

1.2. La Astronomía en la Grecia Clásica.

Advertencia preliminar.

Dada la carencia de bibliografía apropiada para este curso y considerando que las mejores obras se encuentran en inglés, he confeccionado estos apuntes como una guía para los estudiantes del curso. Estos apuntes resumen los libros de Couderc, Dreyer, Sarton y en menor medida el libro de Lloyd (ver bibliografía al final). A fin de facilitar la lectura de los apuntes he omitido la fuente de donde se tomó cada cosa pero deseo enfatizar aquí que una fracción de estos apuntes es traducciones o resúmenes de los libros citados. El lector interesado deberá consultar las obras originales.

1.2.1. Introducción:

Hacia el siglo VI a.C. se produce en el mundo griego una verdadera revolución en el conocimiento que puede con justicia considerarse como el nacimiento del pensamiento científico. El primer desarrollo de la cultura griega tuvo lugar en la costa oriental del mar Egeo, zona occidental del Asia Menor, en Jonia.

1.2.2. Escuela Jónica:

Los primeros jónicos fueron en buena medida colonos procedentes de Creta. Se puede decir que la filosofía jónica fue el florecimiento de una larga serie de esfuerzos no sólo griegos sino también minoicos.

Jonia fue un gran centro de comunicaciones entre oriente y occidente y los colonizadores cretenses de esa costa asiática encontraron en ella excelentes condiciones para su prosperidad material como así también para su estímulo mental. En Jonia el genio griego fue catalizado por fermentos egipcios y asiáticos. En Jonia, las tradiciones egeas fueron revitalizadas con novedades de ultramar, nuevas libertades y nuevas restricciones.

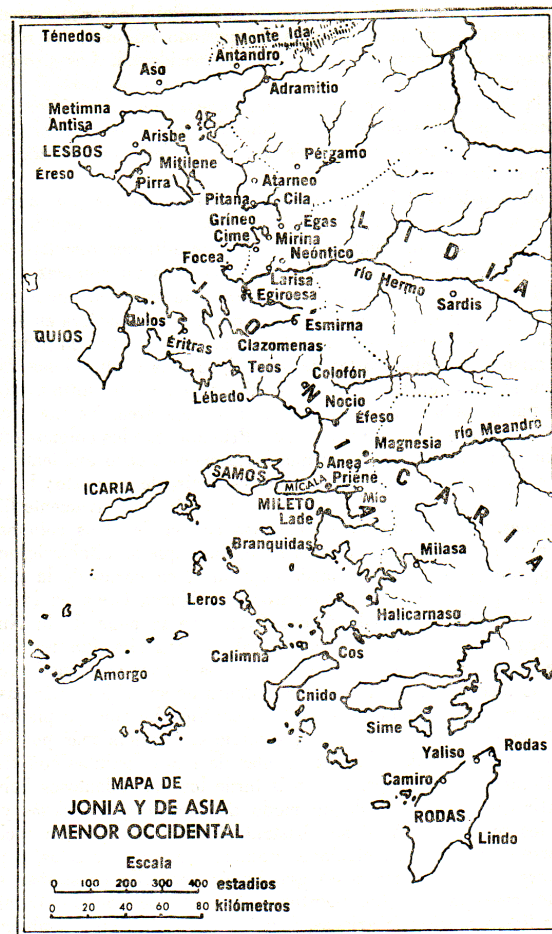


FIG. 42. Mapa de Jonia. [Tomado, con permiso, de la edición de Heródoto de la Loeb Classical Library, con traducción inglesa de Alfred Denis Godley, vol. I, 1931.]

Mileto fue el principal puerto y el más rico mercado de Jonia. La ciudad se levanta entre dos golfos, cerca de la desembocadura del río Meandro. El comercio marítimo fue el origen de la grandeza de Mileto, comercio activado por la existencia de muchas colonias milésicas en las costas del Propontis (Mar de Mármara) y del Euxino (Mar Negro).

Después de la derrota de Creso, último rey lidio, a manos del rey persa Ciro (año 546 a.C.) y la conquista de Lidia, Jonia cayó bajo el imperio persa. Mileto recibió un trato más favorable, permitiéndole cierta independencia. En el año 496 a.C. fue aplastada una revuelta jónica encabezada por Mileto y la ciudad fue destruida. Se la reedificó en Micalá, al norte del río Meandro, en el 479 a.C., al ser derrotada la flota persa a mano de los griegos; Mileto sin embargo nunca recuperó su gloria anterior.

1.2.3. Tales de Mileto:

Tales es considerado como el iniciador, el padre de la filosofía y la ciencia jónica. Sabemos muy poco de él, ni siquiera conocemos con certeza el período en el cual vivió. Nació hacia el 624 a.C. (o tal vez el 640 a.C.) y vivió alrededor de 78 años. Pudo haber tenido antepasados fenicios. Parece que cuando joven viajó por Egipto y tal vez Mesopotamia, donde habría adquirido una buena cantidad de conocimientos matemáticos y astronómicos.



Thales of Miletus

La cosmología de Tales, pese a ser muy primitiva, representa un gran paso adelante pues es un intento de explicar racionalmente el cosmos. Supone que la Tierra es un disco circular, rodeada del agua del océano y que flota en el agua. Buscando la unidad del mundo supone que el agua es el primer principio de todas las cosas. Aristóteles escribe: *"Sobre la cantidad y la forma de este primer principio, hay opiniones diversas. Tales, el fundador de esta clase de filosofías dice que es el agua (de acuerdo a esto dice que la Tierra descansa en agua), obteniendo la idea supongo yo, porque él vio que el alimento de todos los seres vivos es líquido y que el mismo calor se genera de humedad y persiste en ella (dado que aquello de lo cual las cosas surgen es su primer principio) y obtiene esa idea del hecho que los gérmenes de todos los seres son de naturaleza húmeda"*. Así nos explica Aristóteles porqué Tales adoptó el agua como el primer principio. Sarton (Vol. I, p.211) nos

agrega más argumentos. El agua es uno de los pocos elementos (tal vez el único) que resulta familiar en sus tres estados: sólido (hielo y nieve), líquido y gaseoso como vapor. No es difícil correlacionar las nubes, la niebla, el rocío, la lluvia, el granizo, la nieve, el agua de los ríos, los océanos. Es además bastante obvia la presencia de agua como factor vital para plantas y seres vivos.

Tales es conocido como geómetra. Varias proposiciones geométricas le son atribuidas; entre ellas la semi-circunferencia que lleva su nombre. Parece haber desarrollado aspectos prácticos de geometría que le permitía calcular altura de montañas, distancias a barcos en alta mar, etc. También parece haber conocido y realizado estudios sobre la piedra imán. Por eso se lo considera el padre del estudio del magnetismo.

Explica los temblores como agitaciones en el agua que soporta a la Tierra. La bóveda celeste estaría limitando al mundo por arriba. Se le atribuye el haber sido capaz de predecir un eclipse solar en el año 585 a.C. Dado lo rudimentario de su esquema cosmológico resulta difícil de creer que en verdad haya predicho el eclipse. Es mucho más probable que uno de sus contemporáneos, después de ocurrir el eclipse, iniciara el rumor de que Tales lo predijo. Tales fue considerado como sabio y hoy día es muy difícil separar la verdad de la ficción de lo que sobre él se ha escrito.

Diógenes Laercio atribuye a algunas fuentes la versión de haber sido Tales quien midiera el diámetro angular del Sol como equivalente a $\frac{1}{720}$ de un círculo. La versión de la historia dada por Apuleo es la siguiente: *“El mismo Tales en sus días postreros desarrolló un maravilloso cálculo acerca del Sol el cual no tan sólo he aprendido sino verificado por experimentos, mostrando cuantas veces cabe el Sol en el tamaño del propio círculo que describe. Tales se dice haber comunicado el descubrimiento al poco de haberlo hecho a Mandrólito de Priene, el cual quedó encantado con esta nueva e inesperada noticia y le preguntó a Tales que le dijera cuanto debía pagarle como derecho de autor por tan importante conocimiento. “Yo estaré suficientemente pagado – replicó el sabio- si cuando usted se lo cuente a la gente les dice que lo aprendió de mí y no toma usted el crédito del descubrimiento y me nombra a mí y no a otro como el descubridor”.* Dado lo primitivo del sistema de mundo de Tales es difícil de creer que el resultado lo diese como lo sugiere Diógenes (Tales no creía que los astros, el Sol incluido, diesen una vuelta completa en torno de la Tierra). Si es que en verdad Tales conocía el diámetro del Sol lo más probable es que lo obtuviese de los egipcios o babilonios. Cleómedes dice que con un reloj de agua se puede comparar el agua que fluye mientras sale el Sol y compararla con el agua que fluye en un día y una noche completa y el resultado es de 1 en 750; nos dice además que este resultado lo obtuvieron primero en Egipto. También ha sido sugerido que los Babilonios, en el siglo sexto antes de Cristo sabían que el Sol tarda en su salida $\frac{1}{30}$ de hora, esto es dos minutos. El diámetro del Sol, correspondiente a medio grado o dos minutos de tiempo no fue conocido en el mundo griego hasta dos o tres siglos después de Tales, y se atribuye su “descubrimiento” en el mundo helénico a Aristarco de Samos, como veremos más adelante.

Tales aprendió de los egipcios que el año tiene una longitud de 365 días. Es posible que también usase la ordenación de los meses que tenían los egipcios (el año

tenía 12 meses de 30 días y luego agregaban 5 días extra; los griegos en cambio usaban meses lunares de 29 y 30 días alternados, pero cada tres años debían agregar un mes extra para que no se les desfasara el calendario).

Se dice que Tales habría sostenido que lo más difícil es conocerse a sí mismo. A la pregunta ¿qué es necesario para llevar una vida totalmente virtuosa? Habría respondido: *"no haciendo jamás aquello que reprobamos en los demás"*. Terminemos este relato sobre Tales, citando una anécdota que nos refiere Aristóteles: *"Por sus conocimientos astronómicos, Tales sabía, cuando aún era invierno, que en el año siguiente habría una gran cosecha de aceitunas. Y de ahí que, disponiendo de poco dinero, realizara los depósitos necesarios para usar todas las prensas de aceite de Quías y de Mileto que alquiló a bajo precio, pues nadie competía con él. Cuando llegó la época de la cosecha y de improviso muchos fueron tomados desprevenidos, se las alquilaba por el precio que quería, e hizo gran cantidad de dinero. Con eso demostró al mundo que los filósofos pueden enriquecerse fácilmente, si es tal su deseo, aunque su ambición sea de otra naturaleza"*. Platón nos cuenta que en cierta ocasión Tales se cayó a un pozo por estar mirando las estrellas; bella metáfora de un sabio que conoce los astros distantes pero no sabe lo que tiene bajo sus pies.

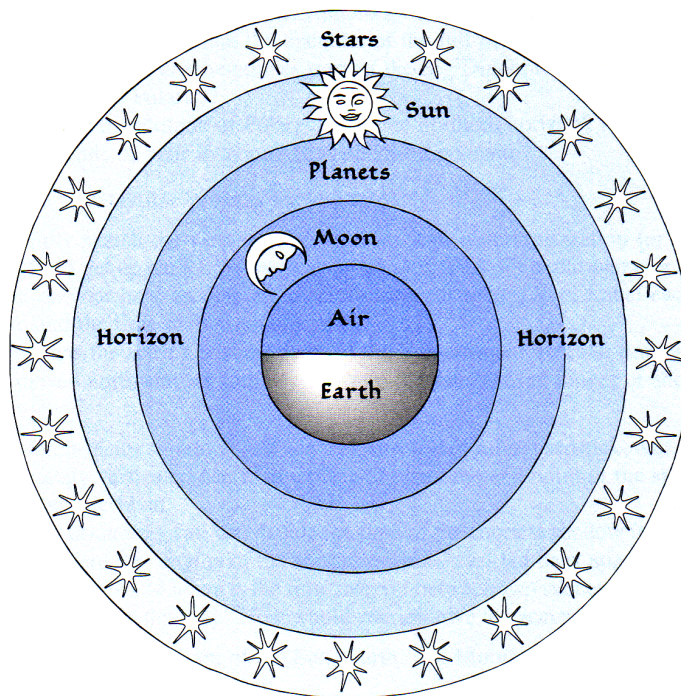
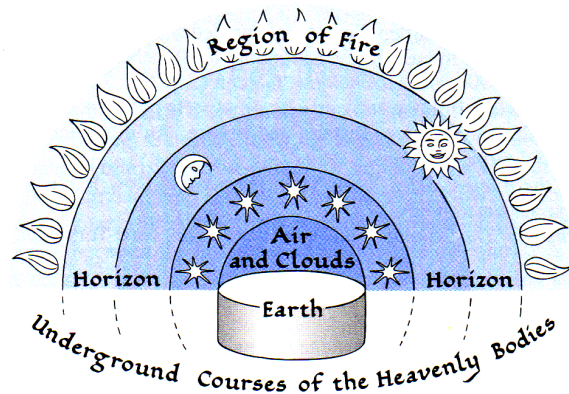
1.2.4. Anaximandro de Mileto:



Segundo filósofo de la escuela jónica. Contemporáneo de Tales, unos quince (o 30) años menor que él (parece haber nacido hacia el año 610 a.C. y muerto hacia el año 545 a.C.). Puede haber sido su discípulo, o al menos, debe haber recibido una guía y un estímulo de Tales.

