

LA ASTRONOMIA GRIEGA

JOSE M. TORROJA *

En un curso de conferencias sobre “Historia de la Matemática hasta el siglo XVII” no podía faltar una dedicada al estudio del desarrollo de la Astronomía griega. El problema está en condensar en el limitado espacio de tiempo de que dispongo todo lo que aquellos primeros astrónomos hicieron para tratar de encontrar una explicación a los fenómenos que habían observado: el movimiento de las estrellas a lo largo de la noche, y del Sol y la Luna a lo largo del día; el movimiento del Sol y de la Luna con relación a las estrellas; el movimiento de los planetas unas veces en un sentido y otras en el sentido contrario; el hecho de que Mercurio y Venus aparecieran siempre cerca del Sol.

Tendremos que limitarnos a reseñar las aportaciones más importantes de las grandes figuras de la Astronomía griega buscando la solución de estos problemas.

* * * *

Anaximandro (610–545 a. JC.) fue el primero que habló de la esfera celeste como una esfera de cristal en la que estaban situadas las estrellas, idea que habría de mantenerse a lo largo de muchos siglos.

Pitágoras (570 a 472 a.JC.) consideraba la Tierra esférica, inmóvil en el centro del Mundo. El movimiento diurno, como ya se admitía anteriormente, es debido a la rotación de la esfera celeste.

Estudió el movimiento del Sol, logrando explicar las apariencias con una combinación de dos movimientos uniformes de una esfera, en la que situaba al Sol; uno de ellos sigue el movimiento diurno de las estrellas, una rotación alrededor del eje del Mundo de oriente a occidente, en un día. El otro movimiento, que se compone con el anterior, es otra rotación uniforme, con un período de un año, alrededor de un eje inclinado con relación al del ecuador y en la dirección oeste a este, opuesta a la del movimiento diurno.

Explica los movimientos de la Luna y los planetas como combinación de movimientos uniformes de sus respectivas esferas.

* Catedrático de la Universidad Complutense,
Numerario de esta Real Academia.

La pasión de Pitágoras por las Matemáticas y por la Música, le llevó a buscar en ésta la solución a un problema que habría de preocupar a los astrónomos de todas las épocas: la determinación de las distancias de los planetas. Estos y las estrellas están situados en sus respectivas esferas, cuyas esferas, al girar, emite cada una una nota determinada. Platón sitúa una sirena en cada esfera, que cantará emitiendo una nota pura, siempre la misma. Los radios de las esferas han de estar relacionados entre sí, de forma que las notas emitidas constituyan un conjunto armonioso, como ocurre con las longitudes de las cuerdas de una lira.

Esta teoría de la armonía de las esferas estuvo profundamente imbuida en la mentalidad de la escuela pitagórica, pero fue rechazada por Aristóteles.

Según Filolao, (¿500 a 420 a JC.?), discípulo de Pitágoras, Dios ha colocado un gran fuego en el centro del Universo, fuego que es la sede de la divinidad y principio de todos los movimientos celestes.

Los pitagóricos, para quienes *“los números son la causa permanente de todo lo que ocurre”*, consideraban el 10 como número perfecto. La esfera de las estrellas, los cinco planetas, el Sol, la Luna y la Tierra sumaban nueve. Faltaba uno para completar el número perfecto, lo que llevó a Filolao a introducir la anti-Tierra girando alrededor del fuego central, que de esta forma, nos resultaba permanentemente invisible.

Platón (429–327 a. JC.) expuso sus ideas sobre el Universo en el *Timeo*.

Para Platón, Dios ha creado un Mundo único, que comprende a todos los seres animados existentes en el Universo. Pero como el único elemento visible es el fuego y el único elemento tangible es la tierra, para que el mundo creado por Dios sea visible y tangible habrá de estar constituido por fuego y tierra. Como intermedio entre ambos elementos admite la existencia de otros dos, el aire y el agua.

“Cuando Dios sacó las cosas del caos en que estaban — sigue diciendo en el Timeo — les dió la mayor perfección posible, componiendo sus elementos — tierra, agua, aire y fuego — por medio de los cuerpos geométricos más perfectos: cubo, icosaedro, octaedro, y tetraedro” demostrando a partir de las propiedades características de cada uno de estos sólidos, las de los elementos correspondientes.

Pero resulta que los elementos son cuatro, los ya definidos, mientras que los poliedros regulares conocidos, eran cinco. El afán de dar un sentido matemático al Mundo, lleva a Platón a introducir un nuevo elemento que ha de corresponder al dodecaedro: el éter.

La existencia de estos cinco elementos da lugar a la existencia de seres vivos de características fundamentalmente distintas. Entre ellas las que se refieren al movimiento, y así, mientras los seres formados de tierra tienen movimientos arbitrarios y desordenados, los constituidos por fuego, los astros, presentan movimientos ordenados e inmutables. Por

otra parte, los seres terrestres son perecederos, mientras que los astros, constituidos por fuego, son eternos, inmortales.

Y en cuanto al Universo, dice Platón en el *Timeo*: “y el dios dio al Universo la figura conveniente y natural ... Así, pues, lo hizo como al torno redondo y esférico, con las extremidades a la misma distancia del centro en todas direcciones, la más perfecta de todas las figuras y al hacerlo rodar en un solo lugar sobre sí mismo, le hizo mover en rotación circular, le quitó los seis movimientos restantes”. Estos seis movimientos son hacia arriba y hacia abajo, a la derecha y a la izquierda, hacia adelante y hacia atrás.

Así queda definido el cielo en el que se mueven los planetas, incluidos entre ellos el Sol y la Luna, por una serie de superficies esféricas concéntricas de radios perfectamente determinados. La esfera exterior tiene un movimiento de rotación de oriente a occidente, en algo menos de un día, alrededor del eje del mundo. Cada una de las esferas definidas a continuación gira a su vez en sentido contrario, de occidente a oriente, todas ellas alrededor del mismo eje, distinto del eje del mundo, y con velocidades tanto mayores cuanto menores sean sus distancias al centro del Mundo. La rotación de la esfera exterior en la que están situadas las estrellas, predomina sobre las de las restantes esferas, a las que arrastra en su rotación. Resulta así que la esfera de cada planeta está sometida a la acción de dos movimientos de rotación uniformes de sentidos contrarios y alrededor de dos ejes no coincidentes.

