



Equivalencia empírica y subdeterminación de los modelos astronómicos.

De Hiparco a Copérnico

Alejandro Cassini*

Resumen

Los astrónomos griegos, desde Hiparco a Tolomeo, supieron que el movimiento aparente del Sol, que no es uniforme, podía explicarse mediante dos hipótesis o modelos geoméricamente equivalentes: el que emplea un círculo excéntrico y el que emplea un epiciclo sobre un círculo deferente. Tolomeo, apelando al criterio de simplicidad, sostuvo que el modelo excéntrico era preferible porque postulaba un solo movimiento. Sin embargo, del hecho de que una hipótesis sea más simple que otra nada puede inferirse acerca de su verdad o verosimilitud. El mismo problema se reproduce en la astronomía copernicana. Como trato de mostrar, la elección entre hipótesis empíricamente equivalentes apelando al criterio de simplicidad, cuando es posible, resulta difícilmente compatible con una concepción realista del objetivo de la astronomía o de cualquier ciencia.

Palabras clave: modelo solar, excéntricas, epiciclos, subdeterminación, simplicidad.

Abstract

Greek astronomers, from Hipparchus to Ptolemy, knew that the apparent motion of the Sun, which is not uniform, could be explained by two geometrically equivalent hypotheses or models: the one that uses an eccentric circle and the one that uses an epicycle on a deferent circle. Ptolemy, appealing to the criterion of simplicity, maintained that the eccentric model was preferable because it postulated a single movement. However, from the fact that one hypothesis is simpler than another, nothing can

* Conicet-Universidad de Buenos Aires

be inferred about its truth or truthlikeness. The same problem is reproduced in Copernican astronomy. As I try to show, the choice between empirically equivalent hypotheses appealing to the criterion of simplicity, when possible, is hardly compatible with a realist conception of the aim of astronomy or any science.

Keywords: Solar model, eccentrics, epicycles, underdetermination, simplicity.

I. Introducción

El dogma fundamental de la astronomía griega (según se cree, originado en la academia platónica hacia comienzos del siglo IV AC) es que los movimientos de los astros son circulares y uniformes. Probablemente, se originó a partir de la observación del movimiento de las estrellas circumpolares, que recorren regularmente 15 grados por hora en el cielo y cuya trayectoria circular es directamente observable. Otras estrellas fijas (llamadas así porque no cambian sus distancias relativas cuando se mueven en el cielo) también podían observarse salir y ponerse sobre el horizonte recorriendo el cielo a la misma velocidad angular, aunque su trayectoria circular solo podía determinarse parcialmente. Ese movimiento ordenado de las estrellas fue registrado ya por los astrónomos egipcios y babilonios. Se transmitió a los griegos de la Antigüedad bajo la forma de tablas de posiciones.¹ En esas tablas no se advertían cambios en el movimiento regular de las estrellas fijas a lo largo de siglos.

Había, sin embargo, algunas pocas excepciones perturbadoras. Los planetas (literalmente “vagabundos”) o estrellas errantes acompañaban el movimiento diario de las estrellas fijas de este a oeste, pero mostraban cambios significativos en su movimiento anual de oeste a este a través de las constelaciones del Zodíaco. Los planetas, a diferencia de las estrellas fijas, no se movían con movimiento circular uniforme, algo que también podía comprobarse por observación directa. La Luna, ante todo, presentaba movimientos muy rápidos y complicados, tanto en latitud como en longitud. El Sol, por su parte, parecía moverse con distintas velocidades en diferentes momentos del año. Los restantes cinco planetas (Mercurio,

¹ En *De caelo* (II 12, 292a7-10), Aristóteles reconoció explícitamente el conocimiento astronómico heredado de los egipcios y babilonios.

Venus, Marte, Júpiter y Saturno), observados desde tiempos remotos, tenían los movimientos más anómalos ya que avanzaban y retrogradaban respecto de las estrellas fijas y, durante su retrogradación, se movían con velocidades muy variables. Además, se veían más brillantes durante su retrogradación, lo que sugería que en ese momento estaban más cerca de la Tierra.

El movimiento observable de los planetas, en suma, no era circular ni uniforme. A muchos filósofos ese hecho les resultaba inaceptable porque parecía una irrupción del caos en el cosmos, ya que era el único, entre los movimientos de los astros conocidos que, aparentemente, no obedecía la ley del movimiento circular uniforme. La retrogradación de los cinco planetas parecía, además, el más irracional de todos los movimientos, ya que, como se podía comprobar por simple observación, cada planeta tenía un período diferente de retrogradación y no parecía haber ninguna relación matemática entre los períodos de los diferentes planetas.² Para complicar más las cosas, los ángulos de retrogradación de un mismo planeta variaban en amplitud máxima entre una retrogradación y otra. El desafío para los astrónomos antiguos consistía en “salvar las apariencias” (una expresión atribuida a Platón), esto es, probar que las aparentes irregularidades de los movimientos planetarios eran el producto de la combinación de movimientos circulares uniformes. Los astrónomos griegos llamaron *anomalías* a estos movimientos irregulares de los planetas. La tarea de los astrónomos era, entonces, la de solucionar estas anomalías y así restaurar el orden del cosmos, orden de cuya existencia no dudaban.