Su mejor obra científica corresponde al campo de la astronomía mediante un único instrumento: el gnomon. Inventado en Babilonia y Egipto, es un instrumento tan simple que pudo ser reinventado por Tales o Anaximandro. Es una estaca o vara fija verticalmente al suelo. Observando la sombra que arroja el gnomon a distintas horas del día y en distintas épocas del año se puede ir observando varias cosas interesantes. La dirección de la primera sombra que arroja el gnomon al salir el Sol, va cambiando a lo largo del año, oscilando en torno a la dirección del punto cardinal oeste. La sombra alcanza un valor mínimo cada día, que ocurre al mediodía verdadero del lugar. Esta sombra mínima va cambiando en longitud a lo largo del año, alcanzando su mínimo valor el

día del solsticio de verano y su máximo valor el día del solsticio de invierno [para cualquier punto de la Tierra más alejado del Ecuador que los trópicos, a una latitud de 23,5 grados]. El gnomon, si se calibra, constituye además un reloj de Sol. El gnomon permite calcular al astrónomo las longitudes del año y del día, los puntos cardinales, el meridiano, el mediodía verdadero, los solsticios y los equinoccios y la longitud de las estaciones.



(upper) Anaximander (ca. 611–547 B.C.E.) assumed that the inhabited Earth was the flat top of a cylinder that was surrounded by transparent shells containing celestial bodies at different distances. Note that the stars were made nearer the Earth than the Moon, even though the latter occults stars. The shells extended somewhat below the horizon to account for the appearance and disappearance of celestial objects as they rose and set.

(lower) About a century after Anaximander's death, Leucippus held that the Earth was a hemisphere capped by a hemisphere of air. Concentric transparent spheres supported the Moon, Sun, planets, and stars.

Las respuestas astronómicas que podemos obtener de este simple instrumento dependen de nuestra habilidad para formular las preguntas, lo que a su vez depende de nuestro grado de conocimientos. Es muy valiosa entonces la introducción del gnomon en el mundo griego, hecho que generalmente se atribuye a Anaximandro.

Anaximandro critica la teoría cosmológica de Tales y abandona el agua como primer principio. La sustancia fundamental no puede ser una de las formas que la materia adopta sino algo más fundamental. Las diversas formas están en permanente disputa: lo caliente y lo frío, lo húmedo y lo seco. Si una de esas formas de materia fuese la fundamental ya se habría roto el equilibrio y habría vencido sobre las otras. Propone como materia original una sustancia abstracta que denomina *apeirón* (lo ilimitado), cuya propiedad fundamental es la de ser infinita e indeterminada. El mundo surge del *apeirón* y al final a él volverá. El Universo es de duración infinita en un espacio sin límites. El movimiento circular es eterno y es fuente del poder universal, creación y destrucción.

Según Anaximandro la Tierra es plana, de un espesor equivalente a $\frac{1}{3}$ de su diámetro, en el centro del mundo. Por estar en esa posición central no tiene tendencia a caer en ninguna dirección pues equidista de todas las partes de la esfera. Supone que el cielo es de naturaleza ígnea y de forma esférica (esfera completa) en torno a la Tierra. La atmósfera terrestre está contenida en estas esferas. Supone que lo más cercano a la Tierra es la esfera de las estrellas fijas (a 9 diámetros terrestres), luego la esfera de la Luna a 18 diámetros terrestres y luego el Sol a 27 diámetros terrestres. Supone que los cuerpos celestes son ruedas que giran en torno de la Tierra que contienen una sustancia de naturaleza ígnea en su interior y que es posible apreciarlas en un agujero de la rueda, que es todo lo que vemos del cuerpo celeste. El orificio del Sol sería del tamaño de la Tierra. Los eclipses resultan de obturaciones de los respectivos orificios.

Es interesante notar que, pese a lo erróneo que es suponer "la esfera de las estrellas fijas" como lo más cercano a la Tierra, eso implica que el universo más allá del Sol y los planetas no tendría un límite que va muy bien con su idea de un universo infinito. Poco después de Anaximandro y por varios milenios, el hombre imaginó el universo como una región pequeña y limitada, centrada en la Tierra.

1.2.5. Anaxímenes de Mileto:

Tercer filósofo de la escuela jónica. Vivió hacia mediados del siglo VI a.C. (565 a.C.- 500 a.C., aprox.). Según él las estrellas están fijas a la esfera celeste como clavos. La esfera es sólida de material cristalino, pero no se dice claramente si es una esfera completa o una semiesfera. Esto último parece más probable, pues él supuso que el Sol y las estrellas cuando se ponen no pasan por debajo de la Tierra sino que pasan por detrás de la parte norte, la más alta. También asegura que el firmamento rota en torno a la Tierra "como un sombrero alrededor de la cabeza". Anaxímenes volvió a un primer principio material pero en lugar de agua acepta al aire como la primera causa de todas las cosas. El aire lo llena todo, incluso la Luna y el Sol y los planetas los supone cuerpos planos que no caen a la Tierra pues el aire los sujeta. Anaxímenes

considera al aire como un principio más básico que el agua pues las gotas de lluvia serían aire condensado y el vapor de agua sería agua que vuelve al aire.

Los milésicos rechazaron la causalidad sobrenatural donde eran los dioses los que “hacían llover”, producían los rayos y los relámpagos, etc. Los filósofos milésicos apreciaron que una gran cantidad de fenómenos pueden explicarse naturalmente. Ellos dieron los primeros pasos hacia una comprensión racional de la naturaleza.



1.2.6. Cleóstrato de Tenedos:

Cleóstrato no floreció en Mileto sino en Tenédos, pequeña isla mar afuera de Troya. Anaximandro, gracias a sus estudios del gnomon, obtuvo una idea somera de la oblicuidad de la eclíptica. Plinio cuenta que Anaximandro la descubrió en la Olimpiada cincuenta y ocho (548 a.C. al 545 a.C.), es decir, hacia fines de su vida. Algo después, digamos el año 520 a.C., Cleóstrato haciendo observaciones astronómicas para determinar la fecha exacta de un solsticio descubrió o reconoció los signos del zodiaco.

El zodíaco era conocido desde muy antiguo como la franja del cielo sobre la cual se mueven la Luna, el Sol y los planetas. Cleóstrato posiblemente dividió esas constelaciones en doce partes iguales, los "doce signos del zodíaco". Esta franja zodiacal es bisectada longitudinalmente por la eclíptica. Al reconocer las constelaciones zodiacales Cleóstrato nota su inclinación con respecto al ecuador. El descubrimiento de la oblicuidad de la eclíptica marca la culminación de la astronomía jónica primitiva.

Otra invención que se atribuye a Cleóstrato es la del ciclo de intercalación de 8 años, que contiene un número entero de meses lunares (99):

$$365\frac{1}{4} \times 8 = 2.922 \text{ días} \approx 99 \text{ meses lunares } (29,53057 \times 99 = 2.923,5 \text{ días})$$

Este ciclo era conocido por los babilonios; Cleóstrato pudo haberlo tomado de ellos o haberlo redescubierto.



1.2.7. Jenófanes de Colofón:

Colofón era una de las doce ciudades jónicas (ver mapa de Jonia). Allí se formó Jenófanes viviendo cuando Ciro la conquistó. A raíz de la conquista persa decide abandonar la ciudad y pasa el resto de su vida vagando. Se dice que viajó durante sesenta y siete años. Vivió el período 570 a.C.-470 a.C.. Visitó el sur de Italia y se estableció por un tiempo en Elea, fundando la escuela eleática de filosofía.

Un interesante fragmento que se le atribuye dice "Y Jenófanes es de opinión que hubo mezcla de la tierra con el mar y que la separación se produjo por acción del tiempo, alegando que podía dar como prueba lo siguiente: que en el interior de la tierra y en las montañas se descubren conchillas; afirma también que en Siracusa encontró en las canteras improntas de un pez y de focas; en Pharos, la impronta de una anchoa en el fondo de una roca; y en Malta, partes de toda clase de animales marinos. Y dice que esas cosas fueron engendradas cuando todo estaba depositado en el barro, y que las improntas quedaron cuando el barro se secó, pero que todos los hombres habían perecido cuando la Tierra, precipitándose al mar, se convirtió en barro; luego se produjo un nuevo génesis y que este trastorno ocurrió en todos los mundos".

1.2.8. Parménides de Elea:

Parménides es el verdadero fundador de la escuela eleática, pues Jenófanes fue más bien un poeta. Vivió en la primera mitad del siglo V a.C. Según algunas fuentes fue pitagórico por un tiempo, para luego separarse de ellos.

Sólo acepta como verdad que el ser es y el no ser no es. Niega la existencia del vacío, del cambio, del movimiento, pues, según él, este no puede ser concebido sin espacio vacío.

Considera imposible alcanzar la verdad debido a la imperfección de nuestros sentidos. Nuestros sentidos nos engañan pues parecen mostrarnos cambio y movimiento cuando no lo puede haber.

Parménides fue el primero en plantear, por escrito, la esfericidad de la Tierra. Tal vez Pitágoras lo asumiera primero pero parece ser Parménides el primero en enseñarlo abiertamente en los tiempos anteriores a Platón (siglo IV a.C., primera mitad).

Divide la Tierra en cinco zonas. La zona central, tórrida e inhabitada, extendiéndose hasta los trópicos y más allá.

La verdadera forma de la Tierra se conoció gracias a los reportes de los navegantes que describían las variaciones en altura de las estrellas. Estrellas que salen y se ponen en Grecia se transforman en circumpolares más al norte. Otras, como Canopus, estrella muy brillante del hemisferio austral, que es apenas visible en la isla de Rodas, se ve cada vez más alta sobre el horizonte sur al viajar hacia el sur. Parménides puede sin embargo haber obtenido la forma esférica de la Tierra a fin de que fuese igual en forma al universo que él organizó en una serie de capas concéntricas. La más externa de estas capas, "el olimpo extremo", es una esfera sólida encadenada por Necesidad, para servir como límite al curso de las estrellas. Luego viene una capa formada por materia sutil; luego la capa de la estrella matutina y vespertina (que él sabía que era la misma, Venus); luego colocó al Sol y la Luna, ambos de naturaleza ígnea y de igual tamaño. Sin embargo, también dice que la Luna deriva su luz del Sol. Su cara siempre mira al Sol; brilla con luz prestada. El Sol y la Luna se formaron con materia que se desgarró de la Vía Láctea, el Sol de la materia caliente y

sutil, la Luna de la materia oscura y fría. Las estrellas están aún más cerca de la Tierra. Comete el mismo error de Anaximandro. En el medio del Universo está la Tierra que, por ende, no tiene tendencia a caer en ninguna dirección.

1.2.9. Heráclito de Efeso:

Heráclito floreció hacia el año 500 a.C. Muy contrariamente a los eleatas sostiene que nada está en reposo, que la única verdad es el devenir. El mundo real consiste en un ajustado equilibrio entre tendencias antagónicas. "No es posible bañarse dos veces en el mismo río, porque el agua fresca siempre está fluyendo sobre uno". Otra forma de poner la misma idea es: "Cuesta arriba y cuesta abajo son uno y el mismo". Un camino sube o baja, dependiendo en que dirección nos estemos moviendo. Elige al fuego como el principio fundamental, a partir del cual todo se origina. El Sol según Heráclito brilla más que la Luna pues se mueve en aire más puro. Las estrellas se ven tan débiles debido a su gran distancia.

1.2.10. Empédocles de Agrigento:

Empédocles nació en Agrigento, en la costa de Sicilia, en el año 492 a.C. Filósofo, poeta, vidente, físico, reformador social, en suma, un hombre dotado de tal entusiasmo que mucha gente lo tomaría por un charlatán, mientras otros lo transformaron en un héroe legendario.

Supone que hay cuatro elementos primarios: agua, aire, fuego y tierra. Estos elementos se combinan gracias a dos fuerzas motrices, de naturaleza atractiva y repulsiva, amor y odio, que se combinan en distintas proporciones para producir, con los cuatro elementos, todos los fenómenos de la naturaleza.

Empédocles consideraba al universo finito, sólido y esférico, hecho de aire condensado como cristal. En esta esfera estaban sujetas las estrellas fijas que eran de naturaleza ígnea. La Luna es aire enrollado junto, mezclado con fuego y es plana como un disco e iluminada por el Sol. Suponía la existencia de dos hemisferios separados del cielo, uno de fuego y el otro de aire con un poquito fuego, para explicar la alternancia del día y la noche. Supone que el Sol es una mera reflexión del fuego que rodea la Tierra, sobre la esfera cristalina.

Explica el invierno y el verano como el alternado predominio del aire y el fuego, con sus respectivos hemisferios. Cuando predomina el fuego (verano) el Sol es desplazado hacia el cenit. Al predominar el aire, el Sol baja hacia el sur.