Hemos dicho más arriba que Platón suponía que el Universo era un ser vivo, y en efecto sitúa su alma en el centro de las esferas, donde Filolao había situado el fuego central y donde Platón situó la Tierra en un principio, si bien parece que al final de su vida se mostraba partidario de admitir la existencia de este fuego central.

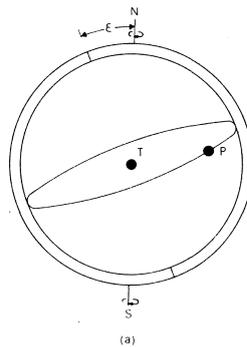
Platón distingue entre la Astronomía de observación que nos hace conocer las apariencias de estos movimientos y la Astronomía verdadera que ha de decirnos cuáles son los movimientos reales que dan lugar a aquellas apariencias, en particular al movimiento unas veces directo y otras retrógrado de los planetas. Platón transmitió por vía oral a sus discípulos los principios en que debía basarse la explicación de esos fenómenos. Simplicius en sus comentarios a Aristóteles dice: “Platón admite en principio que los cuerpos celestes se mueven con un movimiento circular, uniforme y constantemente regular y plantea a los matemáticos este problema: ¿Cuáles son los movimientos circulares y perfectamente regulares que conviene tomar como hipótesis, a fin de salvar las apariencias presentadas por los planetas?”.

Esta idea de buscar una explicación al movimiento de los planetas a partir de combinaciones de movimientos circulares uniformes, que ya la había aplicado Pitágoras al estudiar el movimiento del Sol, y en la que se basarían Eudoxio con sus esferas homocéntricas y Apolonio con los epiciclos y deferentes, se mantendría a lo largo de los siglos hasta que Kepler enunció sus leyes.

Platón conocía la solución de Pitágoras para el movimiento del Sol, pero también conocía que esa solución no era correcta, pues no daba razón del hecho de no ser iguales las duraciones de las estaciones. Así, tampoco podrá explicarse con una combinación de dos rotaciones uniformes la circunstancia de que el movimiento de los planetas fuera unas veces directo y otras retrógrado, separado por las épocas de movimiento estacionario, que mostraban las apariencias en su movimiento.

El primero que encontró una solución al problema planteado por Platón fue su discípulo Eudoxio (408 a 355 a. J.C.), quien en su obra *Sobre las velocidades* explica los movimientos de los astros, estrellas y planetas, incluidos entre estos últimos el Sol y la Luna, mediante un sistema de esferas concéntricas con la Tierra, las esferas homocéntricas, girando cada una de ellas con movimiento uniforme alrededor de su eje propio.

Cada uno de los planetas tiene su mecanismo propio, completamente independiente del de los demás, constituido por un conjunto de esferas sólidas concéntricas (*). En el



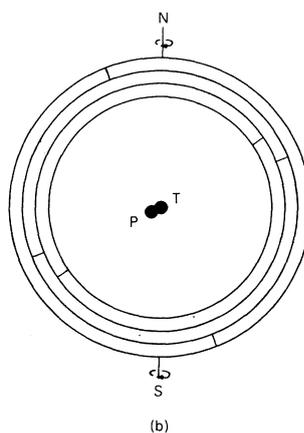
caso del Sol, éste está alojado en un punto (P) del ecuador de la esfera interior del sistema, cuya esfera gira alrededor de su propio eje, el eje de la eclíptica, de occidente a oriente, con movimiento uniforme y con un período de un año. La esfera exterior gira también con movimiento uniforme alrededor de su eje de rotación que coincide con el de la esfera de las estrellas fijas y con el mismo sentido y el mismo período que ésta. El Universo está limitado por esta esfera de estas estrellas fijas que gira alrededor del eje del Mundo, de este a oeste, en un día sidéreo, algo más corto que el día solar. Pero para conseguir explicar el movimiento de cada planeta esto no es suficiente, es necesario introducir una o varias esferas intermedias.

* Tanto los astrónomos griegos como los árabes solían utilizar indistintamente la palabra esfera para designar lo que hoy entendemos por esfera, como el volumen limitado por dos superficies esféricas concéntricas.

Consideremos, en efecto, el mecanismo para explicar el movimiento de la Luna. La primera esfera de este mecanismo giraría alrededor del eje del Mundo, de este a oeste en 23 h. 56 m. La Luna, situada en un punto de la segunda esfera, giraría de oeste a este, en un mes alrededor de su eje propio. Si este eje coincidiera con el de la eclíptica cada vez que la Luna apareciera alineada con el Sol se produciría un eclipse de este astro. Y en las lunas llenas habría siempre eclipse de Luna. Como esto no ocurre así, el eje de rotación de la esfera interior de la Luna no podía coincidir con el eje de la eclíptica y, en efecto, las observaciones confirmaban que la latitud de la Luna no era siempre nula, sino que variaba entre $\pm 5^\circ$. Era, pues, necesario que el eje de giro de la esfera interior de la Luna formara un ángulo de 5° con el eje de la eclíptica. Pero si así fuera, los eclipses se producirían siempre en los mismos puntos de la esfera celeste, precisamente en los nodos de la órbita lunar con la eclíptica. Por el contrario, la observación decía que no ocurre tal cosa, pues los eclipses no se repetían en el mismo punto de la esfera celeste, sino al cabo de 223 lunaciones, el período conocido por los Caldeos con el nombre de Saros. Fue, pues, necesario introducir una nueva esfera que giraba alrededor del eje de la eclíptica, de oriente a occidente con un período de 223 meses, que daba lugar a un movimiento de retrogradación de los nodos.