En el curso de los siglos que van desde el IV a.C. al II d.C., los astrónomos griegos inventaron diferentes modelos geométricos que combinaban varios movimientos circulares uniformes con el fin de resolver las anomalías de los movimientos planetarios. Descubrieron, sin embargo, que una misma anomalía podía explicarse mediante dos modelos diferentes entre los cuales la observación no podía discriminar. Se trataba de modelos geoméricamente equivalentes que, en consecuencia, permitían dar cuenta de las mismas apariencias. En la terminología actual, diríamos que estaban subdeterminados por toda posible evidencia astronómica, por lo

² Los períodos de retrogradación, medidos en días, son los siguientes: Mercurio 116, Venus 584, Marte 780, Júpiter 399, Saturno 378. A primera vista, estos valores no parecen expresar ninguna regularidad.

que la elección de uno u otro no podía depender de criterios fácticos. Si suponemos que el objetivo de la astronomía es proporcionar una descripción verdadera de la estructura y el comportamiento del cosmos, la existencia de modelos o hipótesis empíricamente equivalentes plantea una dificultad aparentemente insoluble. ¿Cómo podríamos saber cuál de esos modelos o hipótesis proporciona la descripción verdadera de la realidad si ambos resultan compatibles con cualquier observación posible?

Los astrónomos griegos encontraron este problema ya en el siglo II a.C., cuando Hiparco de Nicea advirtió que el movimiento aparente del Sol alrededor de la Tierra podía explicarse mediante dos modelos diferentes. Desde entonces, la cuestión de la equivalencia empírica de los modelos planetarios, y sus consecuencias para el conocimiento astronómico, fue debatida por astrónomos y filósofos hasta los tiempos de Copérnico (y más allá incluso). La historia es demasiado extensa y complicada como para relatarla en este trabajo. Me ocuparé solamente de los dos modelos del movimiento del Sol y de la manera como los astrónomos griegos (y más tarde Copérnico) enfrentaron el problema de elegir uno de ellos, considerado como supuesta descripción verosímil del movimiento real del Sol. Finalmente, ofreceré algunas reflexiones epistemológicas acerca de los criterios que permitirían elegir entre teorías, hipótesis o modelos empíricamente equivalentes.

II. El realismo de la astronomía antigua

En términos generales, la actitud realista frente a las hipótesis y teorías científicas consiste en suponer que se proponen obtener una descripción literalmente verdadera del dominio de entidades del que se ocupan. Esto implica admitir que, si una teoría es verdadera, las entidades y propiedades que en ella se postulan deben existir realmente, aunque se trate de entidades y propiedades inobservables, es decir, inaccesibles a la percepción humana, como los átomos y la fuerza de gravedad. En el caso de la astronomía, esta actitud entraña que el objetivo de esta ciencia (en la Antigüedad considerada una rama de la matemática, una suerte de geometría aplicada) es proporcionar una descripción de los movimientos de los cuerpos celestes observables a simple vista (las estrellas fijas y móviles) de manera que puedan conocerse cómo se mueven realmente los astros, cuáles son sus movimientos naturales. Más específicamente, la actitud realista im-

plica asumir que los modelos geométricos creados por los astrónomos no tienen meramente una finalidad predictiva sino que intentan ofrecer una representación verosímil de la estructura cosmos, por lo que deben interpretarse como literalmente descriptivos del mundo real y no como instrumentos o ficciones útiles. Por consiguiente, los términos teóricos de las hipótesis astronómicas, como epiciclos, deferentes, excéntricas y puntos ecuantales deben entenderse como referenciales.

La interpretación antirrealista de la astronomía griega, basada en los debates antiguos sobre la realidad de los epiciclos y excéntricas fue popular a principios del siglo XX, sobre todo a partir de la obra de Duhem (2008), que interpretó la tradición de “salvar las apariencias” en términos instrumentalistas. Esta interpretación ha sido desestimada hace tiempo por la gran mayoría de los historiadores de la ciencia. Como a señalado Evans (1998 y 2008) los modelos planetarios de Ptolomeo, y los de toda la tradición griega desde Eudoxo, estaban fundados en supuestos cosmológicos y físicos acerca de la naturaleza del universo, supuestos que, en lo esencial, provenían de la filosofía aristotélica, cuya orientación realista es evidente. La finitud y esfericidad del cosmos y de los astros, la circularidad de sus movimientos reales y la inexistencia del vacío son los ejemplos más importantes de hipótesis físicas que provienen del *De caelo* aristotélico y se mantienen en toda la tradición astronómica al menos hasta fines de la Edad Media.

Algunos historiadores de la astronomía, como Dreyer (1906) interpretaron los modelos astronómicos de Ptolomeo de manera instrumentalista, pero esta interpretación no es sostenible a la luz de *Las hipótesis de los planetas*, sobre todo, después de la publicación en 1967 de la versión árabe de la segunda parte del libro primero de esta obra. Allí Ptolomeo intenta calcular las distancias absolutas de todos los planetas respecto de la Tierra a partir de los respectivos modelos planetarios a los cuales añade una interpretación física. El modelo físico es el de mecanismos anidados en los que no hay vacío entre uno y otro, ordenados según sus respectivas distancias a la Tierra, distancias calculadas a partir de los modelos geométricos de epiciclo y deferente. Los mecanismos para cada planeta se componen de esferas materiales sólidas. En términos de Evans (1998, 218), “cuando Ptolomeo trató de calcular el tamaño de todo el cosmos [...], anidando los mecanismos de los diversos planetas uno dentro de otro, ciertamente tomó los modelos planetarios como físicamente reales”. Ya en

el *Almagesto*, Tolomeo había calculado las distancias absolutas de la Luna (V, 11-13) y el Sol (V, 14) respecto de la Tierra. Todo ello muestra que Tolomeo, al igual que Hiparco y Apolonio antes que él, estaba interesado en describir la estructura del cosmos, ya que las distancias absolutas entre los planetas resultan irrelevantes desde el punto de vista instrumental, esto es, para predecir las posiciones planetarias. La conclusión de Evans (2008, p. 122), parece, entonces, completamente razonable: “Ptolomeo, como Hiparco antes que él, quería una teoría que no solo predijera exactamente las posiciones de los planetas, sino que *también proporcionara una imagen verdadera del cosmos*” (subrayado por el autor). Sobre la base de esa posición realista debe entenderse el extenso debate histórico acerca de la realidad de los epiciclos, deferentes y excéntricas, así como la perplejidad producida por la equivalencia empírica de los modelos epicíclico y excéntrico del Sol.