Sabía que los eclipses solares se producen cuando la Luna se interpone entre la Tierra y el Sol. La Luna la sitúa al doble de distancia del Sol que de la Tierra. Como el

Sol no es más que una reflexión, el radio de la esfera cristalina es tres veces el radio de la órbita lunar. La región ocupada por el hombre está llena de perversión, que se extiende hasta la Luna, pero la región de más allá es mucho más pura. Los planetas son masas ígneas que se mueven libremente en el espacio, más allá de la órbita lunar.

La Tierra se mantiene en su posición gracias al rápido giro del cielo en torno de ella.

1.2.11. Leucipo y Demócrito:



Leucipo es el fundador de la escuela atomista. Floreció hacia la mitad del siglo V a.C. Sabemos muy poco sobre Leucipo pues fue eclipsado por su brillante discípulo Demócrito de Abdera.

La escuela eleática había negado el movimiento pues no podía concebir el vacío. La Escuela atomista de Leucipo y Demócrito parten aceptando la existencia del vacío y plantean que la materia está compuesta de un número infinito de cuerpos muy pequeños de tamaño finito e indivisibles, que se mueven en el vacío. Combinando y separando estos átomos se generan y destruyen las cosas. Los átomos son indestructibles, eternos, iguales en calidad pero de distinta forma y tamaño.

En el espacio infinito, el número infinito de átomos produce un número infinito de mundos. Leucipo y Demócrito creían en una Tierra plana.

Demócrito explicó la Vía Láctea como una zona con una mayor concentración de estrellas, explicación muy acertada.

1.2.12. Anaxágoras:

Nacido hacia el año 500 a.C. en Clazomena, en la cercanía de Esmirna, Anaxágoras, de la escuela jónica, fue el primer filósofo distinguido que se establece en Atenas, hacia el año 456 a.C.

La Tierra en un comienzo era como barro y el Sol la secó. Un gran meteorito caído en Aegos Potamoi en el año 467 a.C. atrajo la atención de Anaxágoras. Como cayo durante el día él supuso que había caído del Sol y por lo tanto fue llevado a creer que el Sol es una masa de hierro caliente al rojo, tan grande como el Peloponeso y por lo tanto no muy lejos de la Tierra. Fue el primero en pensar que los siete "planetas" están ordenados así: la Luna, el Sol y los restantes 5 planetas. Este orden fue adoptado después por Platón y Aristóteles. La Luna la supone grande como el Peloponeso, parcialmente ígnea, parcialmente de la misma naturaleza que la Tierra; las desigualdades de su "cara" serían debidas a esta mezcla. También se dice que creyó que había planicies y valles en la Luna. Sabía que recibía su luz del Sol y dio la explicación correcta para las fases lunares y los eclipses lunares y solares.

Su amistad con Pericles le valió enemigos que lo acusaron de ofensas graves a la religión. Fue condenado y murió en el exilio en Lampsacos, en el año 428 a.C.

1.2.13. Escuela Pitagórica:

La escuela pitagórica fue fundada por Pitágoras en el sur de Italia y duró por más de doscientos años. La escuela de los pitagóricos apuntaba principalmente a la interpretación de la naturaleza.

Pitágoras nació en Samos, hacia el año 580 a.C.; se estableció en Crotón, la moderna Taranto, en el sur de Italia hacia el año 540 a.C. o 530 a.C. y murió allí o en el Metaponto hacia el año 500 a.C. Se supone que viajó por el este, obteniendo gran parte de sus conocimientos matemáticos en Egipto y Babilonia.

La idea central de su filosofía es que el número es todo, que el número no tan sólo representa las relaciones entre los fenómenos sino que es la sustancia de las cosas, la causa de cada fenómeno de la naturaleza. Pitágoras y sus seguidores llegaron a esta conclusión al percibir cómo todo en la naturaleza está gobernado por relaciones numéricas, cómo los movimientos celestes se ejecutan con regularidad y cómo la armonía de los sonidos musicales depende de intervalos regulares.

Combinaciones de números pares e impares, según los pitagóricos, producen todo el mundo. El universo está gobernado por la armonía. Se supone que las esferas celestes producen distintos tonos en un gran concierto celestial que nuestros oídos no pueden escuchar porque lo hemos oído siempre, desde nuestro nacimiento. Pitágoras era el único mortal que podía escucharlo, según sus discípulos.



Pythagoras

Los pitagóricos fueron los primeros en hacer una teoría matemática cuantitativa de los fenómenos naturales. Eso es sin duda un gran mérito, pero fueron más lejos. En primer lugar afirmaron que las cosas están constituidas de números como si éstos fuesen entes materiales. Además, muchas de las “similitudes” que ellos creyeron ver entre las cosas y los números son fantásticas. Por ejemplo identifican a la justicia con el número cuatro (el primer cuadrado) y al matrimonio con el número cinco (que representa la unión del macho, identificado con el número tres, con la hembra, el dos). El número siete es de gran significación pues: “las vocales son siete, la escala musical tiene siete cuerdas, las Pléyades son siete, siete animales pierden sus dientes y los campeones que lucharon contra Tebas fueron siete”. El número siete sigue siendo considerado un número de “buena suerte” hasta nuestros días, pero varias de las razones invocadas por los pitagóricos nos resultan a lo menos incomprensibles hoy.

Pitágoras se supone que fue el primero en llamar cosmos al cielo, como así también afirmar que la Tierra es esférica. También reconoció que Phosphorus y

Hesperus, la estrella matutina y vespertina, eran un mismo cuerpo celeste, el planeta Venus. Es posible que Pitágoras adoptara la forma esférica de la Tierra por razones estéticas, para que tuviera la misma forma que el cosmos.

El pitagórico más importante del siglo V a.C. fue sin duda Filolao.

1.2.14. Filolao de Tarento:

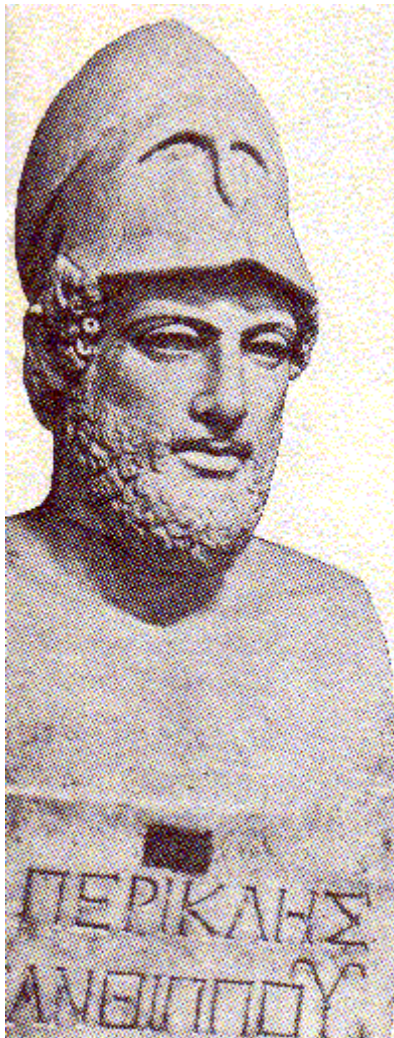
Filolao, oriundo de Tarento, vivió alrededor de la segunda mitad del siglo V a.C. (fue contemporáneo de Sócrates).

Desarrolló un sistema del mundo cuyo rasgo principal es que la posición central del cosmos la ocupa lo que él llama el fuego central. En torno al fuego central giran la Tierra y los planetas. La Tierra gira en torno al fuego central en 24 horas, de modo que siempre presenta la misma cara hacia la parte externa, la zona habitada de la Tierra. Entre la Tierra y el fuego central gira un planeta hipotético, llamado anti-Tierra. Este

planeta extra se supone que se introduce para completar el número de 10 cuerpos móviles: los 5 planetas, el Sol, la Luna, la Tierra y la esfera de las estrellas fijas, que junto con la anti-Tierra completan 10 cuerpos, número divino. La sucesión del día y la noche se obtiene de la traslación de la Tierra en torno al fuego central. La anti-Tierra también gira en torno al fuego central en 24 horas, ocultándolo siempre de la vista de la Tierra. Se supone que en las antípodas de Grecia se podría ver la anti-Tierra, eclipsando en forma permanente al fuego central.

Fuera de la órbita de la Tierra estaría la Luna completando un giro en $27\frac{1}{2}$ días. Más allá estarían el Sol y los planetas. Filolao pensaba que el Sol no era luminoso por sí mismo sino un cuerpo de naturaleza vítrea, porosa, que absorbía la luz invisible del Olimpo, la esfera más externa y la luz del fuego central, materializándola para hacerla visible a nuestros ojos.

1.2.15. Paréntesis histórico:



Hasta aquí hemos hablado de pensadores pre-socráticos. Sócrates marca un hito fundamental en el pensamiento filosófico griego. Su vida cubre la segunda mitad del siglo V a.C. que coincide con el clímax y el comienzo de la decadencia de Atenas.

Hacia fines del siglo VI a.C. los persas dominaban gran parte del Asia occidental, incluido Egipto. La rivalidad marítima entre griegos y fenicios hizo que estos últimos se aliaran a los persas en contra del mundo griego. La lucha que se estableció entre griegos y persas fue larga y violenta. Durante la segunda mitad del siglo VI a.C. Jonia estuvo bajo dominio persa. Al comenzar el siglo V a.C. Atenas desarrolla un gran poder naval gracias a la visión de Temístocles. En Maratón, en el año 490 a.C., los griegos derrotan al ejército persa de Darío. En las Termópilas, en el 480 a.C., mueren Leonidas y sus 300 espartanos. Ese mismo año la flota ateniense destruye a la flota persa de Jerjes en Salamina. Al año siguiente los persas saquean Atenas. Ese mismo año sin embargo los griegos vencen a los persas en Platea y otra flota persa es destruida en las afueras de Micala por la flota aliada griega. A partir de ese momento la libertad de Grecia quedó asegurada. Transcurren 50 años hasta el comienzo de la Guerra del Peloponeso. Ese período de paz es el más fecundo de la Grecia clásica, entre el 480 y el 430 a.C. Atenas es la ciudad líder del mundo griego y los últimos 30 años de ese período están dominados por la figura del gran estadista ateniense Pericles (490 a.C. al

429 a.C.). Cabe recordar de esta época al genial escultor Fidias (490 a.C. al 432 a.C.),

los tres creadores de la tragedia griega Esquilo (525 al 456), Sófocles (495 al 405) y Eurípides (384 y vivió hasta edad avanzada) y el principal exponente de la comedia: Aristófanes (448 a.C. al 386 a.C.). De este período es también Sócrates (470 a.C. al 399 a.C.).

Las últimas tres décadas del siglo V a.C. marcan el comienzo de la decadencia griega, con la guerra civil entre atenienses y espartanos. Vencen estos últimos en el 404 a.C.

1.2.16. Platón:

Platón nació hacia el 427 a.C. y murió el año 347 a.C. Nunca se interesó mayormente por las ciencias físicas. La idea es a su juicio el único objeto de conocimiento. La oposición entre forma y materia permite solamente alcanzar la verdad en el mundo de las ideas, eternas e inalterables, más no en el mundo físico, la región de lo contradictorio e incompleto, donde a lo más se puede alcanzar un alto grado de probabilidad por medio de la matemática.



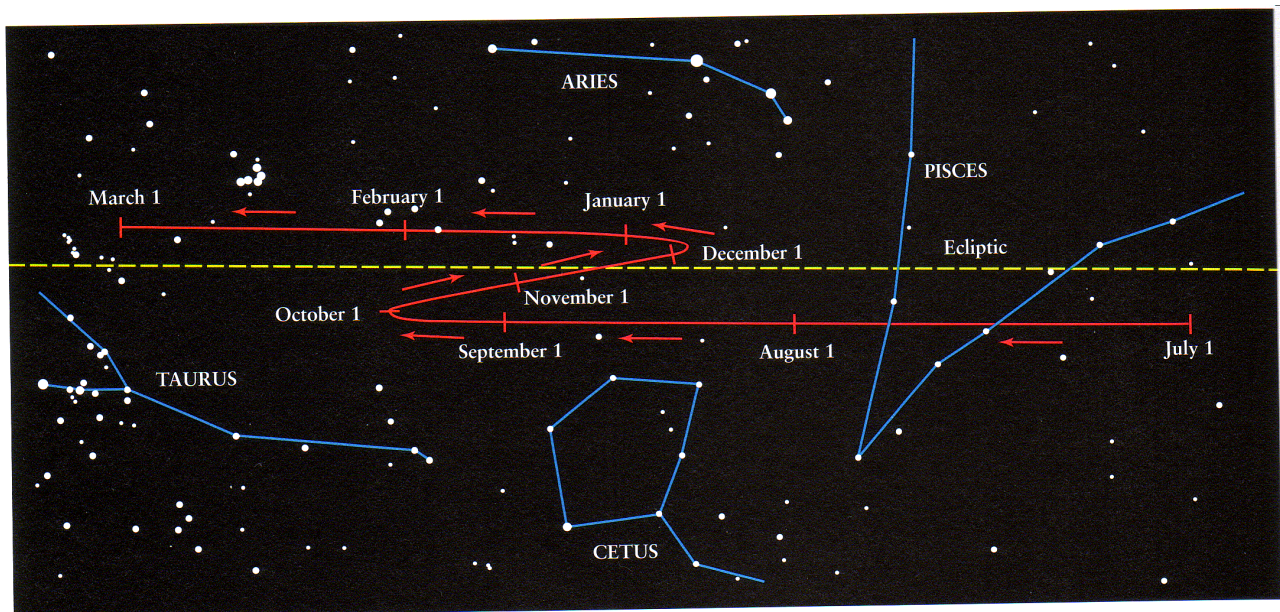
Mientras la oposición entre idea y materia es muy fuerte si tratamos de investigar los detalles del mundo externo, ella desaparece al ver a este último como una totalidad, el mundo es entonces visto como el lugar donde las ideas rigen totalmente, como el Cosmos, el Ser viviente perfecto, formado a imagen de Dios, como una obra de arte divina. En sus proposiciones acerca de la construcción del mundo, Platón nunca desciende a los detalles y ellas no son siempre fáciles de seguir, pues tienen más bien el carácter de una representación intelectual y están fuertemente mezcladas con ilustraciones mitológicas.