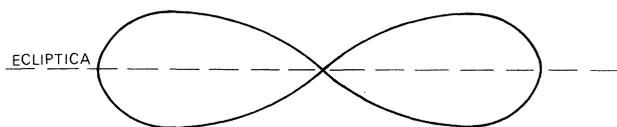
Para explicar el movimiento del Sol ya hemos visto que bastaría con dos esferas, pero buscando una analogía con el sistema de la Luna, introdujo Eudoxio tres.

Para los planetas no es suficiente el mecanismo formado por tres esferas aplicado a la Luna y al Sol. En efecto, los planetas presentan épocas con movimiento directo y otras con movimiento retrógrado, y ésto no puede explicarse con el sistema de tres esferas. Para



conseguirlo admite Eudoxio una primera esfera análoga a las de la Luna y el Sol, que explicaba el movimiento diurno y una esfera interior girando, de occidente a oriente, alrededor del eje de la eclíptica con un período propio, que él llamó la revolución zodiacal del planeta, y cuyos valores conocía con gran precisión. Un punto (P) situado en el ecuador

de esta segunda esfera define la posición media del planeta, que se moverá siempre en la misma dirección, con una latitud siempre nula y sin retrogradaciones. Alrededor de esta posición media hace oscilar Eudoxio la posición verdadera del planeta, para lo que introduce dos nuevas esferas situadas dentro de las dos anteriores. Para ello considera el diámetro de la eclíptica normal a la dirección de esta posición media, y alrededor de ese diámetro de la segunda esfera, gira, uniformemente, la tercera con un período igual a la revolución sinódica del planeta. Una cuarta esfera, en la que está situado el planeta, gira alrededor de un eje próximo al de giro de la tercera, con el mismo período, pero en sentido contrario. Schiaparelli en 1877 ha conseguido reconstruir el razonamiento de Eudoxio, demostrando que, como resultado de los movimientos de estas esferas, la posición verdadera del planeta describe una curva que Eudoxio llamó *hipopeda*, que tiene la forma de un



ocho tumbado sobre la eclíptica, en la que el punto de intersección de los dos bucles del ocho es la posición media del planeta antes definida.

Calipo (fl. 330 a.JC), modificó el sistema de Eudoxio aumentando el número de esferas, elevando a cinco el de las correspondientes a la Luna y el Sol, cinco para Mercurio, Venus y Marte, y cuatro para Júpiter y Saturno, resultando así un total de 34 esferas.

Para Aristóteles (384–322 a.JC.) el Universo está limitado por la esfera o cielo de las estrellas. Es eterno, sin principio ni fin. Y en su centro, la Tierra inmóvil. El Universo ha de ser finito, pues si así no fuera, las estrellas, en el movimiento de su esfera, habrían de recorrer un espacio infinito en 24 horas. Dentro de la esfera de las estrellas no puede existir ningún vacío. Y fuera de la esfera de las estrellas no hay nada, ni espacio, ni vacío, ni tiempo. “... fuera del cielo no existe ni puede existir ningún cuerpo. ¿Puede decirse que más allá de esta esfera suprema exista el vacío?. En absoluto. La palabra vacío designa un lugar que no contiene ningún cuerpo, pero que podría contenerlo; pero ningún cuerpo puede existir ni formarse fuera del cielo, fuera del Universo no existe el vacío”. “Para que una cosa esté en alguna parte, es necesario no solamente que esa cosa tenga una existencia propia, sino además que exista fuera de ella, otra cosa en cuyo seno esté contenida. Pero más allá del Universo y del Todo, no hay nada que exista”.

Considera el Universo, el Mundo, dividido en dos zonas esencialmente distintas, separadas por la esfera de la Luna.

El mundo sublunar está formado por combinaciones variables de los cuatro elementos: tierra, agua, aire y fuego. Es el mundo de la generación y la corrupción y en este mundo están incluidos los meteoritos, las estrellas fugaces y los cometas, cuyos aspectos son variables con el tiempo.

Por el contrario, entre la esfera de la Luna y la de las estrellas fijas, el espacio está lleno por una quinta esencia, el éter; una substancia pura, transparente e inalterable. Y en ese mundo los cuerpos celestes, constituidos por esa misma substancia, no sometidos a variación alguna, ni a generación ni corrupción, ni a movimientos cambiables ni violentos, se mueven arrastrados por el movimiento de sus esferas, y por la velocidad de este movimiento, se calientan haciéndose luminosos, lo que les hace visibles.

Aristóteles tiene una idea muy amplia sobre los posibles movimientos, que pueden ser de cuatro clases. Pueden existir movimientos o variaciones substanciales, que comportan una corrupción de determinadas substancias y la generación de otras; movimientos cuantitativos que suponen un aumento o una disminución; movimientos cualitativos que llevan consigo una alteración, y movimientos locales que consisten en variaciones en la posición de un cuerpo con el tiempo.

De todos estos tipos de movimientos es evidente que los tres primeros no pueden ser perpetuos, y entre los movimientos locales sólo podrá serlo el movimiento circular, pues si un movimiento rectilíneo fuera perpetuo, terminaría por atravesar el Universo finito. Este movimiento circular, de rotación, uniforme, es el único movimiento local perpetuo que puede afectar a los astros, seres eternos, constituidos por la única substancia eterna, el éter, incapaces de nacer o perecer, de dilatación o de contracción, de alteración ni corrupción de ninguna clase.

Además el círculo es la figura perfecta, el movimiento circular es el movimiento perfecto, continuo, uniforme, eterno. Es el primer movimiento, puesto que lo perfecto es anterior a lo imperfecto. Es el movimiento que conviene a los cuerpos perfectos, al éter. Pero los cuerpos destinados a moverse con un movimiento circular deben tener necesariamente la forma esférica, por ser la esfera la primera figura. La figura esférica es, pues, la conveniente a los cuerpos celestes.