III. La anomalía solar

Las principales regularidades del movimiento del Sol fueron descubiertas por los astrónomos babilonios. Además de su movimiento diario de este a oeste, que comparte con todas las estrellas fijas y errantes, el Sol tiene un movimiento anual a través de las estrellas fijas. Ese movimiento es en el sentido inverso al de su movimiento diario, es decir, va de oeste a este. La observación muestra que el Sol recorre una distancia angular de un grado (aproximadamente) por día respecto de las estrellas fijas. Los astrónomos antiguos determinaron que el Sol tarda 365 días, 6 horas y 9 minutos en dar una vuelta completa a la esfera celestial. Ese tiempo se llama el *año sidéreo*. Después de un año, el Sol vuelve a alinearse exactamente con una estrella determinada, o constelación, que se tome como punto de referencia.

Los astrónomos del siglo IV a.C. advirtieron una irregularidad importante en el movimiento del Sol a través del Zodíaco: su velocidad no es uniforme y, por ello, no recorre ángulos iguales en tiempos iguales. El Sol se movía más rápido durante los meses del invierno y más lentamente durante los meses del verano. Como consecuencia de ello, las estaciones no tienen la misma duración; de hecho hay una diferencia de casi seis días entre la estación más larga y la más corta. Se atribuye a Calippo Cícico, hacia el 330 a.C. la primera medición de la desigualdad de las estaciones,

aunque, cualitativamente, esa desigualdad ya era conocida mucho antes.³ Dos siglos después, hacia 130 A.C., Hiparco proporcionó los valores más precisos que conoció el mundo antiguo (90 días y 1/8 para el invierno, 94 ½ para la primavera, 92 y ½ para el verano y 88 y 1/8 para el otoño).⁴ Este movimiento no uniforme recibió el nombre de *primera anomalía*. El Sol, entonces, tiene un movimiento diario que es circular y uniforme y un movimiento anual que es circular pero no uniforme. En verdad, el movimiento del Sol en el cielo es complicado, una suerte de helicoide, pero, desde la Antigüedad se lo ha descompuesto en dos movimientos simples: el diario y el anual. El movimiento observable del Sol en el cielo es la composición de estos dos movimientos simples.

Los astrónomos griegos inventaron dos modelos que salvaban las apariencias del Sol, es decir, que permitían acomodar su trayectoria en el cielo empleando órbitas circulares y movimiento uniforme respecto del centro de los círculos: *el modelo excéntrico* y *el modelo epicíclico*. En los dos modelos, la Tierra se encuentra fija en el centro del universo, centro determinado por la esfera de las estrellas fijas, que señala los límites de un universo necesariamente finito. En ambos modelos el Sol se mueve alrededor de la Tierra, ya sea con uno o dos movimientos circulares uniformes. Se atribuye a Apolonio de Pérgamo la invención de los instrumentos conceptuales que se emplean en los dos modelos, los *círculos excéntricos* y el sistema *epiciclo-deferente* de dos círculos. Por su parte, se atribuye a Hiparco de Nicea la creación de los dos modelos solares (en la terminología tradicional llamados *hipótesis*).⁵

3 Como señala Neugebauer (1975, I, p. 56), no sabemos quién descubrió la anomalía solar, que ya fue conocida por los astrónomos babilonios en el siglo V a.C.

4 Estos no son los valores actuales, ya que la duración de las estaciones ha cambiado. De hecho, cambia continuamente cada año. Por otra parte, representan la duración de las estaciones en el hemisferio norte, el único conocido por los astrónomos antiguos y medievales.

5 Aquí los llamaré indistintamente modelos o hipótesis, como he venido haciendo desde el comienzo (y como lo hacen Evans (1998) y otros historiadores y filósofos de la ciencia, que a veces los llaman también teorías).

IV. El modelo excéntrico

Aunque no se lo aclarara, en los comienzos de la astronomía griega se presuponía que cada astro tenía un solo movimiento, es decir, se movía a lo largo de un solo círculo, y que ese movimiento era uniforme respecto del centro del círculo, que coincidía con el centro de la Tierra. El movimiento diario de la esfera de las estrellas fijas constituía el mejor ejemplo de ello. Desde los tiempos de Eudoxo de Cnido, sin embargo, los astrónomos descubrieron que era imposible salvar las apariencias, esto es, acomodar los movimientos planetarios observados, mediante un único círculo centrado en la Tierra. Aceptaron, entonces, que era posible combinar dos o más movimientos circulares para cada astro, con tal de que todos fueran concéntricos entre sí y, por tanto, también respecto del centro de la Tierra. Esto originó el llamado modelo de las *esferas homocéntricas*, atribuido a Eudoxo y adoptado luego por Aristóteles, quien no lo consideró un puro modelo geométrico, sino que le adjudicó realidad física: cada círculo correspondía a la superficie de una esfera hueca hecha de éter, y las diferentes esferas centradas en la Tierra estaban anidadas de manera que no quedara vacío alguno entre ellas.

El modelo de las esferas homocéntricas funcionó, al menos de manera cualitativa, para acomodar los movimientos retrógrados de los cinco planetas. No obstante, no podía dar cuenta de la anomalía solar. En efecto, si el Sol se movía a lo largo de un solo círculo centrado en la Tierra (y, desde el punto de vista físico, era arrastrado por una esfera etérea), entonces, su movimiento circular no podía ser uniforme, ya que la observación mostraba que su velocidad angular cambiaba en el curso del año. Si se quería mantener el dogma del movimiento circular uniforme solo quedaban dos posibilidades: o bien agregar al Sol otros movimientos circulares, o bien aceptar que la trayectoria del Sol no estaba centrada en la Tierra.