Es en su diálogo titulado *"El Timeo"* donde Platón describe su visión del Cosmos. De acuerdo a Platón, Dios creó el mundo y le dio la forma más perfecta, la de una esfera. El alma del mundo fue puesta por su creador en el centro, extendiéndose a través de todo, esparramándose sobre su superficie, siendo tanto en edad como en esencia anterior a su cuerpo.

Platón, bajo influencia pitagórica, deriva las distancias a los planetas de dos series de números: 1,2,4,8 y 1,3,9,27. Ordena los cuerpos celestes del siguiente modo: Luna 1, Sol 2, Venus 3, Mercurio 4, Marte 8, Júpiter 9, Saturno 27.

1.2.17. Eudoxio de Cnidos:

Eudoxio de Cnidos (408 a.C., 355 a.C.) fue discípulo de Platón y según Simplicio, por sugerencia del maestro, aplicó su inventiva a la solución del problema de los movimientos planetarios. A veces se llama problema de Platón al de representar los movimientos de los cuerpos celestes, la Luna el Sol y los planetas, mediante movimientos circulares uniformes, *"únicos dignos de la perfección de los cuerpos celestes"*. En el tiempo de Platón ya se conocían irregularidades en el movimiento aparente de los planetas en el cielo. Al movimiento general hacia el este, a lo largo del zodíaco, se agregan períodos en que la velocidad del planeta cambia notablemente, llega a detenerse, caminar hacia atrás (hacia el oeste) en lo que se llama una retrogradación, para luego volver a detenerse y reasumir su movimiento hacia el este.



La figura muestra el movimiento de Marte en el cielo para los años 2005 y 2006. Marte tendrá un movimiento retrógrado entre el 1 de Octubre y algo después del 1 de Diciembre del 2005.

Eudoxio postuló un elegante sistema de esferas homocéntricas para explicar el movimiento planetario. Al planeta lo supone fijo al ecuador de una esfera, centrada en la Tierra, que gira uniformemente respecto a sus polos. Estos polos son arrastrados por una esfera concéntrica, que gira uniformemente con respecto a otro eje, cuyos polos son a su vez arrastrados por una tercera esfera. Con 4 esferas logra representar el movimiento de los planetas. El sistema funciona de este modo: la esfera más externa gira en 24 horas y su eje es paralelo al eje del mundo; da cuenta entonces de la rotación diurna.

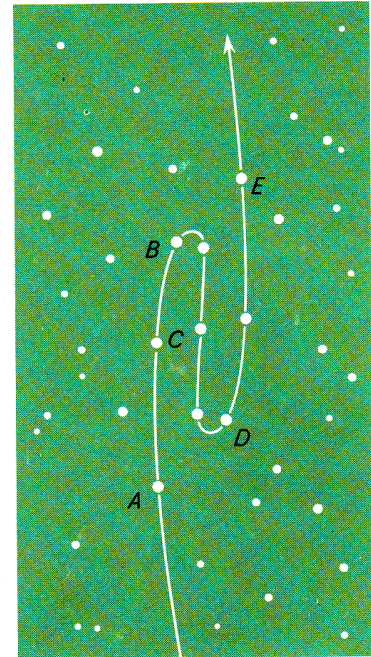
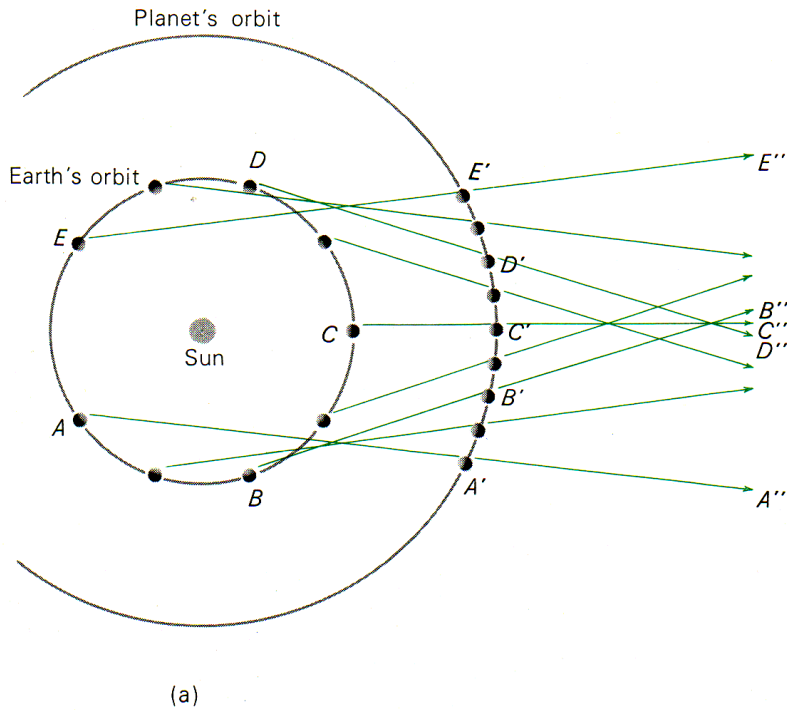
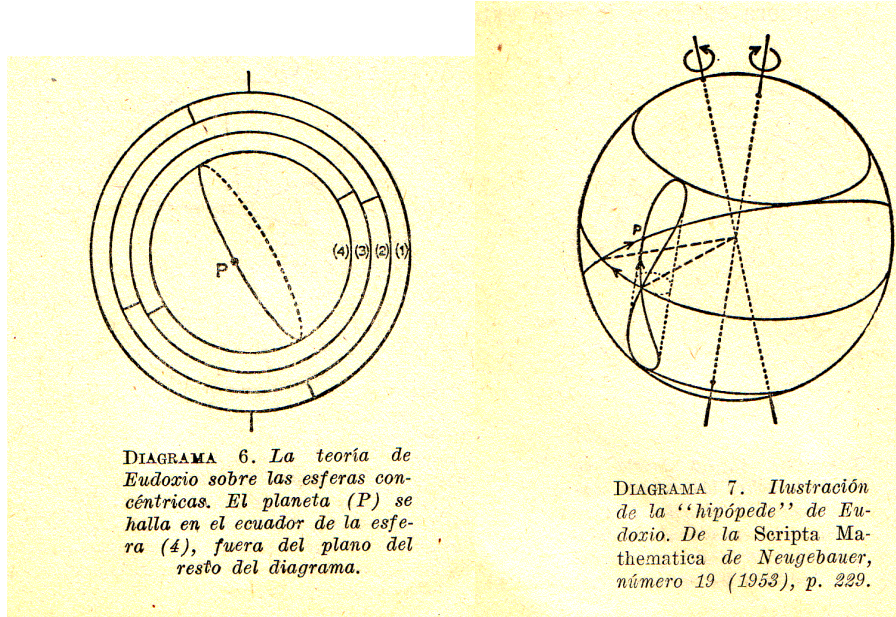


FIGURE 2.14 Retrograde motion of a superior planet. (a) Actual positions of the planet and earth; (b) the apparent path of the planet as seen from the earth, against the background of distant stars.

El movimiento retrógrado de un planeta se produce por la combinación del movimiento del planeta y el de la Tierra. La Tierra tiene una mayor velocidad que un planeta exterior.



La esfera siguiente reproduce el movimiento del planeta a lo largo del zodiaco, siendo su eje perpendicular al plano de la eclíptica y su período de revolución el período

sideral del planeta, es decir, el tiempo empleado en aparecer en la misma zona del zodiaco.

La tercera y cuarta esfera (el planeta está fijo a esta última) se utilizan para reproducir las retrogradaciones y representan el ingenio geométrico de Eudoxio. Los polos de la tercera esfera están puestos sobre la eclíptica, es decir, en el ecuador de la segunda esfera. La cuarta esfera gira en torno a un eje inclinado con respecto al eje de la tercera esfera. Las dos esferas rotan a la misma velocidad pero en sentido contrario. El giro de las dos esferas hace que un punto en el ecuador de la esfera más interior genere una curva que Eudoxio llamó *hipópede*, que hoy se conoce como *lemniscata esférica*. Esta curva resulta de la intersección de una esfera y un cilindro una de cuyas generatrices es tangente a la esfera.

Para el Sol y la Luna Eudoxio propuso sólo tres esferas: una para el movimiento diurno, otra para el movimiento a lo largo del zodiaco y la tercera para explicar las desviaciones con respecto a la eclíptica. Para el movimiento lunar la teoría de Eudoxio está bastante bien lograda. La primera esfera reproduce el movimiento diario la esfera intermedia gira lentamente, de oriente a poniente, completando un giro en 223 lunaciones, período en el cual giran los nodos de la órbita lunar. La tercera esfera de la luna gira de poniente a oriente en un mes draconístico (tiempo que transcurre entre dos pasos consecutivo de la Luna por el mismo nodo lunar). Para el Sol, por simetría con la órbita lunar, Eudoxio mantiene el mismo esquema de tres esferas donde la primera es igual que la lunar y la tercera transporta al Sol de poniente a oriente, en un año trópico; la segunda, a diferencia de la lunar gira de poniente a oriente y tiene una ligera inclinación con respecto a la eclíptica. No es clara la función de esa segunda esfera.

Un total de 27 esferas representa el cosmos en el sistema de Eudoxio: una esfera para las estrellas fijas, 20 para los 5 planetas, 3 para el Sol y 3 para la Luna.

Eudoxio elaboró su teoría con bastante detalle efectuando estimaciones precisas de los períodos de revolución y de los ángulos de inclinación de los ejes de las esferas. Desgraciadamente no disponemos hoy de las cifras que adoptó Eudoxio en su sistema. Sin embargo, nos ha llegado, a través de diversos comentaristas, una indicación clara de la fidelidad del sistema de Eudoxio. Este daba buenos resultados para las posiciones de Saturno y Júpiter pero fracasaba en cuatro puntos fundamentales:

- i) Cada hipópede producía siempre la misma curva, pero las retrogradaciones observadas de los planetas varían en su forma dimensiones y duración.
- ii) Las soluciones de Eudoxio para Venus y Marte son malas.
- iii) No toma en cuenta la desigualdad de las estaciones.
- iv) Fracasa en la explicación de las variaciones del diámetro lunar y del brillo de los planetas.

Este último fenómeno había sido interpretado correctamente por los griegos como debido a variaciones de la distancia del cuerpo celeste a la Tierra. En el sistema de Eudoxio las distancias permanecen siempre constantes.

El único perfeccionamiento del sistema planteado por Eudoxio lo ejecutó *Calipo de Cizino*, contemporáneo de Eudoxio, algo más joven que él. Calipo agregó 7 esferas para el sistema: 2 para el Sol, 2 para la Luna y una para Marte, Venus y Mercurio. Para Saturno y Júpiter no tuvo necesidad de agregar esferas pues el sistema de Eudoxio daba resultados satisfactorios.

Las dos esferas adicionales para el Sol tienen por objeto dar cuenta de la desigualdad de las estaciones. Calipo determinó el siguiente largo para las estaciones, a partir del equinoccio vernal (comienzo de la primavera para el hemisferio norte): 94, 92, 89 y 90 días, respectivamente. Estas cifras son correctas a la unidad de día, para el año 330 a.C., cuando Calipo hizo su determinación.

Las dos esferas agregadas a la Luna permitían explicar irregularidades en el movimiento lunar a lo largo del zodiaco.

Cabe destacar el hecho que tanto la teoría de Eudoxio como la de Calipo eran construcciones matemáticas para representar el movimiento de los cuerpos celestes. No pretendían ser una descripción física del cosmos.

1.2.18. Aristóteles de Estagira:

Aristóteles nació en el año 384 a.C. en Estagira, Tracia, al norte de la actual Grecia. Llegó a temprana edad a Atenas, donde fue discípulo de la Academia platónica por veinte años. Era cuarenta años más joven que Platón. A la muerte de Platón se fue a vivir algún tiempo al Asia Menor. En el año 342 a.C. Filipo, rey de Macedonia, le dio el trabajo de tutor de su hijo Alejandro a Aristóteles. Después del advenimiento de Alejandro al poder, en el 336 a.C., al morir asesinado Filipo, Aristóteles regresó a Atenas y fundó su propia escuela, el Liceo. Allí realizó una intensa actividad investigadora y didáctica, apoyado posiblemente por Alejandro. Después de dirigir su escuela casi doce años, Aristóteles se vio en apuros políticos debido a su amistad con Alejandro. Al morir éste último se descargó en Atenas el odio en contra del partido macedonio. Aristóteles, como antaño Sócrates, fue acusado de impiedad pero escapó a la amenaza de la sentencia de muerte por medio de la fuga. Al año siguiente, 322 a.C., murió solitario en el exilio.

