

6986 t/m 6990

1992

HISTORIA DE LA GEOMETRÍA GRIEGA

ACTAS AÑO I

ISBN 10: 84-88542-00-3. Canarias, diciembre de 1992.

6986

Prats, S.T.

LA GEOMETRÍA PITAGÓRICA p 78-102

6987

Menéndez, A.R.

PLATÓN: MATEMÁTICA Y DIALÉCTICA

p 134-168

6988

Pérez, J.P.L.

PLATÓN Y EL TIMEO

170-198

6989

Sedeño, E.P.

EUDOXO Y LOS ORÍGENES DE LA ASTRONOMÍA GRIEGA

p 424-466

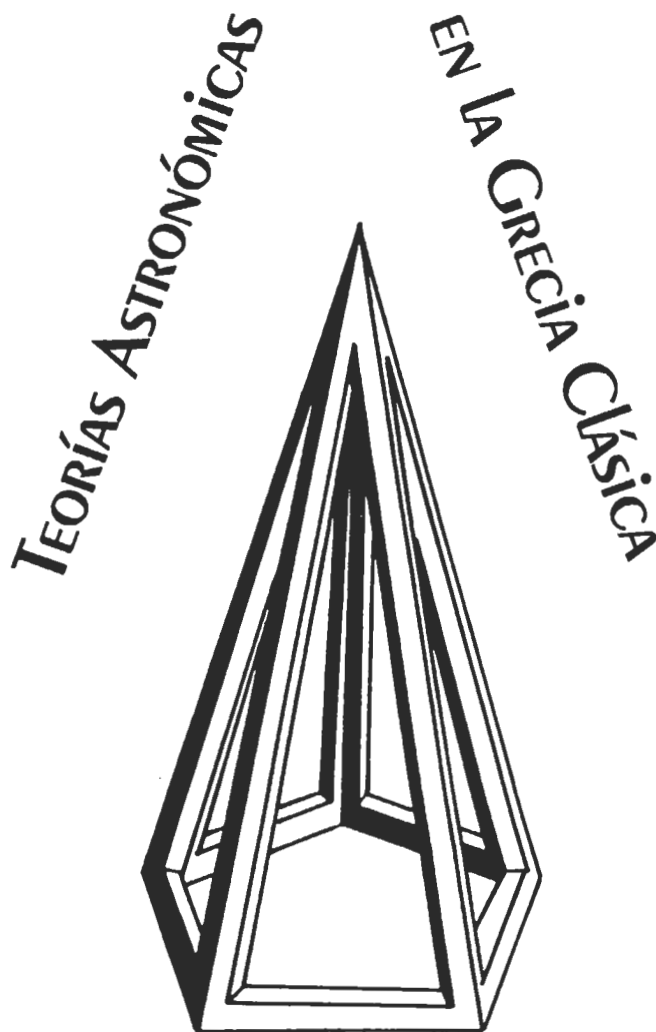
6990

Martín, A.G.

TEORÍAS ASTRONÓMICAS EN LA GRECIA CLÁSICA

p 458-480

1992



Angeles Gutiérrez Martín.
Prof. de Filosofía.
I.B. Villalba Hervás.

Miguelina Quintero Barrera.
Licenciada en Filosofía.

Introducción

*L*a búsqueda de la racionalidad inherente al espíritu griego y plasmada en el conjunto de las manifestaciones de su cultura también dirige su mirada a los fenómenos celestes. Los diversos autores nos mostrarán unas interpretaciones cuyo objetivo, en principio, será no tanto lo práctico o lo verdadero cuanto "salvar los fenómenos" observados desde el marco conceptual en el que los griegos se hallan inmersos. Estos presupuestos son:

a) El sentido común y la percepción ordinaria, aun cuando puedan tener errores, son una base segura de conocimiento.

b) La noción de los "lugares naturales" que da pie a la división del universo en mundos supra y sublunar, en cada uno de los cuales rige un movimiento característico.



c) El "principio de circularidad"¹, según el cual el movimiento por excelencia de los cuerpos celestes es el circular uniforme.

d) La esfericidad de los cuerpos celestes, que además están compuestos por éter.

e) La creencia generalizada, salvo excepciones, en la inmovilidad de la Tierra que ocupa el centro del universo porque este es su lugar natural.

Estas creencias están apoyadas en el sentido común y en los datos empíricos que muestran el desplazamiento de los cuerpos celestes.

Con estos presupuestos de partida los griegos tienen que dar cuenta básicamente de dos fenómenos:

1) Cada cuerpo celeste circula en torno a la Tierra de Este a Oeste en veinticuatro horas y

2) algunos cuerpos presentan movimientos anómalos, esto es, parece que se detienen en algunos momentos e incluso retroceden. En otras palabras, no todos los cuerpos giran con movimiento circular uniforme.

La ardua tarea de astrónomos y geómetras griegos por compaginar las creencias de partida con los fenómenos observados se traduce en las distintas teorías explicativas que expondremos a continuación.

[1] Así denominado por Hanson (1978: 137)



1. Sistemas Astronómicos

El primer modelo de teoría que intenta dar cuenta de los fenómenos observados es el de Eudoxo (409 -356 a.C). Este autor puede ser considerado como el representante de la transición de la astronomía especulativa a la científica. Recordemos que Eudoxo considera una Tierra central e inmóvil; una esfera para las estrellas fijas con movimiento de rotación diario y los planetas, que se mueven en esferas alrededor de la Tierra.