El sistema de las esferas homocéntricas encuentra así, en opinión de Aristóteles, una justificación. El Universo está limitado por una esfera que encierra al mundo de la generación y de la corrupción. Fuera, una serie de esferas concéntricas limitadas por la esfera de las estrellas fijas, y el espacio entre ellas está ocupado por el éter, substancia de la que están también constituidos los planetas.

Hay seres, dice Aristóteles, que llevan en su propia substancia la capacidad de producir su propio movimiento; estos son los animales. Pero las esferas celestes no son seres animados, por lo que es necesario un motor, una substancia que los mueva. Y como el movimiento de los planetas es eterno, es necesario buscar un motor eterno. Los motores

celestes han de ser, pues, substancias no materiales, actos puros sin mezcla de potencia y en sí, inmóviles. Y esta substancia pura, no material, inmóvil, que es Dios, determina en la materia de las esferas celestes la admiración y el deseo del movimiento, y de esta admiración y este deseo surge un movimiento de rotación uniforme y eterno.

Ordenando así el mundo de los cuerpos celestes volvamos al mundo sublunar, al mundo de la generación y de la corrupción.

En este mundo, en lugar del éter, son cuatro los elementos que lo constituyen, la tierra, el agua, el aire y el fuego, a cada uno de los cuales corresponderá un determinado movimiento simple.

De los cuatro elementos citados, la tierra es absolutamente pesada y su movimiento natural es rectilíneo, hacia el centro del Mundo. El fuego es absolutamente ligero, y su movimiento natural es en dirección opuesta, hacia arriba. El agua y el aire son relativamente pesados y relativamente ligeros: así, una gota de agua cae a través de la atmósfera y una burbuja de aire tiende a subir a través del agua.

Puede ocurrir que una piedra suba, lanzada por la mano del hombre, pero ése no sería un movimiento natural, se trataría de un movimiento violento ocasionado por una causa extraña a su naturaleza.

Decíamos que así como el movimiento circular de los cuerpos celestes es perpetuo, el movimiento rectilíneo no puede serlo y en efecto, un cuerpo pesado se mueve hacia el centro del Mundo, pero al llegar a ese centro habrá de detenerse, pues si avanzara más allá, su movimiento sería alejándose del centro del Mundo, y ese no es el movimiento natural de los cuerpos pesados, sino el del fuego.

Si los elementos en este mundo sublunar llegaran a ocupar el lugar natural que les corresponde, la tierra quedaría en el centro del Mundo. Inmediatamente, el agua rodeando toda la tierra. A continuación, el aire rodeando al agua, y por último, rodeando al aire, la esfera del fuego.

Aristóteles justifica que la Tierra debe ser esférica y estar situada en el centro del Mundo. Todos los cuerpos pesados, al caer hacia el centro del Universo lo hacen siguiendo líneas rectas en dirección al centro del Mundo. La Tierra ha de ser esférica, normal en todos sus puntos a esas direcciones en que caen los cuerpos pesados. Y la observación lo confirma, pues la sombra producida por la sombra de la Tierra en los eclipses de Luna es circular; y al desplazarnos hacia el polo van desapareciendo las constelaciones y apareciendo otras.

Aunque algunos filósofos anteriores habían admitido el movimiento de rotación de la Tierra, explicando así el movimiento diurno, Aristóteles demuestra que esto es imposible. En efecto, todo cuerpo dotado de un movimiento de rotación, dice, debe girar alrede-

dor de un punto fijo. El cuerpo central, inmóvil, alrededor del cual giran los cuerpos celestes no puede estar constituido por la misma substancia que estos cuerpos celestes. Si el éter pudiera quedar en el centro del Universo, en reposo, sería porque este centro del Universo fuera el lugar natural del éter, en cuyo caso el movimiento natural de éste sería el movimiento rectilíneo centrípeto, que es el que caracteriza a los cuerpos pesados. Pero esto no es así, pues el movimiento natural del éter y de los cuerpos celestes es el movimiento circular uniforme. El cuerpo central inmóvil alrededor del cual tiene lugar la revolución de los cielos ha de estar formado por una substancia que tenga como movimiento natural el movimiento centrípeto que es el movimiento natural de los cuerpos pesados. El movimiento de revolución de los cuerpos celestes exige la existencia de un cuerpo que no sea inmutable, es necesario que exista la Tierra, inmóvil, en el centro del Mundo.

Y estas conclusiones están confirmadas por la observación. En efecto, dice Aristóteles, si la Tierra girase debería aparecer un movimiento de paralaje para todas y cada una de las estrellas, paralaje que la observación nos dice que no existe. Da aún otra prueba experimental de la no existencia de un movimiento de rotación de la Tierra. Si lanzamos una piedra hacia arriba, la piedra caerá siempre sobre el mismo punto desde el que se lanzó, cosa que no ocurriría si la Tierra girase. Fueron necesarios muchos siglos para comprobar que este argumento de Aristóteles era falso.

Establecida así la inmovilidad de la Tierra, ya tenemos el cuerpo pesado e inmóvil alrededor del cual han de moverse los cuerpos celestes siguiendo sus órbitas circulares, con velocidad constante. Conservando las esferas homocéntricas de Eudoxio, los cuerpos celestes, rigurosamente unidos a estas esferas, se mueven con ellas, con movimientos uniformes, eternos e inmutables. Pero así como a Eudoxio le bastaba con 27 esferas, número que fue elevado a 34 por Calipo, Aristóteles necesitó 55 esferas.

En efecto, dada la imposibilidad de existencia del vacío, las esferas homocéntricas están en contacto cada una con las inmediatas. Dentro del sistema de esferas de un planeta determinado, cada una de ellas transmite su movimiento a la inmediata interior de forma que la esfera más interior del sistema ha recibido el movimiento de todas las restantes esferas del mismo. Para evitar ésto, Aristóteles recurrió a las que llamó *esferas que giran al revés o esferas compensadoras*.