En cuanto al sistema del mundo Aristóteles acepta el sistema de Eudoxio, pero lo complica dándole carácter material. Duplica el número de esferas de Eudoxio, pues a las cuatro esferas de Saturno, planeta más externo, debe agregar cuatro esferas compensadoras para que el giro de Saturno no se propague a Júpiter. Continúa agregando esferas que contra-roten con lo cual llega a un sistema de 54 esferas cristalinas.



En lugar de partir de las ideas, como Platón, Aristóteles se dirige ante todo a la realidad; tendía, en principio, hacia la observación y la experimentación. Acepta los cuatro elementos primarios de Empédocles: agua, aire, fuego y tierra, como los constituyentes de todas las cosas en el mundo sub-lunar.

En su libro *De Coelo*, Aristóteles asigna el valor de 400.000 estadios a la circunferencia terrestre. Este constituye uno de los enunciados más antiguos sobre el tamaño de la Tierra. Para un estadio de 157,5 metros este valor es un 60% mayor que el verdadero.

De los escritos de Aristóteles queda claro que fenómenos como las fases de la Luna y los eclipses eran perfectamente entendidos en el siglo IV a.C.. De igual modo, la esfericidad de la Tierra era algo bien establecido. Aristóteles cita dos argumentos para mostrar la esfericidad terrestre: la forma del cono de sombra de la Tierra, tal como queda revelado en los eclipses y los

cambios que experimenta la esfera celeste a los ojos de un viajero que se desplace en la dirección norte-sur.

Por casi dos mil años Aristóteles ejerció una influencia extraordinaria sobre la ciencia y la cosmología europea. Pese a que el detalle de su cosmología fue reemplazado por los epiciclos de Ptolomeo, la fundamentación general del sistema geocéntrico siguió siendo la aristotélica. Su sistema filosófico fue adoptado como la base del conocimiento durante la Edad Media por los escolásticos.

1.2.19. Heráclides del Ponto:

Contemporáneo de Platón y Aristóteles, Heráclides vivió durante la mayor parte del siglo IV a.C. Nació en Heraclea, en el Ponto alrededor del año 388 a.C.; emigró a Atenas donde fue discípulo de Speusipo el platónico y posteriormente quizás fue discípulo de Platón. También se supone que frecuentó la escuela de los pitagóricos. Por último parece haber recibido instrucción de Aristóteles. Murió el año 315 a.C.

Sus escritos se han perdido y conocemos la doctrina de Heráclides gracias a las alusiones que de él hacen escritores posteriores. Parece ser que Heráclides aún no había dado a conocer su teoría cuando Aristóteles escribió su libro sobre el cielo (*De Coelo*) pues no es mencionado allí y Aristóteles, si la hubiese conocido, posiblemente la hubiese presentado.

A Heráclides se le atribuyeron dos grandes avances en astronomía. Haber enseñado la rotación de la Tierra en 24 horas y haber supuesto que Venus (y también Mercurio) giran en torno del Sol en lugar de hacerlo alrededor de la Tierra.

Al parecer los pitagóricos siracusanos Hiquetas (escrito también como Hicetas) y Ecfantos sostuvieron antes que Heráclides la rotación diurna de la Tierra. Esto en principio fue considerado una transformación de la idea del fuego central de Filolao. Teofrasto, discípulo de Aristóteles, nos refiere así la idea de Hiquetas y Ecfantos: “[la Tierra] al girar sobre su eje con gran velocidad, produce los mismos fenómenos que produce cuando se supone fija y al cielo móvil”. Se afirma que Ecfantos e Hiquetas eliminan la anti-Tierra y colocan al fuego central, Histia, en el mismo centro de la Tierra (que obtiene de allí su propio calor) y del mundo. La Tierra gira de occidente a oriente, en torno a su centro, en un día sideral, mientras el cielo de los astros fijos permanece absolutamente inmóvil. Es un geocentrismo con rotación terrestre. Heráclides puede sin embargo, haber sostenido la idea de la rotación terrestre por sí mismo.

Calcidio en su comentario sobre El Timeo, nos dice que Heráclides deja que Venus gire en torno del Sol, en lugar de en torno a la Tierra, de modo que a veces está más cerca y otras más lejos de nosotros que el Sol. Calcidio no menciona a Mercurio pero da la impresión que él se refiere a ambos, Mercurio y Venus, los dos planetas interiores, cuando habla de Venus. El sistema tenía también la ventaja de explicar las variaciones de intensidad luminosa (por lo tanto de magnitud y de distancia a la Tierra) de Venus, variaciones observadas desde muy antiguo. La idea de la rotación de Venus y Mercurio en torno del Sol se ha atribuido a astrónomos egipcios y que Heráclides lo habría tomado de ellos. Pese a que no hay razones valederas para privar a Heráclides del mérito de la idea se conoce como sistema egipcio al sistema geocéntrico, *con una Tierra inmóvil en su centro*, con el Sol, Marte, Júpiter y Saturno girando a su alrededor, cerrado el sistema la esfera de las estrellas fijas y con Mercurio y Venus girando en torno del Sol.

Esta es la primera vez que se atribuye al Sol un rol más destacado en el sistema del mundo. Pese a que se sigue considerando al Sol un satélite de la Tierra, es un primer paso hacia una teoría heliocéntrica. Además el hacer girar a Venus en torno al Sol, el cual a su vez gira en torno a la Tierra, puede haber estimulado el paso de las esferas homocéntricas a los epiciclos desarrollados un siglo más tarde por Apolonio.

1.2.20. Paréntesis histórico:

Al promediar el siglo V a.C. Grecia se encontraba en su máximo esplendor y era Atenas la ciudad que encabezaba la confederación griega, con Pericles como la gran

figura política. Hacia el 430 a.C. pugnas internas en Grecia dan origen a las guerras del Peloponeso. En el 429 a.C. muere Pericles. Finalmente en el 404 a.C. Atenas se rinde ante Esparta. Esparta sin embargo no fue capaz de administrar la grandeza griega. Las luchas intestinas se sucedieron. Durante la primera mitad del siglo IV a.C. fue creciendo el reino de Macedonia al norte de Grecia. Finalmente con la batalla de Queronea Filipo puso fin a la independencia griega, en el año 336 a.C. Filipo fue asesinado al poco tiempo siendo sucedido por su hijo Alejandro. Reina por un período de doce años, desde el 334 a.C. hasta su prematura muerte a los 33 años, en el 323 a.C.



Alexander the Great

Con el Imperio de Alejandro se inicia el período helenístico en la historia griega. Este durará tres siglos, hasta el año 30 a.C. fecha del establecimiento definitivo del Imperio Romano en todo el Mediterráneo.

La inesperada muerte de Alejandro dejó a su imperio sin un líder capaz de administrarlo. Después de largas guerras internas el imperio se dividió en tres zonas principales: Macedonia y Grecia, gobernadas por los Antigonidas; Asia occidental por los Seleucidas; y Egipto por los Ptolomeos.

El General Ptolomeo, hijo de Lagos, macedonio y amigo personal de Alejandro, se convirtió a la muerte de éste en el Sátrapa de Egipto. Gobernó hasta el 285 a.C. y se lo llamó Ptolomeo Soter (el salvador). Lo sucedió su hijo Ptolomeo Filadelfo quien gobernó hasta el 247 a.C. Hubo en total 15 reyes en la dinastía de los Ptolomeo que concluye con Cleopatra y su hijo. Cleopatra era una mujer de gran belleza y

extraordinaria habilidad. Quiso ser emperatriz de Roma y lo hubiese logrado de no morir asesinado su amante Julio Cesar en el 44 a.C. Cleopatra nació el año 69 a.C. y puso fin a su vida el año 30 a.C. al ser derrotada. Luego de un corto reinado de su hijo Ptolomeo Cesarión, quien fue asesinado por orden de Octavio en el año 30 a.C., Egipto pasó a ser una provincia romana.

1.2.21. Alejandría:

Fundada por Alejandro el Magno en el año 332 a.C. en el extremo occidental del delta del Nilo, en el mar Mediterráneo, alcanzó gran auge gracias al patronazgo de los Ptolomeos. Habitaba Alejandría una reducida clase dirigente de macedonios y griegos, más un gran número de nativos egipcios. Había también una numerosa colonia judía.

La ciudad limitaba al norte con el mar Mediterráneo y al sur con el lago Mareotis. Frente al puerto del Mediterráneo, a unos 1500 metros de la costa, se encuentra la isla de Faros, que le proporciona una protección natural al puerto. En la isla de Faros se erigió el famoso Faro de Alejandría, monumento impresionante que alcanzaba una altura de 120 o tal vez 140 metros. Este permitía al navegante atisbar la luz desde una gran distancia mar adentro. Estaba situado en el extremo oriental de la isla de Faros. Fue considerado por muchos como una de las siete maravillas del mundo antiguo. Cabe recordar los jardines colgantes y la muralla de Babilonia, las pirámides de Egipto y el coloso de Rodas entre las maravillas más famosas.

1.2.22. Museo de Alejandría:

De acuerdo a George Sarton: *"Los Ptolomeos fueron también suficientemente griegos para advertir que la prosperidad sin el arte y sin la ciencia carece de valor y es despreciable"*.

El primer rey Ptolomeo, tan pronto puso orden en el gobierno de Egipto y completó la fundación de Alejandría, se preocupó del bienestar espiritual y desarrollo cultural. Con ese fin fundó el *Museo de Alejandría*.

Un museo es un templo consagrado a las musas, las hijas de Zeus, diosas patronas de las humanidades. Ellas son nueve: **Clío**, musa de la historia; **Euterpe**, de la poesía lírica; **Talía**, de la comedia y la poesía alegre; **Melpómene**, de la tragedia; **Terpsícore**, de la danza y de la música; **Erato**, de la poesía erótica; **Polimnia**, de la poesía sacra; **Urania** de la astronomía y **Calíope** de la poesía épica. Demetrio de Faléreo y Estratón de Lampsacos son los dos fundadores del Museo, junto con los dos primeros reyes Ptolomeos. Tanto Demetrio como Estratón provenían del Liceo de Atenas; ambos habían sido discípulos de Teofrasto, sucesor de Aristóteles en el Liceo. Estratón, descrito como físico por su dedicación al estudio cuidadoso de la naturaleza, le imprimió al Museo una línea científica. El Museo estimuló a los hombres de ciencia, transformándose en una escuela científica y no en una mera academia literaria o filosófica. La presencia de Urania entre las musas aseguró un interés por el cultivo de la Astronomía en el Museo de Alejandría.

1.2.23. Euclides de Alejandría:

Aunque no nos concierne a nosotros aquí directamente no podemos dejar de mencionar al más grande geómetra de la antigüedad, el magnífico Euclides, como uno de los grandes científicos que honraron a Alejandría en sus albores.

Nacido en Atenas (probablemente) se traslada a Alejandría hacia finales del siglo IV a.C., bajo el reinado de Ptolomeo Soter. El libro *"Los Elementos"* constituye el más grande tratado de geometría. Afortunadamente ha llegado hasta nosotros. En él se exponen de modo magistral las bases de la geometría que ha llegado a conocerse como geometría euclidiana. En los trece libros que componen *"Los Elementos"* se

tratan los tópicos generales de geometría plana, la teoría de proporciones y magnitudes, la naturaleza y propiedades de números enteros, geometría de sólidos. Euclides utiliza definiciones, postulados, axiomas y proposiciones. La organización del libro de Euclides sirvió de inspiración a numerosos tratados posteriores en la Edad Media y el Renacimiento, llegando a constituir el modelo del libro de Newton, los *Principia*, de 1687.

1.2.24. Aristarco de Samos:

Aristarco fue el primer astrónomo que planteó que el Sol es el centro del sistema planetario, atribuyendo a la Tierra el doble movimiento de rotación en torno a su eje en 24 horas y de traslación en torno al Sol en el curso de un año. Esta formulación heliocéntrica del sistema del mundo no está contenida en el único libro de Aristarco que conocemos. Sin embargo los comentarios de sus contemporáneos y sucesores son lo suficientemente claros como para que no quepa duda sobre la naturaleza del sistema propuesto por Aristarco.

Sabemos muy poco sobre la vida de Aristarco. Probablemente se dirigió a Atenas donde fue discípulo de Estratón quien después de ayudar al rey Ptolomeo II con el Museo de Alejandría, volvió a Atenas a hacerse cargo del Liceo entre los años 286 al 268 a.C., al morir Teofrasto. La única fecha en la vida de Aristarco que conocemos con precisión es que observó el solsticio de verano los años 281 y 280 a.C. Probablemente era un hombre joven cuando hizo esa observación. Era más joven que Euclides y mayor que Arquímedes. Las fechas probables de su nacimiento y muerte son 310 a.C. y 230 a.C. Se puede afirmar que vivió la primera mitad del siglo III a.C.