Aunque la teoría ofrece una explicación aceptable de algunas retrogradaciones y del movimiento diario de los cuerpos celestes presenta una serie de desventajas:

- No explica los movimientos de los planetas en su conjunto sino que los trata de uno en uno, de tal forma que los cálculos relativos a un planeta no dependen ni se conectan con los relativos a cualquier otro.
- Tampoco da cuenta del cambio de brillo de los planetas, fenómeno que ya había sido observado.
- La observación demuestra que los planetas invierten sus órbitas de forma inconstante, con lo que este esquema también resulta insuficiente porque no explica los movimientos anómalos en el nivel de la predicción².

[2] Quizá convenga recordar que Calipo posteriormente introduce 7 esferas más para intentar explicar los cambios de brillo de los planetas. Por su parte, Aristóteles considera las esferas como cuerpos materiales y, por este motivo, ha de introducir



Sin embargo, y a pesar de todo lo dicho, el esquema de Eudoxo fue importante en la medida en que ofreció una explicación inteligible de ciertas anomalías y, en este sentido, supuso el primer paso a una teoría astronómica más completa.

1.1. La heterodoxia

En un momento en que las esferas homocéntricas se tornan insuficientes para "salvar las apariencias", surgen las figuras de Heráclides de Ponto (s.IV a.C) y Aristarco de Samos (III a.C) que proponen sistemas astronómicos no aceptados por la mentalidad de la época en tanto se apartan de las concepciones vigentes. Hay que decir que a la hora de abordar a estos autores la cuestión se vuelve difícil ya que o no se conservan escritos suyos o se conservan muy pocos, y las referencias de autores posteriores son escasas³.

1.1.1. Heráclides de Ponto: un caso ecléctico

La importancia de Heráclides se debe al hecho de que elabora un sistema que, sin ir en contra de la posición central de la Tierra en el Universo, mantiene el movimiento de los planetas alrededor del Sol; en este sentido, podría decirse que dicho sistema representa un camino intermedio entre la ortodoxia asumida y la heterodoxia franca de Aristarco.

Heráclides se da cuenta de que Venus y Mercurio nunca son observados a gran distancia del Sol y de ahí sugiere la idea de que tales planetas no se mueven alrededor de la Tierra sino de dicho astro. Por otra parte señala que la apariencia de una revolución cotidiana de los cielos bien podría explicarse también suponiendo

nuevas esferas compensatorias cuya finalidad será la de contrarrestar los efectos de la aceleración de las primeras.

[3] Los autores que hablan de Heráclides serán Simplicio, Aeliüs y Calcidio; de Aristarco lo hacen Arquímedes, Plutarco y otros doxógrafos, como Aeliüs, Slobaeus y Galeno.



un movimiento de rotación a la Tierra. Con estas premisas, Heráclides propone su sistema en el que la Tierra ocupa el centro del Universo con movimiento de rotación y el Sol gira alrededor de la misma, pero los planetas no lo hacen alrededor de aquélla sino de éste. Este esquema, en líneas generales, será el que siglos más tarde adoptará Tycho Brahe (1546-1601), aunque en su modelo serán todos los planetas los que giren en torno al Sol, mientras que éste y la Luna lo hacen con centro en la Tierra.

Existen discrepancias a la hora de entender si Heráclides sostiene que todos los planetas giran alrededor del Sol o si sólo lo hacen Mercurio y Venus. Parece más aceptable suponer, teniendo en cuenta las citas que nos han llegado por vía de los comentaristas, que se refiere a los planetas interiores y que, o bien no dijo nada con respecto a los demás, o bien señalaría que éstos giran alrededor de la Tierra. Quedaría, pues, un sistema como el de la figura 1:

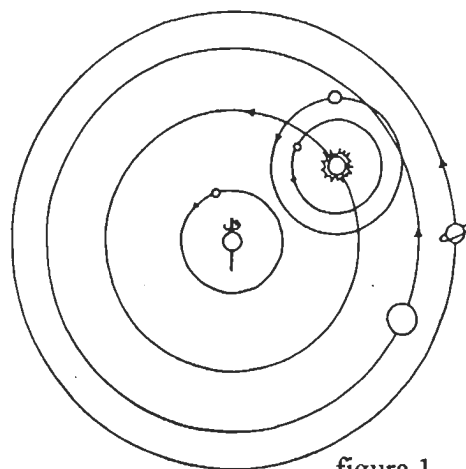


figura 1

Otra discrepancia se establece cuando se habla del movimiento de la Tierra para el astrónomo de Ponto. Todos los autores coinciden en admitir que Heráclides dota a la Tierra de movimiento de rotación pero se muestran en desacuerdo en lo que respecta al de traslación. Los que afirman este último movimiento en Heráclides lo hacen en la medida en que este autor tendría que explicar la distinta duración de los días en las diferentes estaciones. Martin, por ejemplo, señala que Heráclides, en este caso, sólo hizo una conjetura. Schiaparelli sostiene la idea de la traslación en Heráclides y lo llega a considerar como el precursor de Copérnico. Para Heath y Dreyer sólo cabe hablar de un movimiento de rotación ya que el de traslación no aparece explicitado por los comentaristas y no podría entenderse esta conspiración de silencio.



1.1.2. Aristarco de Samos: una propuesta a destiempo

Aristarco no sólo destaca como astrónomo sino también como geómetra. El único libro suyo que se conserva es *Sobre las dimensiones y distancias del Sol y la Luna* donde nos muestra el primer intento serio por determinar estas cuestiones. En lo que respecta a su hipótesis astronómica, no se conservan escritos suyos sino sólo referencias posteriores y en número escaso. Con todo, parece seguro que Aristarco propuso un sistema heliocéntrico en el que la Tierra tendría tanto movimiento de rotación como de traslación. Puede resumirse el sistema de Aristarco como sigue: el Universo es esférico; su centro está ocupado por el Sol alrededor del cual giran la Tierra y el resto de los planetas con movimiento circular uniforme; la esfera de las estrellas fijas está inmóvil⁴.