Pero, pese a la complicación creciente que suponía este aumento en el número de esferas, había datos de observación que este sistema de esferas homocéntricas no conseguía explicar. En particular las variaciones observadas en el brillo de los planetas, en especial Marte y Venus y las variaciones en los semidiámetros del Sol y de la Luna, llevaban a pensar que las distancias de los planetas no debían de ser constantes, lo que no era compatible con un sistema que situaba a los planetas en esferas concéntricas con la Tierra. El Sistema de las esferas homocéntricas había agotado sus posibilidades. Era necesario buscar soluciones por otros caminos.

Heráclides de Ponto (fl. 345 a.JC.) suprimió el movimiento de rotación de la esfera celeste, dando en cambio un movimiento de rotación a la Tierra (de oriente a occidente) que seguía ocupando el centro del Mundo. Alrededor de la Tierra se mueven, con movimientos circulares y uniformes, la Luna, el Sol, Marte, Júpiter y Saturno. Mercurio y Venus, que se ven siempre próximos al Sol, y cuyas distancias a la Tierra eran variables, describen, con movimientos uniformes, sendas circunferencias cuyo centro está en el Sol. Este es un sistema análogo, en parte, al que diecinueve siglos después había de plantear Tycho-Brahe.

Aristarco de Samos (fl. 310 a 230 a.JC.), suponía el Sol en el centro del Universo y a su alrededor describía la Tierra una órbita circular, en un año, al mismo tiempo que giraba en un día alrededor de su eje.

Pero estas ideas sobre la rotación de la Tierra y sobre el sistema heliocéntrico no despertaron apenas interés en la Grecia antigua.

A Eratóstenes (fl. 276-192 a.JC.) se debe la primera determinación del valor del radio terrestre, determinando la longitud de un arco de meridiano y la diferencia de latitudes de sus extremos.

Apolonio (fl. 220 a.JC.) trata de buscar una explicación a los fenómenos observados: los movimientos del Sol y de la Luna, y análogamente los de los restantes planetas vistos desde la Tierra, no son uniformes. Los planetas se desplazan unas veces en sentido directo y otras en sentido retrógrado. Las variaciones observadas en los semidiámetros del Sol y de la Luna y en las luminosidades de los planetas exigían una variación en su distancia a la Tierra que era incompatible con la teoría de las esferas homocéntricas. Pero era necesario mantener la obligatoriedad de los movimientos circulares y uniformes.

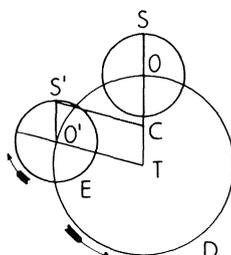
Supone que cada planeta se mueve recorriendo, con movimiento uniforme, una circunferencia, el epiciclo, cuyo centro recorre, también con movimiento uniforme, otra circunferencia, el deferente, con centro en la Tierra. Para explicar además la circunstancia de que Mercurio y Venus aparezcan siempre cerca del Sol, los centros de sus epiciclos los supone Apolonio alineados con el Sol.

El movimiento diurno, tanto en las estrellas como en los planetas, lo explica admitiendo que los deferentes de éstos son arrastrados por la rotación de la esfera de las estrellas fijas en su movimiento de este a oeste, con un período de 23 h. 56 m.

Hiparco (s.II a.JC.) ha sido, sin duda alguna, una de las primeras figuras en el desarrollo de la Astronomía. Su obra nos ha llegado por las alusiones en los escritos de Tolomeo, que siempre habla de ella con grandes alabanzas. Fue un hábil y metodoso observador, utilizando los aparatos que él mismo construyó.

Preparó así un catálogo que contenía más de mil estrellas y que posteriormente fue incluido en el *Almagesto* por Tolomeo. Comprobó que las posiciones correspondientes a sus propias observaciones se alejaban todas del equinoccio con relación a las más antiguas: aumentaba la longitud de todas las estrellas en la misma magnitud, permaneciendo invariables sus latitudes. Lo explicó como consecuencia de una rotación uniforme de la esfera de las estrellas fijas en sentido directo, y alrededor del eje de la eclíptica. Ello confirmaba el hecho de que la oblicuidad de la eclíptica, que Hiparco determinó, coincidiera con el valor obtenido en épocas anteriores. A este fenómeno le dio el nombre de *precesión de los equinoccios*.

Consideró la forma de estudiar los movimientos de los planetas utilizando las posibilidades desarrolladas por Apolonio, o apoyándose en un movimiento uniforme en una circunferencia excéntrica. Demostró que podía llegarse a los mismos resultados con ambas soluciones. Una combinación adecuada de los períodos en el epiciclo y en el deferente equivalía a un movimiento en una órbita circular excéntrica.



Para el Sol fue suficiente recurrir a una órbita circular excéntrica. Más difícil fue buscar una explicación para el movimiento de la Luna cuyos períodos determinó. Supuso Hiparco que la Luna describe, con movimiento uniforme, una órbita circular excéntrica cuyo centro recorría un deferente alrededor de la Tierra en un período de nueve años. El plano de esta órbita excéntrica formaba un ángulo de 5° con el de la eclíptica, y la línea de los nodos tenía un movimiento retrógrado completándolo en algo menos de diecinueve años. Pero esto no resultó suficiente para ajustar todas las observaciones de que disponía, en especial de eclipses, efectuadas por los astrónomos de Babilonia y Alejandría. Fue necesario complicar el sistema con la introducción de un nuevo epiciclo. Introduciendo una primera desigualdad lunar consiguió explicar satisfactoriamente las posiciones de la Luna en las sicigias, pero no en las cuadraturas. Esto le permitió mejorar el cálculo de las predicciones de eclipses, especialmente de eclipses de Luna, que se producen precisamente en las sicigias.

Mayores dificultades presentaba el estudio del movimiento de los planetas, por no disponer Hiparco de suficiente número de observaciones. Se limitó a acumular y ordenar

observaciones suyas y de épocas anteriores que permitieran llegar a una teoría, combinando una órbita excéntrica con un epiciclo, en la que pudiera encajar dichas observaciones, labor que preparó para sus sucesores.