Arquímedes, su contemporáneo algo más joven, lo menciona a propósito de la idea de que la órbita terrestre alrededor del Sol no sería sino un punto con respecto a la esfera de las estrellas fijas. Plutarco cuenta que Aristarco estuvo a punto de ser acusado de impiedad por haber propuesto el doble movimiento de rotación y traslación de la Tierra. Otros comentadores, como Aetius, Estobeo y Galeno, concuerdan en decir que Aristarco hacía describir la eclíptica a la Tierra, mientras el Sol tomaba el rango de estrella fija. Tal vez Seleuco, un babilonio, adoptara las ideas de Aristarco, cien años después. Respecto a él el único testimonio existente, de Plutarco, nos dice: “¿ ... *Debemos considerarla [la Tierra] como giratoria? ... Aristarco y Seleuco sostuvieron esta última opinión; es cierto que el primero la dio como hipótesis, en el sentido platónico; el segundo la realizó.*” Con esa posible excepción, la idea de Aristarco no tuvo seguidores. Fueron necesarios 18 siglos para que Copérnico retomara la idea heliocéntrica de Aristarco.

Es interesante plantearse la pregunta ¿cómo llegó Aristarco a concebir su sistema?. Desgraciadamente sólo podemos hacer conjeturas sobre la verdadera respuesta, pues no nos lo dice en su libro, el único que ha sobrevivido hasta nuestros días. Según Simplicio el sistema de las esferas homocéntricas fue abandonado después de Aristóteles pues no podía explicar, entre otras cosas, las grandes variaciones de brillo de Marte y Venus. Como ya se explicara al hablar de Eudoxio, las

variaciones del diámetro lunar también eran fuente de problemas para la teoría de las esferas homocéntricas. Ambos fenómenos pueden ser salvados si se acepta que las órbitas son excéntricas con relación a la Tierra.

Marte alcanza su brillo máximo cuando está en el meridiano a la media noche, es decir, cuando está en oposición al Sol. Por lo tanto el centro de la órbita de Marte debe estar sobre la recta que une a la Tierra y el Sol. Esa recta no está fija, por lo tanto, el centro de la excéntrica giraría en torno a la Tierra en un año. El planeta describe la excéntrica en el período sinódico. Estos excéntricos móviles los conocía Apolonio y posiblemente Aristarco.

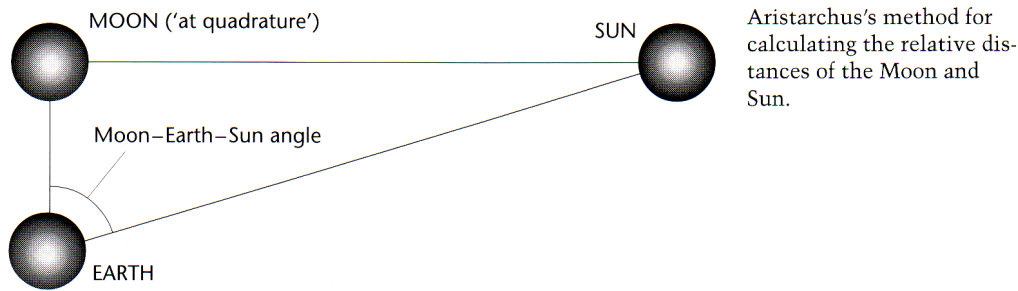
Heráclides parece haber adoptado, para Mercurio y Venus, una solución en esa dirección pero Aristarco va lo suficientemente lejos para suponer que el centro de la excéntrica coincide con el Sol. Posiblemente Aristarco generalizó esto a todos los planetas y luego se dio cuenta que el sistema presentaba mayor simetría y belleza si se aceptaba la idea de que la Tierra era otro planeta más girando en torno al Sol. La razón más poderosa que Aristarco debe haber tenido en este punto es que, como veremos a continuación, él midió el diámetro del Sol y lo encontró 7 veces mayor que la Tierra. Siendo 7 veces mayor es razonable que sea el Sol el centro del sistema. El giro de los cielos en 24 horas se lo atribuyó entonces a la rotación de la Tierra.

El sistema de Aristarco no tuvo éxito. ¡Nadie lo consideró seriamente por 18 siglos! ¿Porqué razón? Hubo varias. En primer lugar va en contra de la física de la época. Aceptar el sistema de Aristarco implicaba automáticamente renunciar a la física aristotélica. Sin el concepto de inercia, sin la idea que en ausencia de fuerzas la velocidad se mantiene constante, etc. no se entiende el sistema heliocéntrico. En ese sentido la teoría de Aristarco era totalmente revolucionaria. En segundo lugar, por ser una teoría muy poco elaborada no podía explicar muchas irregularidades del movimiento de los cuerpos celestes, perfectamente bien conocidas en la época de Aristarco. La complicación mayor la introduce la elipticidad de las órbitas. Es decir, la simple idea de órbitas circulares en torno al Sol no permite un buen acuerdo entre el cálculo y las observaciones.

1.2.25. Distancia al Sol y la Luna

La Luna y el Sol subtienden el mismo ángulo vistos desde la Tierra (aproximadamente medio grado). Sus distancias a la Tierra son muy distintas, tal como fue ya reconocido por los antiguos. Eudoxio propone al Sol 9 veces más lejos que la Luna. Arquímedes nos cuenta que su padre predecía el valor 12 pero él adoptó el valor 30. No sabemos cómo calcularon esos números. Tal vez usando el método de Aristarco que describiremos a continuación.

Aristarco se dio cuenta que, cuando vemos la Luna en cuarto (creciente o menguante) el triángulo Tierra-Luna-Sol es rectángulo siendo el ángulo en la Luna el ángulo recto. En principio midiendo el ángulo Luna-Tierra-Sol (ángulo "en la Tierra") se puede calcular la razón de las distancias Tierra-Sol y Tierra-Luna.



Aristarco encontró que ese ángulo valía 87° y concluyó que el Sol está 19 veces más lejos que la Luna. Para determinar el valor del ángulo Aristarco supuso que la órbita de la Luna era perfectamente circular, centrada en la Tierra y la Luna la recorre a velocidad constante. Midiendo el tiempo transcurrido entre la Luna en cuarto creciente y cuarto menguante y luego el tiempo entre cuarto menguante y el siguiente cuarto creciente se puede determinar el ángulo Luna-Tierra-Sol.

Aristarco encontró que la Luna tarda un día más entre el creciente y el menguante que entre el menguante y el creciente (15 y 14 días, respectivamente). Con ello $(360/29) \times 14/2 = 87^\circ$. El ángulo en verdad es muy cercano a 90° [$89^\circ 50''$]. Sin embargo la elipticidad de la órbita lunar llevó a Aristarco a la mencionada diferencia de un día. Con ello Aristarco encuentra que la distancia al Sol es 19 veces la distancia ala Luna [$\tan(87^\circ) = 19$].

Un siglo más tarde el gran Hiparco se percató de lo difícil del problema y después de varios intentos, declara que es mejor dejar el problema sin solución. Posteriormente Ptolomeo adoptó el valor de Aristarco.

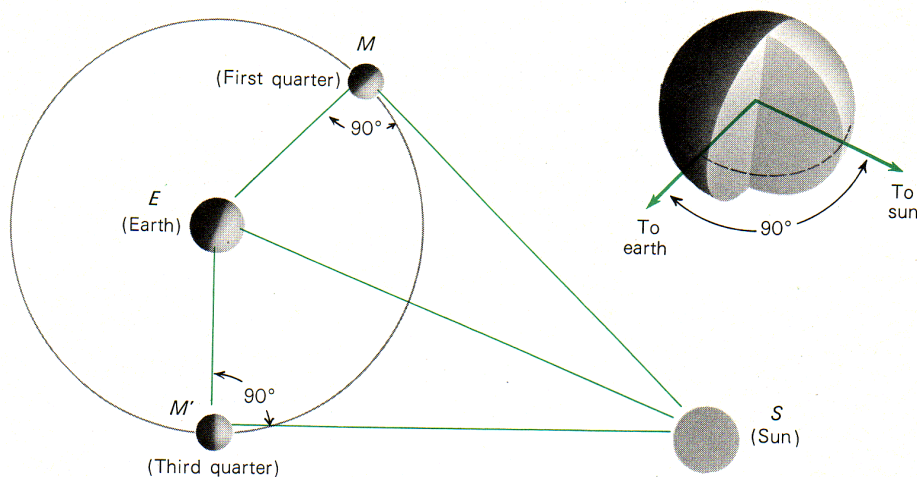
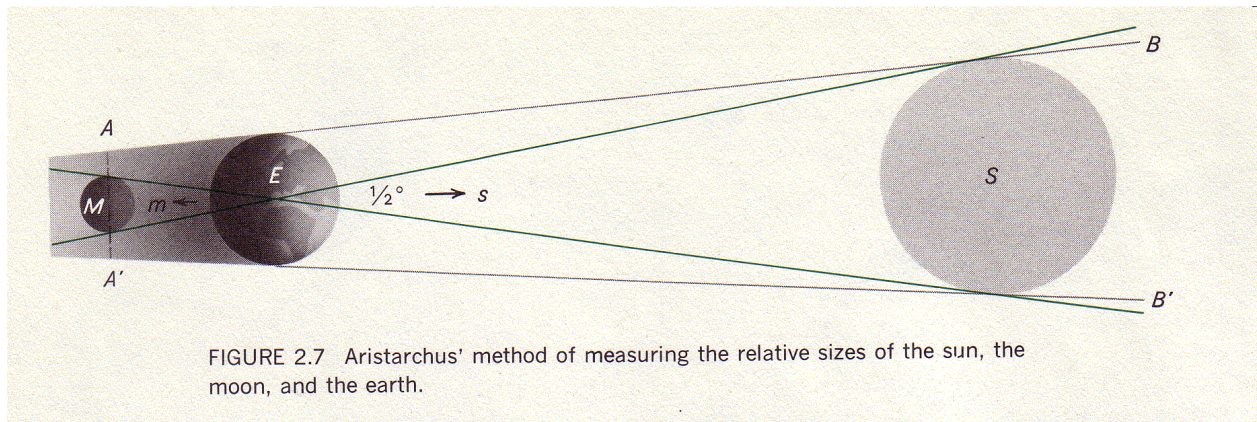


FIGURE 2.6 Aristarchus' method of measuring the relative distances of the sun and moon.

Aún mayor genialidad revela Aristarco con su método para determinar la distancia a la Luna en términos del radio terrestre. El método consiste en determinar el ancho del cono de sombra de la Tierra en términos del diámetro lunar, durante un eclipse de Luna. Aristarco encontró que el cono de sombra de la Tierra es $8/3$ del diámetro lunar. Conocido este valor, el diámetro aparente del Sol y la Luna (medio grado) y la distancia al Sol comparada con la distancia a la Luna, se puede proceder de la siguiente manera:



- Dibujar dos rectas que se corten en E y forme un ángulo de $\frac{1}{2}^\circ$.
- Arbitrariamente situar en un punto M, en la bisectriz de las rectas, el centro de la Luna. El tamaño de la Luna debe ser tal que "llene" el ángulo de $\frac{1}{2}^\circ$.
- Ubicar al Sol en sentido opuesto a la Luna, 19 veces más lejos que la Tierra. Su tamaño debe ser tal que "llene" el ángulo de $\frac{1}{2}^\circ$.
- Dibujar AA' igual a $8/3$ del diámetro lunar.
- Trazar AB y A'B'.
- Dibujar el círculo representando a la Tierra, de modo que AB y A'B' sean tangentes a él.
- Medir los tamaños en el dibujo de la Tierra, la Luna, el Sol y sus distancias.

En principio el método es impecable. En la práctica Aristarco cometió un error inexplicable adoptando 2° para el diámetro del Sol y la Luna. Eso lo llevó a obtener valores incorrectos. Este error de Aristarco ha hecho pensar a varias personas que el libro de Aristarco que ha llegado hasta nosotros debe haber sido escrito por Aristarco en su juventud. Posteriormente parece haber corregido los valores.

La siguiente tabla nos da una idea de las distancias y tamaños, tal como lo adoptaron los grandes astrónomos de la antigüedad.

	Aristarco	Hiparco	Ptolomeo	Valor moderno
Distancia Luna	20	60,5	59	60,3
Radio Luna	$1/3$	0,29	0,294	0,272
Distancia al Sol	400	2.550	1.210	23.400
Radio Solar	7	$12 \frac{1}{3}$	5,5	109.

[Valores en radios terrestres]

Pese a lo erróneo de los valores de Aristarco, éste alcanzó a reconocer claramente que el Sol es mucho más grande que la Tierra y que la distancia al Sol es mucho mayor que la distancia a la Luna.

1.2.26. Eratóstenes:

Eratosthenes and the size of the Earth

Eratosthenes (c. 276–c. 195 BC) was born in Cyrene (in what is now Libya), and after studying in Athens spent the rest of his life in Alexandria, where he was in charge of the famous library that was part of the Museum. Outstanding in several branches of mathematics and geography, he was responsible for a remarkable estimate of the circumference of the sphere of the Earth.