Hay que decir que Aristarco no es el primero en dotar a la Tierra de movimiento de traslación ni, como hemos visto en Heráclides, de rotación. Un precedente en el primer caso lo tenemos en Filolao el pitagórico que hace girar la Tierra alrededor de un fuego central. Ahora bien, aunque sea Filolao el primero en hablar del movimiento de traslación, lo hace no bajo un punto de vista astronómico sino por razones religiosas y místicas.

Algunos autores como Dreyer sostienen que Aristarco probablemente conocía el sistema de excéntricas móviles y que, en principio, pudo guiarse por él. Pero su mente matemática chocó con el siguiente hecho: si daba un paso más y ponía al Sol en el centro, los fenómenos se salvaban de forma más sencilla. De esta forma, Aristarco optó por la explicación más simple aun cuando fuera en contra del sentido común. Sin embargo esto no lo hizo por mera 'inspiración divina' sino que estaba apoyado por las mediciones efectuadas en su libro; según estas mediciones el Sol es unas veinte veces mayor que la Tierra y, por consiguiente, sería

[4] Aristarco no explicitó si consideraba su teoría como verdadera físicamente; según los comentaristas, él sólo supuso el movimiento de la Tierra mientras que Seleuco (babilonio del siglo II a.C) lo aceptó como verdad.



más lógico suponer que sea el Sol el que ocupe el centro y no la Tierra que es mucho más pequeña. ¿Es este argumento convincente? No para un griego, a quien el sentido común le indicaría justo lo contrario: sería chocante suponer que otro cuerpo ocupa el centro, salvo uno tan pesado y estable como la Tierra.

La hipótesis de Aristarco no pareció atraer la atención de sus coetáneos; prueba de ello es que sólo es aludida en tres fragmentos. Pudo también ocurrir que el propio Aristarco se mostrara cauto a la hora de explicitarla; no olvidemos que Cleantes (jefe de la Escuela estoica en Atenas) lo quiso procesar por impiedad. Sea como fuere, la idea de un movimiento terrestre chocaba con los presupuestos griegos por razones como:

- A los ojos de un observador que no tenga una teoría previa la observación muestra que son los planetas los que se mueven.

- Si la tierra se moviese habría de desarrollar una velocidad tan elevada que, a fortiori, tendría que notarse.

Pero no sólo hubo argumentos de tipo físico para rechazar el movimiento terrestre sino que también se adujo uno astronómico: el del paralaje.

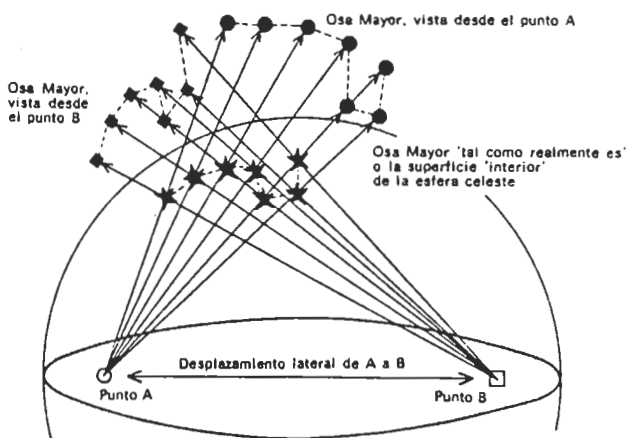


figura 2

Este argumento consiste en lo siguiente: si la Tierra se mueve entonces una constelación de estrellas se tendría que observar en distintas configuraciones, dependiendo del movimiento de aquélla. La observación, sin embargo, muestra que esto no ocurre, es decir, las estrellas se ven siempre en la misma configuración. De ahí que, al no darse ese paralaje esperado, se concluyera que la Tierra no se mueve y además ocupa el centro.



La forma en que se intentó escapar al argumento del paralaje fue exponiendo que si el universo es infinitamente grande (no sólo en relación al tamaño del Sol sino también al de la órbita de la Tierra) las distancias tendrían que ser tan grandes que el paralaje no podría percibirse. Pero pronto llegaron los contra-argumentos: las estrellas no pueden estar infinitamente lejos porque dan la vuelta alrededor de la Tierra en veinticuatro horas, lo cual supone un tiempo finito; la distancia, por tanto, habría de ser finita también. No puede entenderse un tiempo finito y un espacio infinito.

En definitiva, la teoría del geómetra de Samos no convenció y quedó sumida en el olvido. Podemos hacer entonces un breve esbozo en las siguientes líneas de por qué tal hipótesis heliocéntrica fracasó:

a) Porque iba contra el sentido común; así, la propuesta era demasiado opuesta a las visiones de platónicos, aristotélicos y estoicos.

b) Por el desarrollo posterior de la teoría de epiciclos/deferentes que, manteniendo los presupuestos de partida, explicaba los movimientos planetarios.

c) Por el rápido ascenso de la astronomía práctica, que ocasionó la acumulación de nuevos datos observacionales.

Aristarco sólo intentó salvar los fenómenos conocidos pero a medida que se apreciaban nuevas desigualdades su sistema se mostró insuficiente para explicarlas.

