telescopio mostrando que el «mundo supralunar» no era tan perfecto como se creía y sus estudios sobre el movimiento abrieron aún más la grieta que derrumbaría la antigua cosmología.

Existían aún anomalías que desde el heliocentrismo no se podían explicar. Como ejemplo sirva el caso de la Luna, que siendo un planeta gira alrededor de la Tierra y no en torno al Sol. Cuando se descubrieron los satélites de Júpiter pareció que la anomalía lunar ya no lo era tanto (aunque seguía sin explicarse el fenómeno). Sin embargo las fases de Venus sí ofrecieron un apoyo positivo a la teoría heliocéntrica: en el sistema geocéntrico Venus siempre está entre el Sol y la Tierra y debe aparecer siempre como una media luna; en el sistema heliocéntrico Venus se desplaza por detrás del Sol y puede aparecer casi llena (Figura 3) ⁴⁶. Esto quedó revelado por el telescopio y sirvió de apoyo al heliocentrismo.

44. Hanson, *op. cit.*, pp. 286.

45. Losee, 1987: pp. 57 y ss..

46. La figura ha sido tomada de Westfall, *op. cit.*, pp. 29.



Las fases de Venus. a) El sistema tolemaico. b) El sistema copernicano. En el sistema tolemaico Venus debe aparecer siempre más o menos en fase creciente. En el sistema copernicano, puede aparecer casi llena cuando pasa por detras del Sol, y su tamaño varía enormemente.

Fig. 3

Pero todo no podía salir bien, aún quedaba una dura espina clavada en el sistema heliocéntrico: la aparente inexistencia de paralaje que no pudo descubrirse hasta el siglo XIX.

La aceptación del sistema copernicano-kepleriano, a pesar de los inconvenientes, se basará de nuevo en argumentos tales como la armonía geométrica y la simplicidad sistemática. La importancia de Kepler no sólo reside en haber descubierto las leyes descriptivas del movimiento planetario, también hizo las primeras sugerencias de una nueva cosmología física que permitió el nacimiento de la astrofísica, aunque para terminar esta labor se requiriera del trabajo de Newton y su ley puente de la gravitación universal.



Seguramente la principal cuestión que subyace a toda esta exposición podríamos resumirla en lo siguiente: ¿qué causas motivaron el cambio de un sistema astronómico por otro?. Bien es verdad que la aceptación del sistema heliocéntrico no se produjo sino tras siglo y medio de duros debates entre copernicanos y no copernicanos. Esto nos puede llevar a reflexionar sobre cuáles fueron las razones que llevaban a un copernicano a mantenerse firme en su idea a pesar de todo lo que tuviese en contra.

Al margen de todos los puntos que se han citado en el apartado 2, el núcleo de la discusión se podría centrar en las explicaciones que racionalistas y no-racionalistas aducen para el cambio científico. Para los primeros el cambio se produce por razones internas a ambas teorías, las cuales reflejan la superioridad de una frente a la otra (simplicidad, equivalencia geométrica, explicación más ajustada a lo observable, etc.). Desde este enfoque no se negaría la existencia de factores externos, pero éstos no se consideran relevantes para explicar el cambio. Así, el sistema heliocéntrico se aceptaría paulatinamente por ofrecer avances intrínsecos respecto al ptolemaico. No obstante, todas las interpretaciones racionalistas no son iguales. Las razones internas que provocan el cambio difieren entre un popperiano, un lakatosiano, etc.

Para los no-racionalistas el cambio de teoría no podría explicarse exclusivamente por razones de índole interna. Los factores de tipo social son los predominantes y los que desempeñan un papel relevante en la elección de una teoría o de otra (armonía, gusto estético, razones políticas, etc.).

Parece sencillo extraer consecuencias y correlaciones verdaderas de algún capítulo de la historia de la ciencia en la medida en que éste ya está escrito y no puede variarse. Pero esto es engañoso. Cualquiera puede mirar retrospectivamente buscando lo que le interese para defender su enfoque.

Es imposible llegar a un acuerdo sobre cuál es la posición más acertada. Todo depende de la concepción metodológica que uno mantenga en lo que respecta al cambio científico.

Por todo esto no pretenderemos aquí dar una respuesta definitiva acerca de cuáles fueron las causas de la Revolución Científica, sino más bien señalar que existen muchas interpretaciones posibles para un mismo tema.

¿Escepticismo? Quizás.



BIBLIOGRAFÍA

- BUTTERFIELD, H. Los orígenes de la ciencia moderna. Madrid. Taurus. 1982.
- CASINI, P. Naturaleza. Barcelona. Labor. 1977.
- COHEN, I.B. La revolución newtoniana, la transformación de las ideas científicas. Madrid. Alianza. 1983.
- COPÉRNICO, N. Sobre las revoluciones. Madrid. Tecnos. 1987.
- COPÉRNICO, N. y otros. Opúsculos sobre el movimiento de la Tierra. Madrid. Alianza. 1983.
- CROMBIE, A.C. Historia de la Ciencia: De San Agustín a Galileo. Madrid. Alianza. 1985.
- DREYER, J.L.E. A history of astronomy from Thales to Kepler. New York. Dover. 1953.
- HALL, A.R. La revolución científica 1500-1750. Barcelona. Crítica. 1985.
- HANSON, N.R. Constelaciones y conjeturas. Madrid. Alianza. 1978.
- HOLTON, G. Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas. Barcelona. Reverté. 1984.
- KOYRÉ, A. Del mundo cerrado al universo infinito. Madrid. Siglo XXI. 1989.
- KUHN, T.S. La revolución copernicana. Barcelona. Ariel. 1978.
- LOSEE, J. Introducción histórica a la filosofía de la ciencia. Madrid. Alianza. 1987.
- MASON, S.F. Historia de las ciencias. Vol II. Madrid. Alianza. 1985.
- MÍNGUEZ PÉREZ, C. De Ockam a Newton: la formación de la ciencia moderna. Madrid. Cincel. 1986.
- VARIOS Nicolás Copérnico. Madrid. Siglo XXI. 1973.
- WESTFALL, R.S. La construcción de la ciencia moderna. Barcelona. Labor. 1980.