At noon on the day of the summer solstice, in the town of Syene in Upper Egypt, the Sun was directly overhead: a vertical pointer cast no shadow, and the Sun's rays reached to the bottom of a well that had been dug for the purpose. Eratosthenes, who was then in Alexandria, measured the

shadow cast at noon by a vertical pointer, and found it to be 1/50th of a circle. Believing Alexandria to be some 5,000 stades due north of Syene, Eratosthenes concluded that the circumference of the Earth was fifty times 5,000 stades, or 250,000 stades.

Although the data used by Eratosthenes are not quite accurate, and although the modern equivalent of 250,000 stades is a matter of debate – some put it at 29,000 miles – there is no doubt that the fit between Eratosthenes's value for the circumference of the Earth and our modern value of nearly 25,000 miles is good, and possibly excellent.

Eratosthenes found by measurement that the angle A was 1/50th of a circle and, since A and B were equal, he concluded that the circumference of the Earth was fifty times 5,000 stades, or 250,000 stades.

Las dimensiones de la Tierra las encontramos en los escritos de Aristóteles quien asigna 400.000 estadios a la circunferencia terrestre. Arquímedes un siglo más tarde le asigna 300.000 estadios ¿Qué método usaron para determinar ese número? Posiblemente utilizaron el método que nos describe en detalle Eratóstenes, quien midió el radio terrestre en Alejandría hacia el año 230 a.C.

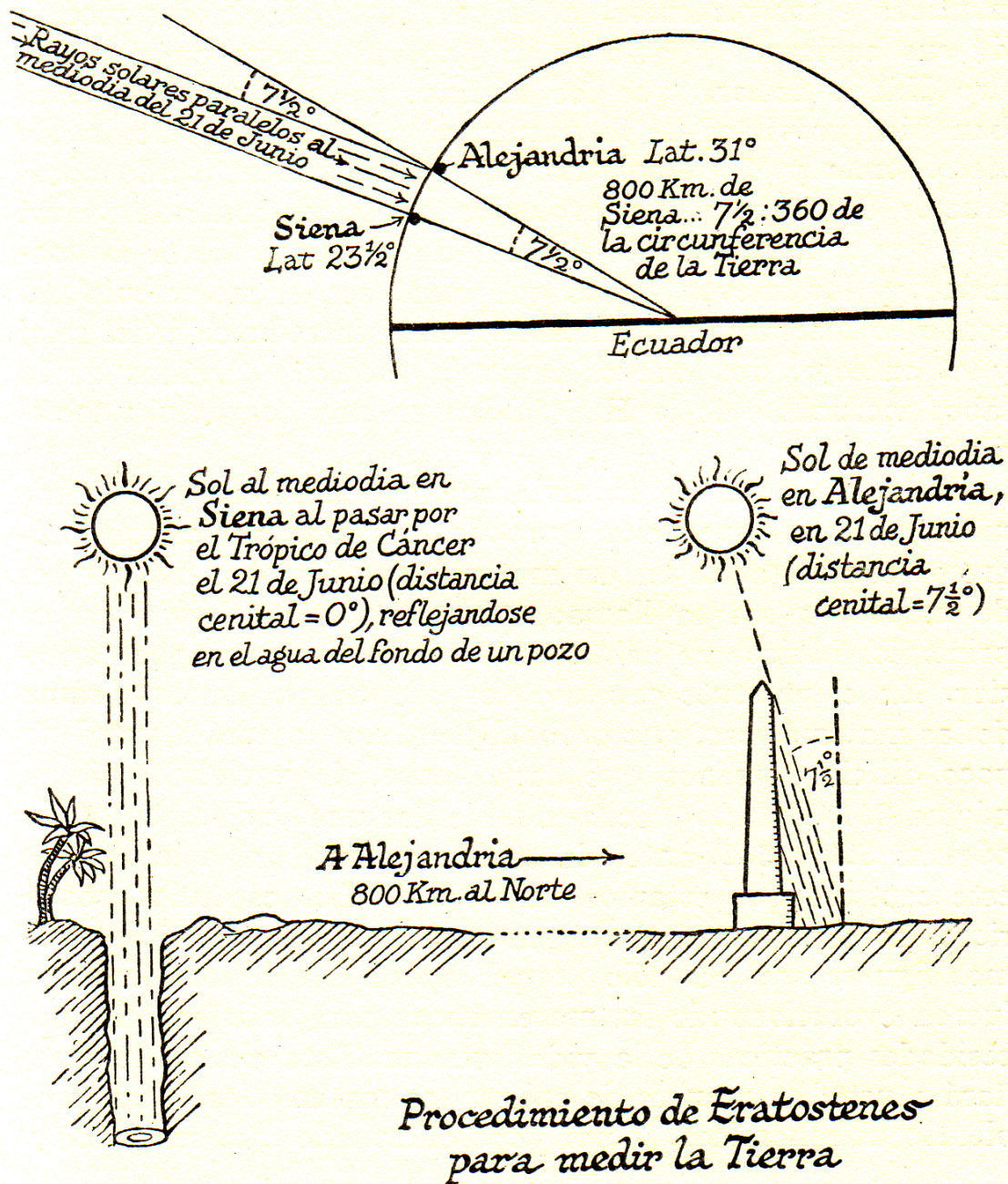


FIG. 107

Nótese que, a mediodía, el Sol está exactamente sobre el meridiano del observador. Siena y Alejandria tienen casi la misma longitud geográfica. Resulta, pues, que el Sol, estos dos lugares y el centro de la Tierra, están entonces sobre un mismo plano.

El método de Eratóstenes es muy simple: el día del solsticio de verano el Sol pasa justo por el cenit de Siena, antigua ciudad egipcia cercana a la moderna Asuán. El mismo día un obelisco en Alejandria arroja una sombra mínima al mediodía que indica

que el Sol pasó $1/50$ de círculo (unos $7,2^\circ$) al sur del cenit de Alejandría. Eratóstenes interpretó esta observación como indicadora que la vertical de Siena y Alejandría deben formar un ángulo de $7,2^\circ$ en el centro de la Tierra, ya que los rayos del Sol incidentes en ambas ciudades son esencialmente paralelos por encontrarse el Sol a gran distancia de la Tierra. Siendo así, el arco que une Siena y Alejandría debe corresponder a un cincuentavo de círculo. Como la distancia entre ambos sitios es de 5.000 estadios, esto indicaba 250.000 estadios para la circunferencia terrestre. Ese valor fue modificado a 252.000 estadios para obtener la cifra redonda de 700 estadios por grado. La pregunta que no tiene respuesta es ¿cómo midió Eratóstenes la distancia de Siena a Alejandría? Las distancias deberían ser medidas por peatones oficiales que Alejandro y los Ptolomeos habían instituido a la usanza de los babilonios para las grandes rutas [ojo que 5.000 estadios corresponde a la distancia aproximada entre Santiago y Temuco, por lo cual no es nada trivial medirla]. Hasta se han conservado los nombres de dos caminantes adscritos a Alejandro: Betón y Diognetes.

El problema para poder evaluar la cifra de Eratóstenes es poder saber qué tipo de estadio utilizó. De acuerdo a Plinio el estadio que utilizó Eratóstenes corresponde a 157,5 metros. En ese caso el perímetro dividido por π nos da un diámetro que es sólo 80 kilómetros menor que el diámetro polar. Ese error es menor que el 1% del valor actual. La perfección del resultado es en parte fortuita pero es un inmenso mérito el de Eratóstenes al haber medido el diámetro terrestre con extraordinaria precisión, con un método impecable, ¡1730 años antes del viaje de Colón para descubrir América!

Eratóstenes (nació en año 276 a.C. y murió el año 194 a.C.) estudió en Alejandría y Atenas donde adquirió cierta fama por sus conocimientos. Fue llamado a Alejandría alrededor del año 235 a.C. para que se hiciese cargo la Biblioteca del Museo. Allí permaneció el resto de su vida.

Ptolomeo en su libro Geografía adopta el valor de 500 estadios para un grado lo cual da 180.000 estadios para la circunferencia terrestre. Ptolomeo utilizó el estadio real egipcio de 210 metros de largo. Un tercer tipo de estadio era el estadio olímpico de 185 metros. El valor de Ptolomeo es ligeramente menor que el de Eratóstenes, un 5% menor que el valor real.

1.2.27. Arquímedes



FIG. 1.—Arquímedes.

Arquímedes es sin duda uno de los más grandes sabios de la antigüedad. Brillante matemático y gran ingeniero representa el clímax de la ciencia mecánica en el mundo antiguo. Sólo con Stevin y Galileo la mecánica teórica avanzó del punto donde la dejó Arquímedes; fueron necesarios 1700 años para ello. Sus grandes contribuciones estuvieron en el campo de la estática y la hidrostática.

Vivió en Siracusa, en Sicilia, la mayor parte de su vida. Murió en el 212 a.C. probablemente a los 75 años, cuando Siracusa fue tomada por los romanos; un soldado romano lo mató por la espalda mientras hacía triángulos en la arena. Eso fijaría su nacimiento hacia el año 287 a.C. Posiblemente viajó a Egipto y conoció en el Museo de Alejandría a varios estudiosos como Conón y Eratóstenes.

Sus estimaciones de distancias de los cuerpos celestes ya han sido comentadas. Gracias a él conocemos, de una fuente perfectamente confiable, la hipótesis heliocéntrica de Aristarco. Sus grandes contribuciones en el campo de la Geometría y la Mecánica le otorgan un sitio de privilegio en la Historia de la Ciencias.

1.2.28. Escuela de Alejandría:

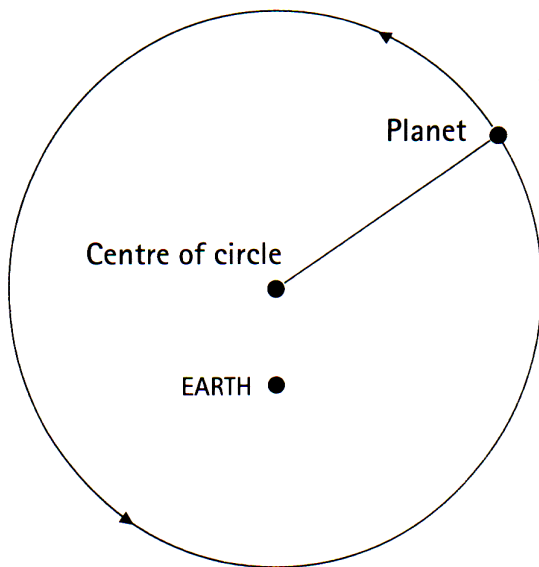
Desde mediados del siglo III a.C. Alejandría se transforma en la capital cultural del mundo griego del período helenístico. A esa ciudad se asocia la última gran escuela astronómica de la antigüedad donde tres grandes sabios estructuraron un sistema del mundo que habría de ser aceptado como dogma por más de 15 siglos. Estos tres grandes de la astronomía fueron Apolonio de Perge, Hiparco de Nicea y Ptolomeo de Alejandría. Separados por casi 400 años en el tiempo, desarrollaron el sistema de epiciclos y deferentes para el movimiento planetario.

1.2.29. Apolonio de Perga:

Apolonio nació en Perga, costa sur del Asia Menor, al Oeste de la isla de Chipre, probablemente en el año 262 a.C. Lo enviaron a Alejandría a estudiar. Floreció en esa ciudad bajo los reinados de Ptolomeo III (247 a.C., 222 a.C.) y Ptolomeo IV (222 a.C., 205 a.C.). No se conoce ni el lugar ni la fecha de su muerte (debe haber ocurrido hacia el año 200 a.C.).

Apolonio fue un brillante matemático que llevó a término la obra geométrica de Euclides y Arquímedes. Su preocupación principal fue las secciones cónicas, a las cuales dedica su libro más importante.

Apolonio parece no haber escrito ningún libro sobre astronomía o si lo hizo éste no ha llegado hasta nosotros. Sabemos de las investigaciones astronómicas de Apolonio gracias a Ptolomeo, que lo menciona en su libro. Apolonio parece haber conocido bien el uso de excéntricos móviles y de epiciclos y deferentes para explicar el movimiento de los planetas. Los excéntricos se explicaron cuando hablamos de Aristarco. Los epiciclos son pequeños círculos en torno del cual gira el planeta y el centro del epiciclo gira en torno de la Tierra en un círculo mayor llamado deferente.



In an eccentric circle, the planet moved as usual with uniform speed around the circle; but since the Earth was not at the centre of the circle, the planet appeared from Earth to move with varying speed (slower when at the top of the circle and faster when at the bottom).

En su forma más simple los excéntricos son excéntricos fijos. El cuerpo celeste gira en torno a un punto que no coincide con la Tierra y que permanece fijo en el espacio. A fin de “recuperar” el rol de la Tierra se establecen los excéntricos móviles, donde los centros de la órbita giran en torno a la Tierra. El giro del centro puede ser directo o retrógrado y con un período diferente de aquel con el cual el cuerpo celeste gira en el círculo. Apolonio parece haber sabido acerca de la equivalencia entre excéntricos móviles y los epiciclos con deferentes. Representó los movimientos de la Luna y el Sol por medio de excéntricas. Con una excéntrica fija se puede dar cuenta de manera natural de la desigualdad de las estaciones.