[5] Este paralaje estelar no pudo observarse hasta 1838 por Friedrich Wilhelm Bessel.



1.2. La ortodoxia

Tras la inoperancia del sistema de esferas homocéntricas y el rechazo de la teoría de Aristarco, Apolonio (mitad del siglo III a.C) e Hiparco (II a.C) optarán por desarrollar esquemas de explicación astronómicos que salvan los fenómenos y mantienen los presupuestos de partida de la concepción griega.

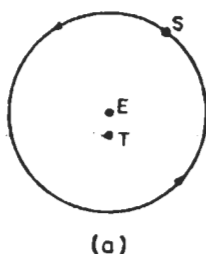
Estos autores no van a insistir en la verdad física de sus sistemas sino que los adoptarán por ser teorías geométricas que pueden explicar, y a veces predecir, los fenómenos observados.

1.2.1. El sistema de excéntricas móviles

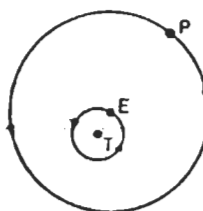
El origen de la teoría no se puede determinar con exactitud pero se sabe que Apolonio se sirvió de ella en sus estudios.

La teoría de las excéntricas considera que las órbitas de los planetas alrededor de la Tierra no tienen su centro exactamente en ésta sino desplazado en algún punto de la línea Tierra-Sol. De esta forma queda una órbita circular con la Tierra desplazada de su centro y un observador situado en ella verá el planeta unas veces más cerca y otras más lejos; al punto más cercano se le denomina **perigeo** y al más alejado **apogeo**. Con este modelo se pueden explicar los cambios de brillo y velocidad aparente de los planetas pero no así las retrogradaciones. Para ello se hizo necesario recurrir a las

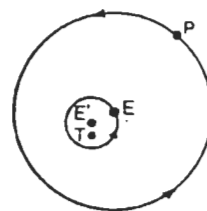
excéntricas móviles que consisten en hacer girar el planeta alrededor de un punto que gira a su vez describiendo otro círculo.



(a)



(b)

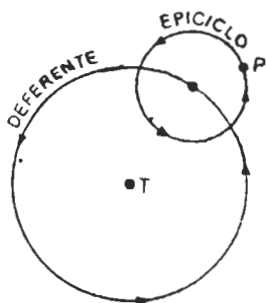


(c)

(a) Excéntrica; (b) excéntrica sobre deferente; (c) excéntrica sobre excéntrica.



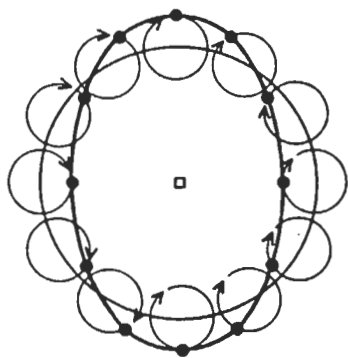
No obstante, el esquema de excéntricas móviles no explica de forma satisfactoria las retrogradaciones de los planetas interiores (Mercurio y Venus).



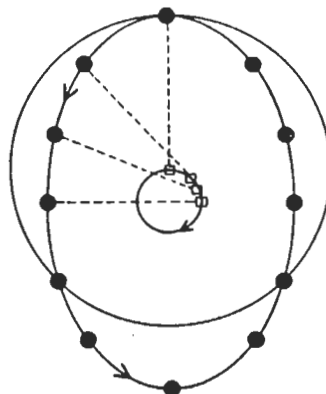
1.2.2. El sistema de epiciclo/deferente

Este sistema representa la contrapartida al de excéntricas móviles y termina por alzarse como el más adecuado por razones que aduciremos más adelante. Con él, grosso modo, se explica la trayectoria de un planeta de la siguiente forma: la tierra ocupa el centro de un círculo que se denomina **deferente** y sobre este deferente gira el centro de otro círculo llamado **epiciclo**.

Es cierto que existen movimientos que pueden representarse tanto con el esquema de excéntricas como con el de epiciclo/deferente⁶:



Generación de una órbita elíptica mediante movimientos circulares.

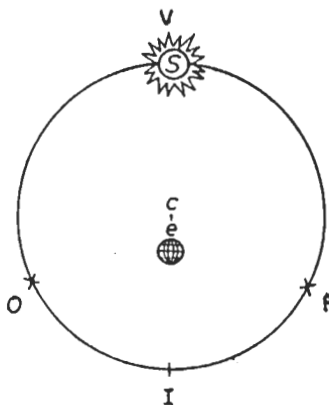
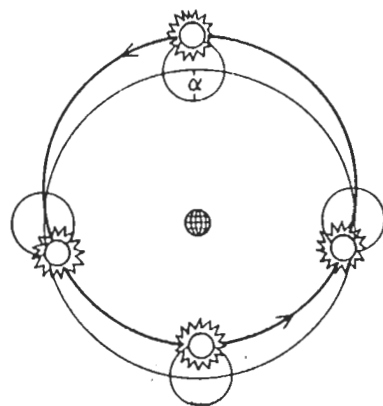


Órbita generada excéntricamente, equivalente desde un punto de vista geométrico.