El modelo excéntrico, cuya invención se atribuye a Hiparco, hacia mediados del siglo II a.C., y fue adoptado por Tolomeo, aproximadamente 300 años después, es decir, a mediados del siglo II d.C. Consta de un solo círculo excéntrico respecto del centro de la Tierra, a lo largo del cual el Sol se mueve con movimiento uniforme. Ese movimiento, sin embargo, no es uniforme respecto de la Tierra, que ocupa una posición excéntrica, sino respecto del centro del círculo. Indudablemente, ello implica una modificación de la idea original acerca de los movimientos de los astros,

que se suponían uniformes respecto del centro de la Tierra (y, por tanto, también del centro del universo). En el modelo excéntrico, el Sol se mueve alrededor de un punto que no está ocupado por ningún astro, aunque tampoco está vacío, ya que todo el espacio se supone lleno de un éter continuo. Así, puede decirse que el Sol orbita un punto material etéreo, que se encuentra fuera de la esfera terrestre.

En la siguiente figura (tomada de Evans 1998, p. 211) se muestran los detalles del modelo.

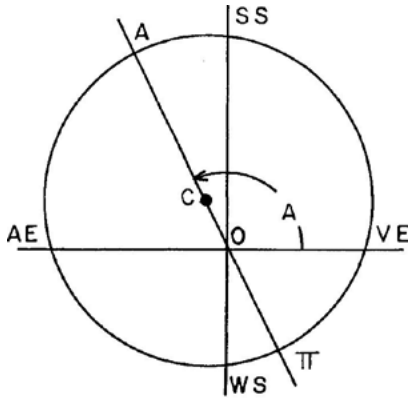


Figura 1.

El centro de la órbita del Sol es el punto C , mientras que la Tierra se encuentra en la posición excéntrica O . El punto A es el *apogeo*, el punto donde el Sol se encuentra más alejado de la Tierra, mientras que el punto Π es el *perigeo*, el punto donde el Sol se encuentra más cerca de la Tierra. La línea que une A y Π es la línea del *apside*. Los puntos SS y WS indican el solsticio de verano y de invierno, respectivamente, mientras que los puntos AE y VE indican los equinoccios de otoño y de primavera. El ángulo A es la longitud del apogeo y el segmento OC es la excentricidad de la órbita del Sol.

El modelo solar excéntrico de Hiparco tiene dos *parámetros libres*:

1. La excentricidad de la órbita, fijada en $1/24$ del diámetro del círculo.

2. La inclinación de la línea del ápside (la que une el apogeo con el perigeo de Sol), fijada en un ángulo de 65,5 grados respecto de la línea que une los dos equinoccios.

Estos parámetros *no son empíricos*, esto es, su valor no se puede determinar mediante observaciones o mediciones de distancias. El valor de estos parámetros se puede fijar a voluntad con el fin de acomodar la trayectoria del Sol en el cielo y, además, puede reajustarse tantas veces como sea necesario para conseguir una mejor concordancia entre las predicciones del modelo teórico y las observaciones. Los astrónomos griegos (o medievales) no tenían manera de medir la distancia *OC*, que determina la excentricidad de la órbita del Sol. Simplemente, fijaban el valor de esa excentricidad para que se ajustara a las observaciones del movimiento aparente del Sol a lo largo del año. De hecho, la trayectoria del Sol a través del Zodíaco era el único observable, en sentido estricto, de la astronomía antigua. Observaciones más precisas podrían llevar a reajustar el valor de los parámetros libres del modelo, por ejemplo, fijando la excentricidad de la órbita del Sol en, digamos, 10/241 del diámetro de su órbita circular, en vez de 1/24.

El modelo de Hiparco pervivió por siglos, con ocasionales ajustes menores al valor de sus parámetros libres porque era predictivamente exitoso. James Evans lo ha evaluado en los siguientes términos:

“De hecho, el modelo de Hiparco es muy bueno. Con parámetros exactamente determinados la teoría es capaz de predecir la posición del Sol con un error menor que 1 minuto, un error bien por debajo de la precisión de las mejores observaciones a ojo desnudo. La antigua teoría solar, sin embargo, no alcanzó toda su exactitud potencial a causa de los inevitables errores en la observación de los equinoccios y solsticios, de los cuales los parámetros fueron derivados”. (Evans 1998, p. 216)

El modelo excéntrico tenía, ciertamente, otras virtudes epistémicas, además de la adecuación empírica. Por ejemplo, era particularmente simple porque empleaba un solo círculo, pero su mayor virtud fue su éxito predictivo, que es la que explica su larga vigencia. No obstante, implicaba ya una desviación de la idea original del movimiento circular uniforme, ya

que el centro de la órbita del Sol no es el centro de la Tierra ni el de ningún otro astro, sino un punto etéreo.

V. El modelo epicíclico

Un modelo diferente del movimiento del Sol se obtiene combinando dos círculos y, consiguientemente, dos movimientos uniformes. Es el llamado modelo del epiciclo-deferente o, de manera más breve, el *modelo epicíclico*. La tradición también atribuye la invención de este modelo a Hiparco, aunque esto no podemos saberlo con certeza porque las obras de Hiparco sobre este tema se han perdido y solo las conocemos por testimonios que son muy posteriores, principalmente el de Tolomeo (que hizo un uso extensivo de dichas obras).