Claudio Tolomeo (100–174) es la figura más conocida de la Astronomía griega. Su obra cumbre es, sin duda, la *Gran composición matemática de la Astronomía o Syntaxis matemática*, generalmente conocida entre los griegos como *Gran composición o Megale Syntaxis*, que terminó de escribir entre los años 146 y 147. Fue traducida al árabe el año 817 por encargo del Califa Al-Ma'mun, siendo conocida entre los árabes como *La grande o Al Magesti*, de donde derivó el nombre con que es universalmente conocida: *Almagesto*.

En el siglo XIII fue traducida al hebreo, al latín y al romance por los colaboradores de Alfonso el Sabio en Toledo. En el *Almagesto* Tolomeo expone los conocimientos astronómicos de su época expuestos ordenadamente y con un elegante aparato matemático.

El *Almagesto* consta de 13 libros, en el primero de los cuales establece que *‘es necesario admitir que el cielo es esférico y que se mueve de la manera que conviene a una esfera; que, por su figura, la Tierra, considerada en el conjunto de sus partes, es también sensiblemente esférica; que por su posición, está situada en el centro de todo el cielo y que es como su centro; que en cuanto a las dimensiones y las distancias, la Tierra es a la esfera de las estrellas fijas como un punto; que no tiene ningún movimiento que haga cambiar su posición’*.

Justifica que *la Tierra, tomada en su conjunto, es sensiblemente esférica* con una serie de argumentos, en los que Tolomeo se limita a repetir las razones que se venían dando desde los tiempos de Hiparco, y algunas desde Aristóteles, si bien no incluye la dada por este último, basándose en la forma circular de la sombra de la Tierra en los eclipses de Luna.

La Tierra, sigue diciendo Tolomeo, *“no puede experimentar ningún movimiento que la desplace del centro ni que la haga ocupar ningún lugar que no sea enteramente el centro del Universo”*. En efecto, considera que la Tierra *“cuya magnitud está en una razón muy pequeña con relación al Universo, experimenta esfuerzos semejantes en todas direcciones, y es retenida en todos los sentidos por fuerzas que tienen intensidades iguales y direcciones homólogas”*. Por otra parte, dice: *“Si la Tierra se moviera con un movimiento que fuera común a los otros cuerpos graves, es evidente que precedería a todos; arrastrada por el mismo exceso de su magnitud, los animales y todos los cuerpos incluidos entre los graves, llevados solamente por el aire, quedarían detrás. Por último ocurriría que con una gran velocidad llegaría a salirse de los límites del cielo. Basta imaginar estas suposiciones para que a todos les parezcan ridículas”*.

Por otra parte, dice que es ridículo admitir la rotación de la Tierra para tratar de explicar el movimiento diurno, pues es contra natura admitir que los cuerpos celestes, más ligeros que la Tierra, no tuvieran ningún movimiento, mientras que ésta, más pesada y más

compacta, sí lo tuviera. Esgrime también como argumento, ya expuesto por Aristóteles, el hecho de que un cuerpo lanzado verticalmente cae en el mismo punto desde el que había sido lanzado. Sin embargo, reconoce que, de admitirse este movimiento de rotación de la Tierra, se encontraría una explicación más sencilla de los fenómenos observados.

Alrededor de esta Tierra inmóvil giran los planetas, en el orden admitido por los antiguos astrónomos, que es también el admitido por Hiparco. Más tarde dice, en el libro VI, que al no ser posible determinar la paralaje de los planetas no puede comprobarse si es o no verdadera esta ordenación.

En el libro II da los procedimientos para determinar el valor de la oblicuidad de la eclíptica, la latitud y los ángulos formados por la eclíptica con el meridiano y con el horizonte.

El libro III empieza estudiando la forma de determinar la duración del año, para lo que, dice, es necesario leer los libros antiguos y en especial los de Hiparco, *tan trabajador como amigo de la verdad*. Analiza los resultados obtenidos por éste y en particular una desigualdad en la duración del año, sobre cuya existencia Hiparco no debía tener mucha seguridad, pero que *por amor a la verdad*, no quiso ocultar. Para poner en claro esta duda efectúa Tolomeo sus propias observaciones y no la encuentra.

Sigue diciendo Tolomeo: *“creemos que el objetivo que el matemático debe proponerse y alcanzar es el siguiente: demostrar que todo lo que observa en el cielo está producido por movimientos circulares y uniformes”*. *“Es necesario sentar el principio de que todos los movimientos experimentados por los astros errantes hacia atrás, así como todos los movimientos de todos los astros hacia delante son todos por naturaleza, circulares y uniformes”*.

Sentados estos principios, Tolomeo ordenó todas las observaciones que pudo acumular, tanto del Sol y de la Luna como de los restantes planetas, para seleccionar los radios de los epiciclos y de los deferentes y los períodos de sus respectivos movimientos con objeto de construir su sistema.

Para el estudio del movimiento del Sol plantea dos hipótesis, manteniendo el movimiento circular uniforme. La primera en una circunferencia excéntrica y la segunda adoptando los epiciclos, demostrando que ambas pueden explicar igualmente las irregularidades observadas. En el caso del Sol se decide por la primera: la de la excéntrica, *“por ser más sencilla, lo consigue con un solo movimiento en lugar de dos”*. Obtiene y estudia la ecuación del centro.

Los libros IV y V se refieren al movimiento de la Luna, tratando de completar la obra de Hiparco, que había descubierto la primera desigualdad, suficiente para explicar las posiciones de la Luna en las sicigias, pero no en las cuadraturas. *“Todos nuestros predecesores — dice Tolomeo — han dado a la Luna una desigualdad simple y única; demos-*

traremos que tiene una segunda desigualdad que es máxima en las dicotomías y que se repite dos veces en el curso del mes". Para ello, sigue el método de Hiparco, tomando tres eclipses de Luna, para deducir la máxima desigualdad. "Los antiguos matemáticos trataron de descubrir un tiempo durante el cual la Luna tuviera siempre un movimiento igual en longitud: este tiempo debía ser, con exclusión de otro cualquiera, el de la restitución de su desigualdad. Comparando, pues, entre sí diferentes eclipses de Luna, buscaron en qué número de meses se reencontraría siempre el mismo tiempo y el mismo intervalo entre los eclipses".