[6] Figuras tomadas de Hanson (1978:120-121)



Esto sucede cuando el movimiento a explicar no es un movimiento anómalo. Por ejemplo, en el caso de la órbita solar (que no retrograda) se puede echar mano de ambos esquemas explicativos. Así, Hiparco, por ejemplo, acude al sistema de excéntricas para explicar las órbitas del Sol y la Luna. En el caso del Sol, lo hace para explicar la duración desigual de los días en las diferentes estaciones. De esta forma, si la Tierra está excéntrica, los puntos P y O serán los equinoccios de primavera y otoño (en donde los días

*Cálculos solares de Hiparco.**Explicación epicíclica de Hiparco de las estaciones.*

tienen igual duración que las noches) y V e I son los solsticios de verano e invierno (donde días y noches son desiguales). Pero este movimiento puede ser representado por un sistema de epiciclo/deferente donde el epiciclo se mueve en dirección contraria al deferente; se aprecia entonces que el círculo resultante nos muestra la Tierra en posición excéntrica..

Hiparco también dio cuenta del movimiento lunar recurriendo al sistema de excéntricas, aunque hay que decir que en este caso la explicación es algo más complicada habida cuenta del movimiento más irregular de la Luna.

No obstante, hemos visto que las excéntricas sirven para explicar y predecir movimientos retrógrados cuando se trata de los planetas exteriores; en el caso de Mercurio y Venus la cuestión se torna dificultosa. Además, es un sistema que se presta poco a la visualización. Por el contrario, si adoptamos un sistema de

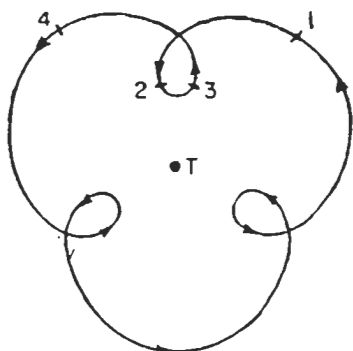
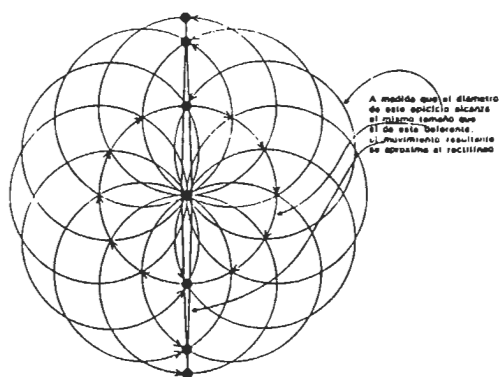


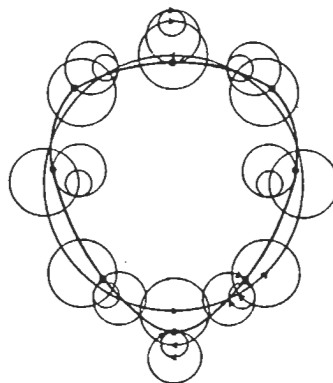
figura 9

epiciclo/deferente para explicar los movimientos retrógrados tal visualización se hace más obvia. Así, con hacer girar el epiciclo en la misma dirección que el deferente obtenemos la figura: 9, donde la retrogradación es fácil de apreciar. Por otra parte, este sistema ofrece una potencialidad explicativa mucho mayor que cualquier otro en tanto puede dar cuenta de una variada gama de órbitas con sólo aumentar el número de epiciclos o variando la velocidad o el tamaño de los epiciclos y deferente. Estas

afirmaciones pueden verse con más claridad en las siguientes figuras⁷:

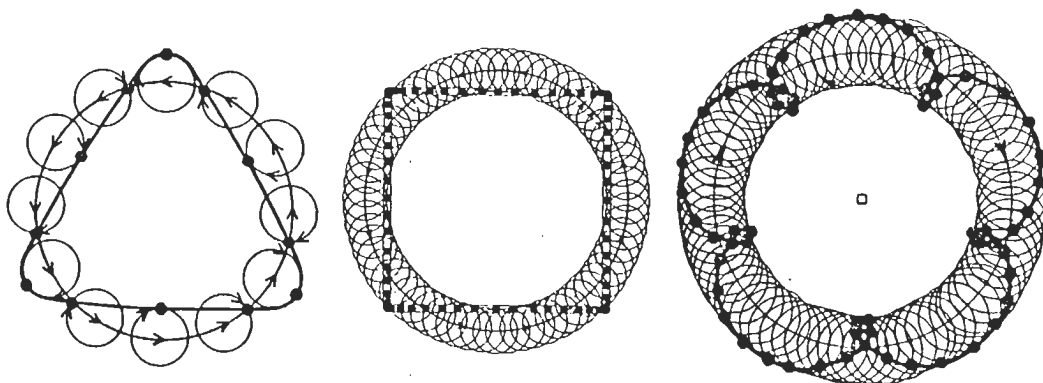


Trayectoria rectilínea a partir de la epiciclicidad.



'Órbita oviforme' de Kepler a partir de epiciclos.

[7] Tomadas de Hanson (1978:122-127)



'Orbita' cuadrada a partir de la epiciclicidad.

Quasi-triangularidad a partir de la epiciclicidad.

Movimiento circular cicloidal a partir de un epiciclo.

Podemos, pues, resumir las ventajas por las que el sistema de epiciclos se convierte en el aceptado:

1) este sistema es mucho más simple, en principio, en tanto que los puntos estacionarios y las retrogradaciones se ilustran más claramente.

2) con este sistema se deja a la Tierra en el centro del Universo, lo cual siempre es preferible⁸.

3) mientras que las excéntricas sólo son aplicables a los planetas exteriores y al Sol y la Luna, el sistema de epiciclos se puede aplicar también a Venus y Mercurio. El uso de los dos métodos representaba un problema en la medida en que parecía que el Universo quedaba escindido en dos zonas: una en la que operaba el epiciclo y otra en que lo hacía la excéntrica. Empleando sólo el sistema de epiciclos, aun cuando esto suponga variar la dirección o la velocidad de los círculos, se llega a un universo homogéneo y simple que puede ser explicado bajo el mismo esquema.