La siguiente figura (tomada de Evans 1998, p. 212) muestra el modelo epicíclico para la órbita del Sol:

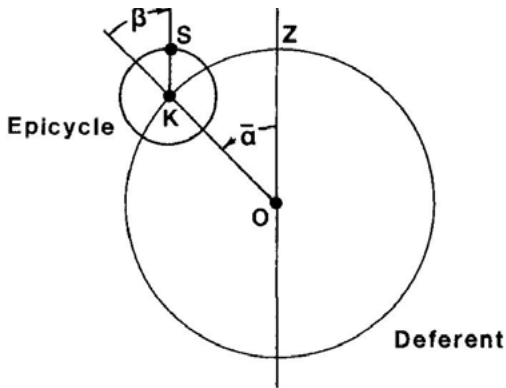


Figura 2

El Sol se encuentra en el punto S , que se mueve con velocidad constante a lo largo del círculo menor (el epiciclo) centrado en el punto K , que no está ocupado por ningún cuerpo. A su vez, el punto K se mueve con velocidad constante a lo largo del círculo mayor (el deferente) que está centrado en el punto O , ocupado por la Tierra. Los dos movimientos tienen el mismo sentido (el contrario a las agujas del reloj) y se completan en un año, por lo que los ángulos α y β permanecen siempre iguales. El

modelo se conoce también como modelo del epiciclo y el deferente *con-
céntricos*, ya que no contiene círculos excéntricos. Tanto el movimiento
del epiciclo como el del deferente son uniformes respecto del centro de
cada círculo. La diferencia es que el centro del deferente está ocupado por
la Tierra (más precisamente, por el centro de la Tierra), mientras que el
centro del epiciclo es un punto “vacío”, esto es, no ocupado por ningún
astro, sino solo por el éter que se suponía que llenaba los espacios interes-
telares. El círculo deferente, además, es concéntrico respecto de la esfera
de las estrellas fijas, o del universo, como solía decirse en la Antigüedad.

El modelo solar epicíclico tiene seis parámetros libres:

1. El radio del círculo deferente.
2. El radio del epiciclo.
3. La rapidez de la rotación del deferente.
4. El sentido de la rotación del deferente.
5. La rapidez de la rotación del epiciclo.
6. El sentido de la rotación del epiciclo.

Los seis parámetros pueden reducirse a cuatro si la velocidad se en-
tiende como una magnitud vectorial. En ese caso, los parámetros 3 y 4 se
reducen a uno, la velocidad del deferente, mientras que los parámetros 5
y 6 también se reducen a uno, la velocidad del epiciclo. Con todo, en mi
opinión, conviene mantenerlos separados porque la distinción entre la
velocidad (un vector) y la rapidez (un escalar) no se encuentra claramente
especificada en la física antigua. El epiciclo y el deferente son entidades
teóricas, es decir, no observables. Los seis parámetros, por consiguiente,
no son empíricos. Sus valores también pueden fijarse y reajustarse para
conseguir la mejor adecuación empírica del modelo a la trayectoria obser-
vada del Sol en su recorrido anual por el Zodíaco.

VI. La equivalencia geométrica de los dos modelos

El modelo solar epicíclico resulta geoméricamente equivalente al modelo excéntrico, en el sentido preciso de que ambos permiten generar la misma órbita para el Sol, si se ajustan adecuadamente los valores de sus respectivos parámetros libres. En el capítulo 3 del libro III del *Almagesto*, Tolomeo demuestra la equivalencia de las dos hipótesis sobre el movimiento del Sol. No es necesario, para los fines de este trabajo, reproducir aquí la prueba de Tolomeo, quien atribuye a Apolonio la demostración de la equivalencia geométrica de las dos hipótesis.⁶ Se puede apreciar claramente que los dos modelos producen la misma trayectoria en la siguiente figura (tomada de Evans 1998, p. 213):

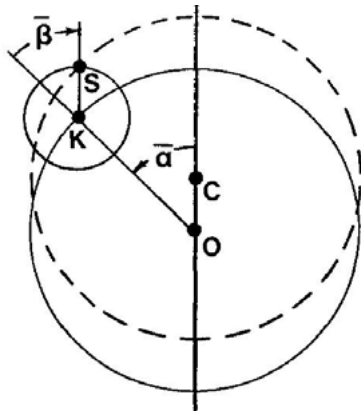


Figura 3

La órbita generada por los dos modelos se muestra en el círculo punteado, mientras que el deferente y el epiciclo se muestran en líneas sólidas. Los dos modelos producen la misma trayectoria si se cumplen las dos siguientes condiciones: a) el radio KS del epiciclo es igual a la excentricidad OC del círculo excéntrico, y b) las velocidades del epiciclo y el deferente se fijan de tal manera que los ángulos α y β siempre permanecen iguales. Esto

⁶ Una exposición detallada de esta prueba se encuentra en Pedersen (2010, capítulo 5). Pedersen, aparentemente, ignoraba que esa prueba ya la había ofrecido Teón de Esmirna.

puede hacerse a voluntad ya que tanto el radio del epiciclo, la excentricidad del círculo excéntrico y las velocidades del epiciclo y el deferente son, como ya se ha visto, parámetros libres en cada uno de los modelos. Por consiguiente, cualesquiera sean los valores de los parámetros del modelo excéntrico, siempre es posible construir un modelo epicíclico geométricamente equivalente a este, fijando *ad hoc* los parámetros libres del radio del epiciclo y las velocidades del epiciclo y el deferente. A la inversa, dado un modelo epicíclico, siempre es posible construir un modelo excéntrico equivalente fijando *ad hoc* el valor de la excentricidad de la órbita.

VII. El problema de la elección entre hipótesis equivalentes

La equivalencia geométrica de los modelos solares excéntrico y epicíclico implica que ambos también son (*a fortiori*) empíricamente equivalentes. Esto es, en términos más generales, toda trayectoria planetaria que pueda ser acomodada mediante uno de los modelos también puede ser acomodada mediante el otro y, además, toda predicción que pueda ser deducida de uno de ellos también puede deducirse del otro. Para un observador que se encuentra fijo a la superficie de la Tierra, como todo astrónomo hasta el siglo XX, no hay manera de discriminar cuál de las dos hipótesis describe verdaderamente los movimientos del Sol en el cielo. Lo único que el observador puede determinar mediante mediciones es la trayectoria aparente del Sol o, más generalmente, los movimientos aparentes de los planetas. Los epiciclos y las excéntricas son, en el lenguaje actual, entidades teóricas, es decir, son inobservables. Su existencia se postula para acomodar o salvar las apariencias, pero no puede ser verificada por ninguna observación.