En el libro V, tomando el problema "donde lo dejó Hiparco", trata de buscar una explicación a las diferencias que quedaban en la posición de la Luna fuera de las sicigias, utilizando para ello las observaciones de Hiparco y las suyas propias efectuadas con un astrolabio que él mismo construyó, descubriendo una nueva desigualdad, a la que más tarde se daría el nombre de *evección*.

El libro VII lo dedica al estudio de las estrellas fijas, empezando con la descripción de las constelaciones. Estudia a continuación la precesión, ya conocida también por Hiparco, y para explicarla atribuye a la esfera de las estrellas fijas dos movimientos, uno de este a oeste, que corresponde al movimiento diurno, y otro, mucho más lento, alrededor del eje de la eclíptica, de oeste a este, de un grado en cien años, con el que daba razón de dicha precesión. Termina este libro con un catálogo de estrellas que es fundamentalmente, una transcripción del de Hiparco.

Al estudio de los planetas dedica Tolomeo los cinco últimos libros de su *Syntaxis*. Los planetas, quedan entre la Luna y las estrellas y mucho más cerca que éstas, y siendo Saturno el planeta más alejado. Le siguen, acercándose a la Tierra, Júpiter y Marte, y luego el Sol. Vistos siempre en las proximidades de este último, Mercurio y Venus quedan más cerca de la Tierra, entre el Sol y la Luna.

Tolomeo se propone explicar los movimientos de estos planetas a base de combinaciones de movimientos circulares y uniformes, pues "esta perfección es la esencia de las cosas celestes, que no admiten el desorden". Dispone, por otra parte, de las hipótesis previamente establecidas de la excéntrica y del deferente y el epiciclo y encuentra la solución en una combinación de ambas hipótesis. Establece en efecto que el planeta recorre un epiciclo con movimiento uniforme en un tiempo igual al de su revolución sinódica, pero el deferente que recorre el centro del epiciclo en un año es una circunferencia excéntrica con relación a la Tierra. Pero esto no resulta suficiente y complica el sistema. Define, en efecto, un punto que llama *ecuante*, alineado con el centro de la Tierra y el centro del deferente, y de forma que este último equidiste de los otros dos. El movimiento del centro del epiciclo sobre el deferente excéntrico, es tal que visto desde el *ecuante* su movimiento angular es uniforme.

En el caso de Mercurio el asunto se complica aún más. En efecto, el centro del deferente pasa a describir, en un año, con movimiento uniforme de oriente a occidente, una pequeña circunferencia cuyo centro es simétrico del centro del Mundo con relación al ecuante, y su radio igual a la distancia entre los dos puntos últimamente citados.

Utilizando todas las observaciones disponibles, determina Tolomeo los valores de los radios de los deferentes y epiciclos, así como la posición del ecuante y el centro del deferente para cada uno de los planetas.

En el libro XII estudia Tolomeo las estaciones y retrogradaciones de los planetas, así como las máximas elongaciones de Mercurio y Venus, y en el XIII trata de explicar sus movimientos en latitud, para lo que supone que los planos de las excéntricas están inclinados con relación a la eclíptica, y los de los epiciclos con relación a aquéllos.

Tolomeo no se limitó, pues, a transmitirnos las ideas de los astrónomos anteriores a él, en especial la obra de Hiparco, sino que mejoró estos conocimientos dejándonos un sistema completo y coherente que trataba de explicar las observaciones dentro del grado de precisión de los instrumentos hasta entonces utilizados.

Convencido por la experiencia adquirida de las dificultades que presentaba el tratar de explicar las observaciones a partir de los postulados de que había partido, en el último libro de su *Sintaxis Matemática*, dice: “*Es necesario esforzarse en concordar lo mejor posible las hipótesis más sencillas con los movimientos celestes; pero si esto no se logra, deben tomarse nuevas hipótesis que se adapten a los hechos*”.

Y esto fue lo que hizo Tolomeo con su nueva obra *Hipótesis de los Planetas*, apoyándose para ello en el sistema de las esferas homocéntricas, que modificó mejorándolo convenientemente. Dividida esta nueva obra en dos libros, sólo se conserva el texto original del primero, que no es sino un resumen de la *Sintaxis* en el que expone la teoría de los deferentes y epiciclos, con sólo ligeras variantes en lo que se refiere a la inclinación del plano del epiciclo, para explicar las variaciones en las latitudes de los planetas.

Lo más interesante de esta nueva obra de Tolomeo estaba en el libro II, del que no se conserva más que una traducción árabe. En este segundo libro, Tolomeo se apoya en las ideas que unos siglos antes habían desarrollado Eudoxio y Aristóteles, ordenando el éter, la quinta esencia, en una serie de caparzones limitados por superficies esféricas, dotadas de movimientos de rotación uniformes, con los que trataba de materializar los movimientos definidos en los deferentes y en los epiciclos introducidos en su *Sintaxis*.

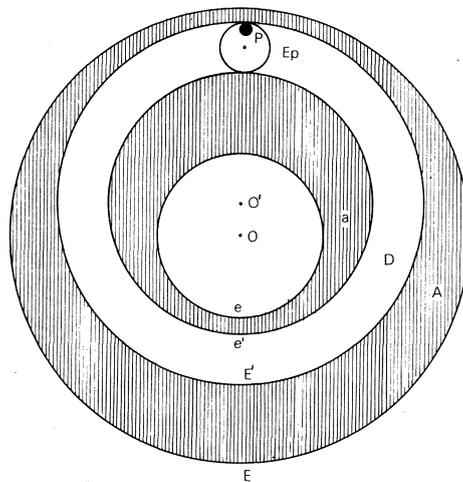
Cada una de estas esferas, o capas esféricas, en rotación uniforme, gira alrededor de un eje cuyos polos están unidos a la esfera que la envuelve.