[8] Teón de Smirna argumenta que Hiparco finalmente optó por este sistema de epiciclos debido justamente a esta razón (Dreyer 1953:165)



No obstante, y a pesar de las ventajas señaladas, hay que decir que Hiparco no elaboró un sistema completo, refiriéndonos con ello a un sistema en que se incluyera todo el Universo, sino que aplicó el sistema de epiciclos a cada planeta por separado. Pero sentó las bases para que Ptolomeo, tres siglos después, lo hiciera.

2. Dimensiones y Lejanías

*L*os griegos intentaron discernir cuán lejos estaban los cuerpos celestes y que tamaño tenían. Los cálculos siempre se realizaban con respecto al diámetro terrestre.

El primero que propuso una cifra aproximada fue Anaximandro al decir que el Sol era 27 radios terrestres, la Luna 19 y que el primero se hallaba a 27 veces la distancia de la segunda.

Las propuestas elaboradas por los pitagóricos y Platón se basaban en la teoría de la armonía de las esferas siendo los radios de las órbitas de los planetas proporcionales a los números 1, 2, 3, 4, 8, 9 y 27; de forma que los intervalos planetarios tuviesen entre sí: un tono, un semitono, o un tercero menor configurando escalas musicales entre ellos^{9,10}.

Eudoxo y Aristóteles afirman que el diámetro del Sol es 9 veces el de la Luna y su distancia 9 veces mayor también.

[9] Dreyer (1953: 179) y Duhem (1988:cap. IX, II)

[10] Otras estimaciones poco aproximadas son dadas por Plinio, Censorino, Gallus, Varro o Capella.



Arquímedes propone al respecto una relación de 30/1, pero ninguno de ellos explica por qué ni cómo obtienen dichos datos.

2.1. Aristarco. El sentido de la proporción

En su tratado *Sobre los tamaños y distancias del Sol y la Luna* Aristarco nos ofrece, al estilo de los *Elementos*, un conjunto de 6 axiomas y 18 proposiciones como base del cálculo de tales dimensiones:

Axioma I. La Luna recibe su luz del Sol.

Axioma II. La tierra se comporta, en relación a la esfera de la Luna, como un punto en el que dicha esfera tiene su centro.

Axioma III. Cuando la Luna aparece reducida a la mitad el gran círculo que divide las zonas brillante y oscura se localiza en la dirección de nuestra mirada.

Esto significa que los centros de la Tierra (T), del Sol (S) y de la Luna (L) forman un triángulo rectángulo con el ángulo recto en el centro de la Luna.

Axioma IV. En el momento de la dicotomía el ángulo α es menor en 1/30 de cuadrante, es decir, $87^{\circ 11}$.

De forma que obtenemos para el ángulo β (figura 15) un valor de 3° .

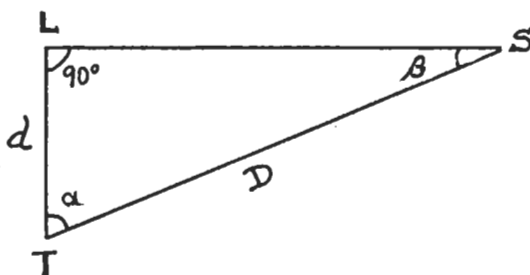


figura 15

[11] Realmente es de $89^{\circ}50'$. Es difícil determinar el instante preciso de la dicotomía. Por un lado debido a la irregularidad de la superficie lunar, y por otro porque: si tomamos como referencia el primer cuarto lunar la dicotomía se produce cuando el Sol está encima del horizonte y aquel se observa mal; y si tomamos el último cuarto, el Sol no está visible en el momento de dicha dicotomía y hay que anotar la hora con mucha precisión y calcular su posición en la eclíptica. Esto puede explicar la inexactitud del dato de Aristarco, que se equivocó en 6 horas.



$$\frac{T-2L}{S-T} = \frac{d}{D}$$

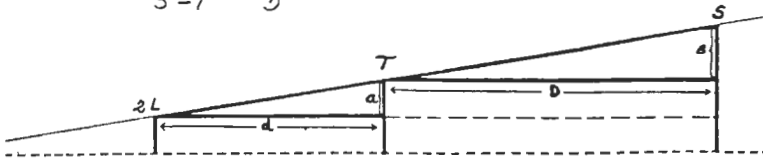


figura 16

Axioma V.

Cuando la Luna atraviesa el cono de sombra que produce la Tierra en un eclipse, se observa que el diámetro de dicha sombra es de 2 Lunas.

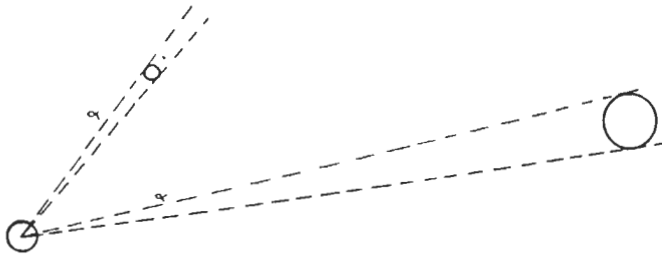


figura 17

Axioma VI.