La equivalencia geométrica entre los modelos excéntrico y epicíclico del movimiento del Sol seguramente ya fue conocida por Hiparco. Teón de Esmirna, que era una generación anterior a Tolomeo y murió hacia 135 d.C., es decir, antes de este escribiera el *Almagesto*, expuso con detalle ambas hipótesis y probó que eran equivalentes, o, en sus términos, que “cada una era una consecuencia de la otra” (*Expositio*, III, 34, p. 121). Señaló, además, que la prueba había sido realizada antes por su contemporáneo Adrasto de Alejandría, pero que Hiparco ya sabía que las apariencias del movimiento solar podían ser salvadas por ambas hipótesis (*Expositio*, III, 26, pp. 107-108).

Hiparco, según el testimonio de Teón, había preferido el modelo epicíclico porque mantiene el movimiento circular uniforme alrededor del centro del círculo deferente, ocupado por la Tierra (*Expositio*, III, 34, pp. 121-122). Tolomeo, por su parte, prefirió la hipótesis de la excéntrica, según sus propias palabras, “porque es más simple y se realiza por medio de un movimiento en vez de dos” (*Almagesto* III, 4, p. 153). Así pues, la simplicidad resulta un criterio de elección cuando hay en juego dos o más hipótesis que salvan igualmente bien las apariencias. Tolomeo lo afirma explícitamente en estos términos: “en general, consideramos un buen principio explicar los fenómenos por medio de la hipótesis más simple posible, en tanto no haya nada en las observaciones que proporcione una objeción a tal procedimiento” (*Almagesto* III, 1, p. 136).

Según Evans, tanto la elección de Hiparco como la de Ptolomeo se basaron en presupuestos físicos y cosmológicos, pero no en un criterio de simplicidad. Al respecto, sostuvo que ambas elecciones:

[...] “Reflejan la creencia de los astrónomos griegos en que sus modelos planetarios eran descripciones físicamente reales del universo, no meros dispositivos matemáticos para salvar los fenómenos. La elección de Hiparco estuvo claramente motivada por principios físicos o cosmológicos. Pero esto también es verdadero respecto de Ptolomeo, porque el círculo excéntrico no es matemáticamente más simple que el modelo de concéntrica más epiciclo”. (Evans 2008, p. 111)

El modelo excéntrico y el epicíclico, llamémoslos los *modelos simples*, se pueden combinar para formar un *modelo compuesto* que tiene a la vez epiciclo y excéntrica. La elección de valores para los parámetros libres, además, permite generar una infinitud de modelos empíricamente equivalentes. Consideremos el caso de la excentricidad de la órbita. Los modelos simples son equivalentes si la excentricidad de la órbita es igual al radio del epiciclo, esto es, si $E_o = R_e$. Los modelos compuestos, por su parte, son geoméricamente equivalentes si se cumple la siguiente condición: $E_o' + R_e' = E_o = R_e$ (donde E_o' y R_e' son, respectivamente, la excentricidad de la órbita y el radio del epiciclo del modelo compuesto. El modelo excéntrico se puede describir como un modelo compuesto de excéntrica y epiciclo, donde $E_o' = 1$ y $R_e' = 0$. Conversamente, el modelo epicíclico se puede describir como $E_o' = 0$ y $R_e' = 1$. Así, cualquier modelo compuesto donde se

cumpla que $Eo' + Re' = 1$ resulta geoméricamente equivalente al modelo epicíclico simple y al excéntrico simple. Por ejemplo, $M_1 = (Eo' = 1/2, Re' = 1/2)$; $M_2 = (Eo' = 1/4, Re' = 3/4)$; etc. Todos estos modelos generan la misma trayectoria para cualquier planeta.

Empleando los métodos de la astronomía Ptolemaica, es posible construir modelos equivalentes para el movimiento de otros planetas, como Marte, Júpiter y Saturno. Por ejemplo, un modelo de epiciclo sobre excéntrica resulta equivalente a un modelo de excéntrica sobre excéntrica. También es posible adoptar círculos excéntricos fijos o móviles, con lo cual un modelo de epiciclo para los planetas superiores resulta equivalente a un modelo que tiene un círculo excéntrico móvil.⁷ Los recursos de la astronomía ptolemaica son suficientemente plásticos como para construir modelos geoméricamente equivalentes para todos los planetas.

En principio, al menos, el criterio de simplicidad permitiría descartar los modelos compuestos en favor de los simples. Sin embargo, como es bien sabido, hay muchos sentidos diferentes en los cuales puede decirse que una teoría es más simple que otra, por ejemplo, puede ser más simple *matemáticamente* porque usa ecuaciones de menor complejidad (digamos, de segundo grado contra ecuaciones de cuarto grado); o bien puede ser más simple *ontológicamente*, porque postula, o presupone, menos tipos de entidades fundamentales; o bien puede ser más simple *nomológicamente*, porque introduce menos leyes fundamentales. Otro aspecto en que una hipótesis (teoría o modelo) puede ser más simple que otra es relativamente a su facilidad de uso o aplicación, que en muchos casos, se reduce simplemente a la conveniencia para el cálculo. En este respecto, no hay ninguna diferencia apreciable entre los modelos excéntrico y epicíclico del Sol. Cualquier cálculo de las posiciones del Sol empleando uno de los modelos puede hacerse de la misma manera empleando el otro. La simplicidad a la que se refiere Tolomeo no puede, entonces, ser puramente computacional. Con todo, no es claro en qué sentido el modelo excéntrico es más simple que el epicíclico. De acuerdo con Evans, se trata de la simplicidad de la física subyacente a cada modelo:

Un cálculo de las posiciones del Sol sería de similar complejidad en los dos modelos. En verdad, los cálculos serían virtualmente idénticos, línea por línea. Tolomeo claramente estaba pensando en la simplicidad física. Pre-

⁷ Véase la demostración de esta equivalencia en Pecker (2001), pp. 97-101.

firió el modelo excéntrico porque parecía físicamente más simple y, por consiguiente, era más probable que fuera verdadero. (Evans, 1998, p. 217)

En muchos casos, no es posible determinar cuál de dos modelos o teorías es el más simple, dado que no existe ninguna métrica, ni siquiera una escala comparativa, para la simplicidad. Aunque en algunos casos sea posible establecer la mayor simplicidad de un modelo, no se sigue de allí que dicho modelo sea verdadero, ni siquiera verosímil. Tampoco hay ninguna conexión evidente entre simplicidad y probabilidad. Así pues, del hecho de que el modelo excéntrico sea más simple que el epicíclico, en algún sentido de “simplicidad”, no es lícito concluir que dicho modelo proporciona una descripción verdadera, o siquiera verosímil del cosmos.

La equivalencia entre los modelos epicíclico y excéntrico del movimiento del Sol suscitó perplejidades entre los astrónomos y filósofos antiguos y medievales. Motivó una extensa discusión sobre la cuestión de si las excéntricas y epiciclos eran reales o no, y llevó a dudar acerca de si la astronomía era una auténtica ciencia capaz de alcanzar la verdad por detrás de las apariencias.⁸ La preocupación por la realidad de los epiciclos y excéntricas, tan frecuente en la escolástica de los siglos XIII y XIV, es un síntoma de una actitud realista hacia la ciencia en general. La equivalencia entre los modelos solares se discutió una y otra vez, tanto en la tradición árabe como latina, una discusión que sólo puede entenderse sobre la base de una posición realista ya que, de otro modo, la proliferación de modelos equivalentes no sería considerada como un problema. El verdadero problema era que estos modelos no podían considerarse más que como *hipótesis*, cuya verdad no podía conocerse, mientras que el auténtico conocimiento, como ya había argumentado Aristóteles en los *Analíticos*, no podía ser hipotético sino categórico. El conocimiento genuino es, por definición verdadero, mientras que la verdad de las hipótesis que meramente salvan las apariencias no puede conocerse.

El célebre prefacio anónimo de Osiander al *De revolutionibus* de Copérnico expresa claramente la actitud antirrealista acerca de la astronomía.

8 Este es un extenso proceso histórico que no puede tratarse aquí. Para un esquema general, véase Rosen (1984), capítulo 3, y las fuentes históricas allí citadas. Sobre las discusiones medievales acerca de las excéntricas y epiciclos, véase Grant (1994), capítulo 13.

Pues es propio de los astrónomos componer la historia de los movimientos celestes mediante una observación cuidadosa y diligente. Por tanto, deben concebir e inventar las causas o hipótesis de esos movimientos. Puesto que por ninguna razón pueden alcanzar las verdaderas causas, deben adoptar aquellos supuestos que permitan calcular correctamente esos movimientos a partir de los principios de la geometría, tanto para el futuro como para el pasado. [...] Y si algunas causas se imaginan, como muchas se imaginan, no se inventan para convencer a nadie, sino más bien para proporcionar un cálculo correcto. Sin embargo, como para uno y el mismo movimiento se ofrecen diferentes hipótesis (como la excentricidad y el epiciclo en el movimiento del Sol), el astrónomo debe elegir aquella que sea más fácil de comprender. El filósofo más bien exigirá la semejanza a la verdad, pero ninguno de ellos comprenderá o afirmará nada cierto, a menos que le sea divinamente revelado.” (*De revolutionibus*, pp. 403-404)

En este pasaje, tantas veces citado, Osiander se mostró como un continuador coherente de toda la tradición escolástica para la cual la astronomía no era una ciencia capaz de alcanzar una descripción verdadera de los cielos y, por consiguiente, debía limitarse a razonar *ex hypothesi* o *ex suppositione*, sin poder probar que sus hipótesis sean verdaderas. Para apoyar su posición, apeló, una vez más, a la equivalencia de los dos modelos del Sol, que tanto había consternado a toda la tradición astronómica.

El sistema copernicano, por su parte, no resolvió la dificultad. En efecto, para determinar la trayectoria aparente del Sol, la cuestión del movimiento o la inmovilidad de la Tierra resulta irrelevante: solo importa el movimiento relativo entre ambos astros. Así, el movimiento relativo del Sol respecto de la Tierra puede explicarse en el contexto de la astronomía copernicana mediante cualquiera de los dos modelos tolemaicos, sin que el hecho de que el Sol se considere fijo y la Tierra en movimiento introduzca ninguna consecuencia empíricamente relevante. Copérnico abordó esta cuestión en el capítulo 15 del libro tercero del *De revolutionibus*. Allí reconoció que la “irregularidad aparente del movimiento solar” se puede explicar igualmente bien mediante un modelo donde la órbita de la Tierra alrededor del Sol es excéntrica o mediante uno donde la Tierra se mueve en un epiciclo alrededor de un “círculo homocéntrico”. Luego de exponer el modelo excéntrico y el epicíclico, probó la equivalencia geométrica de ambos modelos empleando una figura prácticamente idéntica a la del *Almagesto* (*De revolutionibus* III, 3, p. 149). De allí concluyó, como Hiparco y