El Universo está limitado por la *esfera suprema* que no es la esfera de las estrellas fijas. Es una esfera sin astros, la novena, cuya misión es actuar como *esfera motriz* de la es-

fera de las estrellas fijas comunicando a ésta el movimiento diurno, de oriente a occidente alrededor del eje del mundo. A su vez la esfera de las estrellas fijas tiene un movimiento muy lento, de occidente a oriente alrededor de un eje normal a la eclíptica, para explicar el movimiento de precesión descubierto por Hiparco.

Inmediatamente por debajo de la esfera de las estrellas fijas viene el sistema de esferas que han de definir el movimiento de Saturno, y a continuación las de los demás planetas.

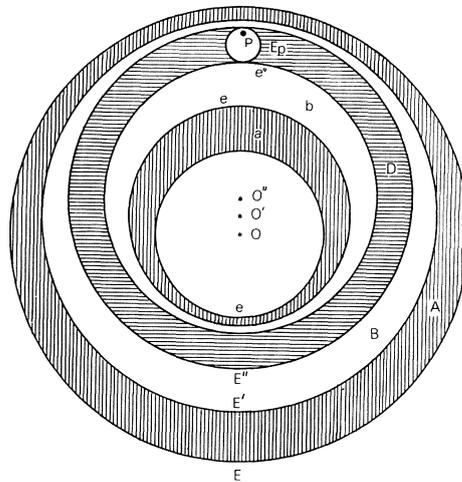
El sistema que define el movimiento de Saturno está limitado por dos superficies esféricas concéntricas, E y e , con centro en el del Mundo O , que limitarán la *esfera de Saturno*, que tiene dos movimientos de rotación alrededor de dos ejes distintos, el primero es el eje del Mundo y la rotación tiene lugar de oriente a occidente en un día (el movimiento diurno). El segundo movimiento es alrededor de un eje normal a la eclíptica, muy lento, de occidente a oriente, para explicar la precesión. Dentro de esta esfera de Saturno, otras dos superficies esféricas, también concéntricas, E' y e' , pero cuyo centro común O' no coincide con el del Mundo, definen la *esfera deferente* del planeta. Esta esfera es arrastrada por los movimientos de la esfera del planeta y tiene por su parte un nuevo movimiento



de rotación alrededor de un eje que pasa por su centro común O' , con una dirección y un período de giro propios del planeta. La *esfera deferente* D comprende una pequeña *esfera epiciclo* Ep que se mueve con ella, que tiene además un movimiento de rotación y otro de oscilación y en cuyo ecuador está situado el planeta P , participando en todos los movimientos citados. Así materializa aquí Tolomeo el sistema de deferentes y epiciclos de que nos hablaba en el *Almagesto*.

Por debajo de la esfera de Saturno, y con una disposición análoga se encuentran las de los planetas Júpiter, Marte, el Sol, Venus, Mercurio y la Luna, si bien con algunas variantes en lo que se refiere a las esferas del Sol, Mercurio y la Luna.

En efecto, el movimiento del Sol es más sencillo por no ser necesario el epiciclo. En cambio el de Mercurio es más complicado, añadiendo a un sistema análogo al de Saturno, una nueva esfera limitada, como las anteriores, por dos superficies esféricas E'' y e'' concéntricas también, pero cuyo centro común O'' es distinto de los de las dos esferas ante-



teriores, si bien están los tres centros alineados y de forma que la distancia entre los de la primera, llamada *esfera de Mercurio* y la segunda llamada *esfera deferente de la excéntrica* es igual a la distancia entre el centro de ésta y el de la tercera, llamada *esfera deferente del epiciclo*. Todas las esferas (capas esféricas en realidad) giran alrededor de ejes que pasan por sus respectivos centros: la esfera de Mercurio tiene dos movimientos, uno alrededor del eje del mundo de oriente a occidente, que explica el movimiento diurno, y otro alrededor de un eje normal a la eclíptica, muy lento de occidente a oriente para explicar la precesión. La *esfera deferente de la excéntrica*, arrastrada por el movimiento de la esfera del planeta, tiene a su vez un nuevo movimiento alrededor de un eje y con un período propios. La *esfera del deferente del epiciclo*, arrastrada por los movimientos de las anteriores, tiene además su propio movimiento de rotación con su eje y su período propios.

Pero así como la esfera de las estrellas fijas recibía el movimiento diurno de una *esfera suprema*, también el sistema de esferas de cada planeta recibe el movimiento diurno por la acción de una nueva esfera que, con esta única misión, rodea a la esfera de cada planeta.

De otras obras de Tolomeo nos han llegado noticias, como su tratado de Óptica, su Geografía, que se conserva, su *Analemma*, y nos han llegado datos sobre instrumentos que construyó, en especial sus planisferios, y sus cuadrantes.

La deuda principal que tenemos con Tolomeo, es el habernos permitido conocer las ideas astronómicas de los matemáticos griegos que le precedieron, a las que añadió aportaciones propias nada despreciables. Fue, por otra parte, el último de los astrónomos griegos, ya que después de él la ciencia griega decayó, olvidándose, hasta que, a través de los árabes y de las traducciones de Alfonso el Sabio en Toledo vuelve a Europa, en la que el *Almagesto* fue universalmente admitido hasta Copérnico.

BIBLIOGRAFIA

- G. ABETTI: Historia de la Astronomía. México 1966.
- A. BERRY: A Short History of Astronomy. New York 1898.
- M. DELAMBRE: Histoire de l'Astronomie ancienne. Paris 1817.
- J. L. DREYER: A. History of Astronomy from Thales to Kepler. New York 1905.
- D. DUHEM: Le Système du Monde. Paris 1974.
- O. NEUGEBAUER: A History of ancient mathematical Astronomy. Berlin 1975.