El tamaño aparente de los diámetros del Sol y la Luna son iguales. Calcula que éstos son 1/15 parte de un signo zodiacal (30°), es decir, que el diámetro solar o lunar tapa 1/180 del zodiaco, lo que nos da 2°¹².

Relacionando los axiomas III y IV obtenemos, por triángulos semejantes, el valor de d/D . Por el axioma VI se deduce $d/D=L/S$, siendo L y S los diámetros reales del Sol y la Luna. Por el axioma V se obtiene la ecuación:

$$\frac{T-2L}{S-T} = \frac{d}{D}$$

Dividiendo por T en el primer miembro se tiene:

$$\frac{1-2\frac{L}{S} \cdot \frac{S}{T}}{\frac{S}{T}-1} = \frac{d}{D}$$

[12] Arquímedes corrige este error de Aristarco y propone 1/20 para el diámetro del Sol y la Luna.



como d/D es conocido podemos despejar S/T en esta ecuación y multiplicando S/T por L/S (conocido también), se obtiene L/T .

Una vez obtenido este dato a lo largo de sus proposiciones nos muestra el resultado de los cálculos, por aproximación, expresados en proporciones:

Proposición 7. La distancia del Sol a la Tierra es superior a 18 veces, pero inferior a 20, la distancia de la Luna a la Tierra:

$$18d < D < 20d$$

Proposición 15. El diámetro del Sol tiene en relación con el de la Tierra una proporción mayor que $19/3$ pero menor que $43/6$:

$$\frac{19}{3} < \frac{S}{T} < \frac{43}{6}$$

Proposición 17. El diámetro de la Luna tiene en relación con el de la Tierra una proporción mayor que $19/60$ y menor que $43/108$:

$$\frac{19}{60} < \frac{L}{T} < \frac{43}{108}$$

Hiparco y Ptolomeo, inspirados en Aristarco, perfeccionan los datos obtenidos por éste. Pero aunque el método es correcto desde el punto de vista geométrico, es defectuoso, sin embargo, para la obtención de las distancias y tamaños reales del Sol y la Luna debido a que con los medios que poseían era muy difícil obtener datos lo suficientemente precisos.

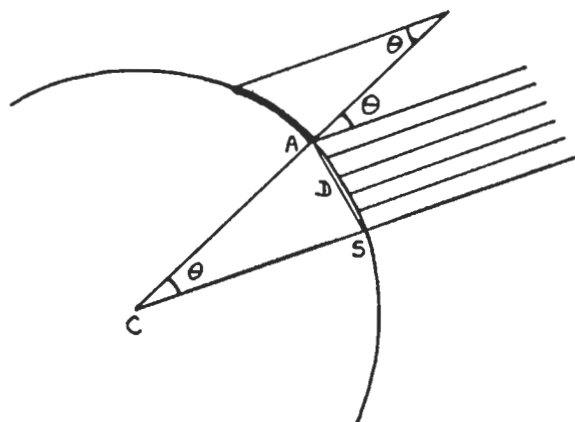
2.2. Eratóstenes: la geografía práctica o una larga caminata

Los filósofos y geómetras griegos estaban convencidos de la esfericidad terrestre. No ocurría lo mismo con escritores, poetas o el común de los mortales, que pensaban que la Tierra era plana. Aristóteles fue el primero que propuso que la esfera terrestre



medía 400.000 estadios; Arquímedes disminuyó la cantidad a 300.000, sin embargo, ninguno explica el por qué de estas cifras.

El intento más serio para medir el diámetro de la Tierra lo hace Eratóstenes de Cyrene (276-194 a.C), geógrafo y director de la Biblioteca de Alejandría en el reinado de Ptolomeo III.



$$\theta = \frac{360}{50} = 7,2^\circ \quad D = 5000 \text{ estadios} \quad \frac{D}{C} = \frac{\theta}{360}$$

por lo tanto $C = 250000$ estadios.

Eratóstenes sabía que en el solsticio de verano los rayos del Sol caen perpendicularmente en Siena (Sur de Egipto). Creía que Siena estaba situada sobre el trópico de Cáncer y a la misma longitud que Alejandría¹³.

Midiendo el grado de inclinación (θ) de la sombra que proyecta el Sol ese mismo día y a la misma hora en Alejandría, y conociendo la distancia (D) entre ambas ciudades, se podía calcular la circunferencia terrestre. Eratóstenes encontró que el grado de inclinación era $1/50$ del círculo terrestre ($7,2^\circ$) y la distancia entre Alejandría (A)

y Siena (S) 5.000 estadios. Se obtiene así una circunferencia de 250.000 estadios (cifra redondeada más adelante a 252.000, de forma que coincidieran 700 estadios por grado de circunferencia).

Existe una cierta polémica acerca de las dimensiones del estadio utilizado por Eratóstenes. Se sabe que era más pequeño que el Olímpico (185 millas o 400 codos de 0,462 metros) y mucho más pequeño que el ptolemaico o estadio real egipcio (210 millas o 400 codos de 0,535 metros).

[13] Realmente difieren en 30



Tannery piensa que Eratóstenes usó una medida guía de los mensuros reales de Ptolomeo (1 estadio por 157,5 metros). Obtendríamos así una circunferencia terrestre de 39.375 Km (39.690 Km si tomamos la medida ajustada de 252.000 estadios)¹⁴. La aproximación es asombrosa si se tiene en cuenta el error de Eratóstenes al considerar Siena y Alejandría sobre el mismo meridiano y la enorme dificultad para determinar, de forma precisa, el final de una sombra¹⁵. Esta dificultad probablemente llevó, más tarde, a Posidonio a calcular la circunferencia terrestre con independencia del Sol, tomando como referencia la diferencia de altitud de una estrella desde distintos puntos terrestres.