Tolomeo, que “[...] siempre se produce la misma irregularidad aparente, sea por el epiciclo en el homocéntrico, sea por el círculo excéntrico igual al homocéntrico, y que nada difieren entre sí, mientras la distancia entre los centros sea igual al radio del epiciclo” (*De revolutionibus* III, 15, p. 156). Finalmente, dejó el problema sin resolver, diciendo solamente que “no es fácil discernir cuál de ellos existe en el cielo” (*Utrum igitur eorum existat in caelo, non est facile discernere*) (*De revolutionibus* III, 15, p. 156).⁹

VIII. Conclusión

El problema de la equivalencia de los modelos excéntrico y epicíclico del movimiento del Sol fue conocido y discutido en toda la tradición astronómica antigua, medieval y moderna. Nunca fue resuelto porque no resultaba evidente cuál de los dos modelos era el más simple y en qué respecto. Como hemos visto, no tienen diferencias prácticas en relación con el cálculo matemático, por lo que resultan instrumentos igualmente útiles para predecir los movimientos del Sol. Muy frecuentemente, la dificultad de elegir uno de los dos modelos suscitó dudas acerca de la realidad de los epiciclos y excéntricas. Rosen (1984, p. 132) caracteriza la situación de la astronomía precopernicana diciendo que se encontraba en un “estado inestable” y que “no era solo la discrepancia entre la predicción y la observación lo que preocupaba a los astrónomos”, sino que “también estaban desconcertados por el estatus cosmológico u ontológico de las excéntricas y epiciclos”.

Para cualquier enfoque realista de la astronomía, o de cualquier ciencia, la subdeterminación permanente de los modelos o teorías empíricamente equivalentes constituye una seria dificultad. Difícilmente se la pueda superar apelando al criterio de simplicidad. Aun cuando pudiera determinarse que un modelo es más simple que otro, en algún respecto, nada se sigue acerca de la verosimilitud de dicho modelo. Mucho menos, acerca de su verdad, ya que nada podría garantizar que en el futuro no se invente un modelo más simple, y así sucesivamente. El criterio de simplicidad siempre ha sido reivindicado como medio para la elección de teorías por las posiciones antirrealistas, pero no es fácilmente conciliable con una

⁹ Swerdlow y Neugebauer (1984), p. 150, señalan que Copérnico prefirió el modelo excéntrico, pero solo a los fines del cálculo, es decir, por razones puramente prácticas.

actitud realista. Sin duda, tiene valor heurístico, pero su valor epistémico y su alcance ontológico son sumamente dudosos. Solo apelando a supuestos de carácter metafísico, como la idea de que “la naturaleza no hace nada en vano” (una idea genuinamente aristotélica) es posible extraer de este criterio conclusiones sobre el mundo realo la verosimilitud de las teorías que pretenden describirlo. ¿Pero cómo podríamos saber que la naturaleza no hace nada en vano?¹⁰

Referencias

- Aristóteles (1965). *De caelo*. Edición y traducción de P. Moraux. Paris: Les Belles Lettres.
- Copérnico, N. (1543). *De revolutionibus orbium coelestium*. Translated and Commented by E. Rosen: *Nicholas Copernicus on the Revolutions*. London: The Macmillan Press.
- Dreyer, J. L. (1906) *History of the Planetary Systems from Thales to Kepler*. Cambridge:Cambridge University Press.
- Duhem, P. (1908). *Sauver les apparences. Sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée*. Paris: Hermann.
- Evans, J. (1998). *The History and Practice of Ancient Astronomy*. Oxford: Oxford University Press.
- Evans, J. (2008). “Ptolemy”. In Hetherington, N. (ed.) *Cosmology: Historical, Literary, Religious, and Scientific Perspectives* (pp. 105-145). London: Routledge.

¹⁰ Ni siquiera está claro el sentido preciso de esta expresión. Para una historia general de las diferentes maneras de entender la simplicidad véase Sober (2015). Una interpretación realista del criterio de simplicidad se encuentra en Schindler (2018). La cuestión de si la simplicidad es un criterio puramente pragmático, como sostienen todos los antirrealistas, o si tiene carácter epistémico, como sostiene Schindler, y algunos realistas, está fuera del alcance de este trabajo.

- Goldstein, B. (1967). "The Arabic Version of Ptolemy's Planetary Hypotheses." *Transactions of the American Philosophical Society, New Series*, 57 (4): pp. 3-55.
- Grant, E. (1994). *Planets, Stars, and Orbs: The Medieval Cosmos, 1200-1687*. New York: Cambridge University Press.
- Neugebauer, O. (1975). *A History of Ancient Mathematical Astronomy*. Three volumes. New York: Springer.
- Pecker, J-C. (2001). *Understanding the Heavens: Thirty Centuries of Astronomical Ideas from Ancient Thinking to Modern Cosmology*. Edited by S. Kaufman. Berlin: Springer,
- Pedersen, O. (2010). *A Survey of the Almagest. With Annotation and New Commentary by Alexander Jones*. Second Edition. New York: Springer. [First Edition: 1975].
- Ptolomeo, C. (1984). *Ptolemy's Almagest*. Edited and Translated by G. J. Toomer. London: Duckworth.
- Rosen, S. (1984). *Copernicus and the Scientific Revolution*. Malabar, FL.: Krieger.
- Sober, E. (2015). *Ockham's Razor: A User's Manual*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Schindler, S. (2018). *Theoretical Virtues in Science: Uncovering Reality through Theory*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Swerdlow, N. & Neugebauer, O. (1984). *Mathematical Astronomy in Copernicus's De Revolutionibus*. New York: Springer.
- Teón de Esmirna (1979) *Expositio rerum mathematicarum ad legendum Platonemutilium*.

Traducción inglesa de R. y D. Lawlor: *Mathematics Useful for Understanding Plato*. San Diego: Wizards Bookshelf.