Ptolomeo más adelante retomará el método de Eratóstenes pero obtendrá diferentes cifras, ya que usó para el cálculo el estadio real egipcio.

Eratóstenes midió también la oblicuidad de la eclíptica¹⁶. Propuso que ésta era 22/83 partes de un ángulo recto, es decir, 23°51'. Se equivocó en sólo 7'.

Conclusiones

Comenzamos este trabajo estableciendo el conjunto de presupuestos a partir de los cuales los griegos interpretaron el Universo. Después de analizar las distintas teorías

[14] El valor de la circunferencia terrestre en el Ecuador es de 40.067,96 Km.

[15] Aunque Eratóstenes había utilizado un sace, cuadrante solar inventado por Aristarco que se considera precursor del astrolabio.

[16] Los antiguos llamaron "eclíptica" al diámetro solar en la banda de la esfera de las estrellas fijas donde se sitúan las distintas constelaciones del Zodiaco. Esta cinta, utilizada como marco de referencia, permite medir distancias entre cuerpos celestes.



elaboradas desde el siglo IV hasta el II a.C llama la atención comprobar que, aun constatándose incompatibilidades entre los datos y dichos presupuestos, aquéllos no tuvieron el peso suficiente para cuestionar estos últimos¹⁷. Como ejemplo tenemos el caso de Mercurio y Venus cuyas observaciones siempre muestran su relación con el Sol (en tanto retrogradan cuando se encuentran en oposición a él). Esto podría haber hecho deducir a los astrónomos griegos que quizá el Sol estuviera en el centro del Universo; pero no fue así.

Aunque todas las anomalías presentan una dependencia solar, los compromisos cosmológicos tan profundamente arraigados no permitieron a las teorías apartarse de las concepciones geocéntrica y geostática.

Otra verdad que aceptaron sin cuestionarse, como ya se hemos dicho, es la del principio de circularidad. Para la mente griega, la figura geoméricamente perfecta es el círculo¹⁸. Dado que atribuyeron una naturaleza divina a los cielos -por tanto éstos son perfectos- la esfera tenía que ser la figura que les corresponde. Respecto al movimiento, el circular es el único posible, en tanto no implica desplazamiento¹⁹.

De todas estas consideraciones podemos deducir el hecho contundente de que la imagen cosmológica era la que tenía status de verdad y a ella había de ajustarse cualquier teoría astronómica. En la medida en que tal ajuste no era posible se mantuvo una situación de doble verdad según la cual, cuando se hablaba de

[17] En otras palabras, cuando los datos estaban en desacuerdo con los presupuestos... "peor para los datos".

[18] Recordemos que la circularidad de las órbitas planetarias se mantiene vigente hasta Kepler (1571-1630) que será el primero en proponer la elipse como trayectoria de los astros.

[19] Esto es así porque el movimiento, para ser considerado como tal, supone el paso de un estado a otro. Si tomamos una esfera, el centro de la misma con respecto a cualesquiera de sus puntos exteriores se presenta como equidistante y, por tanto, no cabe hablar de desplazamiento y de movimiento en el sentido descrito.



predecir y explicar los cielos se recurría a los sistemas geométricos, pero cuando se trataba de aludir a la realidad física se echaba mano de las esferas aristotélicas.

Debido a este desajuste entre ambas verdades, a lo largo de la Antigüedad, Edad Media y Renacimiento, surgen críticas al sistema astronómico clásico (es decir, al de Ptolomeo) que se centran no tanto en la capacidad para resolver problemas empíricos cuanto en la de resolver ciertos problemas conceptuales que se derivan del mismo. La mayoría de estos críticos concedían que el sistema era adecuado para salvar los fenómenos a pesar de las discrepancias que se dejaban por resolver. Criticaban más bien las credenciales conceptuales (excéntricas, epiciclos, etc) que se empleaban para resolver esos problemas empíricos.

En otras palabras, el sistema, a medida que se perfeccionaba para salvar las apariencias, derivaba en cuestiones que chocaban con los esquemas conceptuales vigentes. Quizá sea ésta una explicación de por qué dicho sistema nunca fue considerado como verdadero en un sentido físico sino sólo en un sentido explicativo o matemático, lo cual redundaba en la teoría de la doble verdad.

Esta dicotomía, que sólo pudo resolverse con Copérnico primero y Galileo después, como consecuencia de cambios en la mentalidad de los hombres, no resta, a nuestro modo de ver, la gran brillantez de algunos hombres que con su mirada y poco más fueron capaces de interpretar de forma tan bella la maraña de los cielos.

Bibliografía

BERRY, A. (1961): **A short history of astronomy.** Dover.

DREYER, J.L.E. (1953): **A history of astronomy from Thales to Kepler.** Dover.



DUHEM, P. (1988): **Le système du monde**. Tomo I. Hermann, 1924.

FARRINGTON, B. (1979) **Ciencia griega**. Ed. Icaria.

FARRINGTON, B. (1980): **Ciencia y filosofía en la antigüedad**. Ed. Ariel.

HANSON, N.R. (1978): **Constelaciones y conjeturas**. Alianza Ed.

HEATH, T. (1981): **A history of Greek mathematics**. Tomo II. Dover.

HOLTON, G. (1984): **Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas**. Ed. Reverté.

KUHN, T.S. (1978): **La revolución copernicana**. Ed. Ariel.

LAUDAN, L. (1986): **El progreso y sus problemas**. Ed. Encuentros.