Con Apolonio pasa la astronomía de las esferas homocéntricas de Eudoxio a círculos excéntricos fijos, a excéntricos móviles, a epiciclos y deferentes centrados en la Tierra y a epiciclos y deferentes excéntricos. Con esta “*caja de herramientas*” trabajaran Hiparco y Ptolomeo.

1.2.30. Hiparco de Nicea:

Hiparco nació en Nicea, Bitinia, pero pasó la mayor parte de su vida fuera de su tierra, principalmente en Rodas, centro rival de Alejandría. Hiparco es considerado como el más grande de los astrónomos de la antigüedad, de la época anterior a Cristo.

La mayoría de los escritos de Aristarco se han perdido. Sólo nos ha llegado un libro suyo escrito el año 140 a.C. Elaboró un catálogo estelar en el año 129 a.C. Ptolomeo nos da la fecha y la noticia de dos observaciones realizadas por Hiparco los años 128 a.C. y 127 a.C. Hiparco montó un observatorio en Rodas, construyendo sus propios instrumentos para determinar posiciones precisas de estrellas en el cielo. Elaboró un catálogo de un grupo selecto de 850 estrellas brillantes. Dividió a las estrellas en seis categorías de brillo aparente, o magnitud, especificando en su catálogo la magnitud de cada estrella. Las estrellas de primera magnitud son las más brillantes; las de sexta magnitud son las que apenas podemos ver a simple vista, en un lugar oscuro. El uso de magnitudes para representar los brillos aparentes de las estrellas se ha mantenido hasta nuestros días. De acuerdo con Plinio Hiparco decidió hacer un catálogo estelar cuando observó una nova, dándose cuenta que si las estrellas no varían su brillo en siglos a todos nos parecerán constantes pero sólo comparando observaciones muy distantes se podría encontrar variabilidad en las estrellas; por ello tuvo un particular interés por describir el brillo aparente de cada estrella.

Hiparco descubrió la precesión de los equinoccios, comparando sus posiciones estelares con observaciones más antiguas, hechas 150 años antes en Alejandría o quizás por los caldeos que buscaban la posición exacta de las estrellas en todos los momentos por absoluta exigencia de su Astrología, que en ese aspecto era muy científica. En todo caso Hiparco tiene el gran mérito de haber querido hacer (y haber hecho) observaciones exactas y medidas numerosas, es decir, con el propósito de “*calcular los fenómenos*” y no sólo de “*salvarlos*” cualitativamente y *grosso modo*, tendencia que fue general hasta entonces en la astronomía griega.

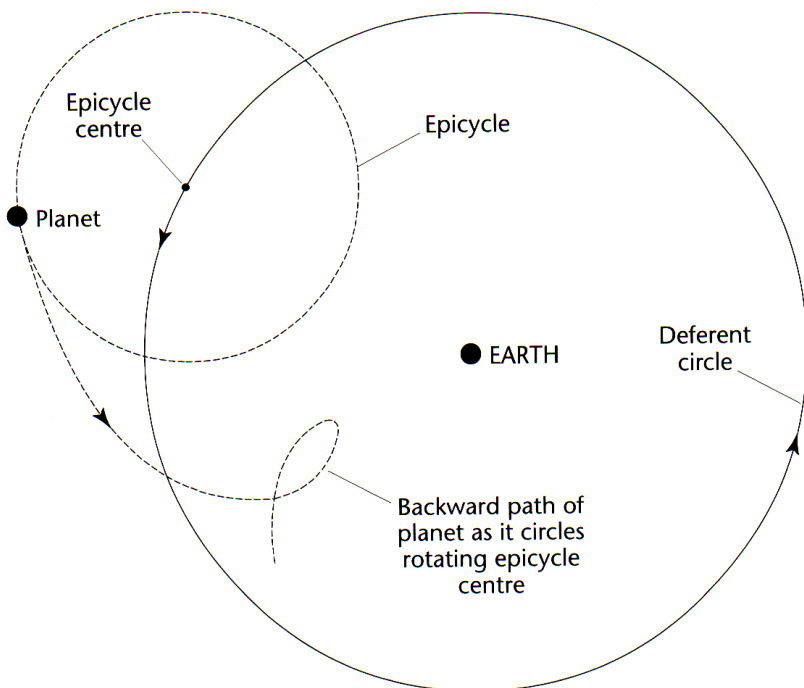
Hiparco encontró que la dirección del polo celeste había cambiado, descubriendo así la precesión de los equinoccios. Esto se debe a que el eje de rotación de la Tierra, inclinado $23\frac{1}{2}^{\circ}$ con respecto a la perpendicular a la eclíptica, precesa en torno al polo de la eclíptica, describiendo un círculo de $23\frac{1}{2}^{\circ}$ de radio, en un período de 26.000 años. Esta precesión es similar a la que experimenta un trompo que gira inclinado con respecto a la vertical. La precesión de los equinoccios se traduce en un movimiento del polo celeste de 20 segundos de arco por año. El efecto acumulado en 150 años le permitió a Hiparco poder detectarlo. La intersección de la eclíptica y el ecuador gira una vuelta completa en 26.000 años, desplazándose aproximadamente

50" por año. Ptolomeo nos relata que Hiparco, al comparar sus observaciones con las realizadas 150 años antes por Aristilo y Timocares, respecto de las distancias de algunas estrellas, en particular de la de Virgo a la Luna eclipsada, vio que mientras las distancias relativas de las estrellas fijas entre sí no había variado, la estrella Espiga de la constelación de Virgo seguía en ese momento el equinoccio de otoño en 8 grados, mientras que en los días de Timocares lo seguía en 6 grados. Con ello obtuvo la idea que la distancia a la eclíptica permanecía constante no así la longitud eclíptica medida con respecto al punto del equinoccio (intersección de la eclíptica y el ecuador). Hiparco estimó un límite inferior a ese movimiento en 1 grado por siglo, esto es 36 segundos de arco por año. Su apreciación es correcta pues la precesión movía el equinoccio en aquella época en 49,6 segundos de arco por año.

Hiparco refinó el método de Aristarco para medir la distancia a la Luna en un eclipse. Utilizó el valor correcto de $\frac{1}{2}^\circ$ para el diámetro angular del Sol y la Luna, determinando 60 radios terrestres para la distancia Tierra-Luna.

Hiparco hizo una excelente determinación la longitud del año, estudiando observaciones antiguas. Determinó la desigualdad de las estaciones y la longitud del año como 365 días + $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{300}$ (equivalente a 365d 5h 55.2m) estimando que el error de su valor no podía superar los 15 minutos. En realidad el valor dado por él sólo difiere del año real en 6 minutos (el año trópico tiene 365d 5h 48m 46s). Una precisión de esta índole sólo se logra al comparar mediciones hechas en largos intervalos de tiempo, equivalentes a más de un siglo.

How an epicycle might explain the apparent backward motion of a wandering star. The Earth is assumed to be at the centre of the large circle or *deferent*, on which travels the centre of the small circle or *epicycle*, which carries the planet. Each circle rotates with uniform speed. The path of the planet as seen from Earth depends upon the values chosen for the various parameters, but the figure indicates how the backward (retrograde) motion of a planet could be produced.



Demost r  que las dos proposiciones siguientes son equivalentes:

- El Sol describe en un año un círculo de radio r , cuyo centro se ubica a una distancia $e r$ de la Tierra.
- El Sol se mueve durante el año sobre un epiciclo de radio $e r$ en la dirección este-oeste mientras el centro del epiciclo describe en el mismo período un círculo de radio r en torno a la Tierra pero en dirección opuesta.

Cualquiera de estas hipótesis era suficiente para representar el movimiento del Sol con un error menor que un minuto de arco. El radio r es arbitrario. Lo que es más importante es la longitud del apogeo, es decir el ángulo sobre el plano de la eclíptica que define la dirección donde el Sol (o el planeta) se encuentran más lejos de la Tierra. Para el Sol Hiparco eligió $e = 0,04166$ y $A = 65^\circ 30'$. Ambos valores son razonablemente correctos. A es $35'$ menor que el valor real en esa época.

El movimiento lunar es más complejo que el del Sol. Puede representarse por una excéntrica o epiciclo. Veamos este último tipo de solución. Hiparco adoptó un deferente inclinado 5° con respecto a la eclíptica, rotando en forma retrógrada alrededor del polo de la eclíptica en $192/3$ años. Así representa la rotación de los nodos. Sobre el deferente se mueve en sentido directo, es decir de oeste a este, el centro del epiciclo. La Luna gira en el epiciclo en forma retrógrada. Debido al movimiento directo de la línea de la ápsides (línea que une el perigeo y el apogeo) en un período cercano a nueve años, el período de revolución del deferente es ligeramente distinto del período de revolución del epiciclo. La razón entre los radios del epiciclo y la deferente se pueden determinar observando la máxima diferencia entre la posición aparente y la posición media de la Luna. Hiparco encontró un valor de $5^\circ 1'$ para dicha diferencia lo cual da una razón $0,0875:1,0000$, es decir el epiciclo tiene un tamaño del 8,75% del deferente. Esto daba cuenta de la así llamada primera desigualdad del movimiento lunar, producida por la elipticidad de la órbita de la Luna. Hiparco basó su teoría lunar en observaciones de eclipses hechas en Babilonia y Alejandría.

Hiparco tiene también el mérito de haber introducido la trigonometría esférica en los cálculos astronómicos. Aunque sin hablar de funciones trigonométricas propiamente tal calcula las cuerdas (los lados de los triángulos esféricos). Hizo tablas de cuerdas que son la primera forma que tuvo la antigüedad de tablas de funciones circulares.

Hiparco no completó una teoría sobre el movimiento de los planetas, pues se dio cuenta que necesitaba un gran número de observaciones precisas, que él no tenía. Prefirió entonces abandonar la idea de hacer una teoría planetaria para iniciar observaciones que en el futuro permitieran construir dicha teoría. De acuerdo a Te n Hiparco prefería los epiciclos por sobre los excéntricos móviles.

Tan alto subió el genio de Hiparco que aún hoy se perfila como uno de los grandes gigantes de la ciencia de Urania.

1.2.31. Claudio Ptolomeo

Ptolomeo es el último gran astrónomo de la antigüedad. Floreció hacia el año 140 de nuestra era. En Alejandría. Sus observaciones astronómicas se sitúan entre los años 127 y 150. Escribió una serie de 13 volúmenes sobre astronomía, libro conocido como *Almagesto*. Es una recopilación del trabajo de varios astrónomos anteriores, principalmente de Hiparco. Para su catálogo estelar Ptolomeo adoptó la época 137 (de nuestra era).

En los 260 años transcurridos entre Hiparco y Ptolomeo la astronomía no experimentó avances de importancia. El único astrónomo mencionable es Poseidonio (133 a.C., 49 a.C.) y Sosígenes del siglo I a.C. que es conocido por haber sido consultado por Julio Cesar para la reforma del calendario.

En la introducción del primer libro de la *Sintaxis* (*Almagesto*) resume los principales postulados de la astronomía. El cielo es una esfera rotando en torno a un eje fijo. La Tierra es una esfera situada en el centro de los cielos. La Tierra es un punto comparada con la esfera celeste. La Tierra no tiene movimiento de traslación porque, en primer lugar, debe haber un punto fijo al cual referir el movimiento de los otros y segundo, porque los cuerpos pesados descienden hacia el centro del Universo, que es el centro de la Tierra. Si es que hubiese un movimiento, sería proporcionado a la Tierra y por ende los animales y las cosas se irían quedando atrás arrojadas por los aires. Esto también demuestra lo falso de la sugerencia hecha por algunos de que la Tierra, aunque inmóvil en el espacio, rote en torno de un eje, lo que Ptolomeo reconoce, simplificaría enormemente las cosas. Así describe Ptolomeo, según Dreyer, las suposiciones básicas de la astronomía.

En los que a la teoría del Sol respecta, Ptolomeo se contentó con la teoría de Hiparco. Sin embargo cometió un error pues en los 260 años transcurridos, el desplazamiento de la línea de las ápsides (desconocido para Ptolomeo) había aumentado el error de la longitud del apogeo de 35' para el valor de Hiparco a 5° 30'. El año trópico adoptado por Hiparco era más largo que el real y por ende su movimiento medio más bajo que el real. En el tiempo transcurrido entre Hiparco y Ptolomeo este y otros errores hicieron que las tablas solares de Ptolomeo tuviesen errores de unos 100'. Es curioso que Ptolomeo no intentara mejorar su teoría solar que daba errores obvios de casi 2° (recuérdese que el diámetro solar alcanza a ½°).

Ptolomeo sí mejoró sustancialmente la teoría lunar de Hiparco. El epiciclo y deferente de Hiparco fueron modificados, poniendo el deferente en forma excéntrica con relación a la Tierra. Esta y otras modificaciones le permitieron representar mejor el movimiento de la Luna en longitud. Sin embargo la distancia Tierra-Luna variaba tanto que si se fijaba su diámetro angular en el apogeo para que coincidiera con el valor real, el diámetro resultante para la Luna en el perigeo alcanzaba un valor muy cercano a 1 grado (la Luna varía su diámetro angular entre apogeo y perigeo de 29,5' a 33'). Ptolomeo se debe haber dado cuenta de esto pero no lo menciona en absoluto en su

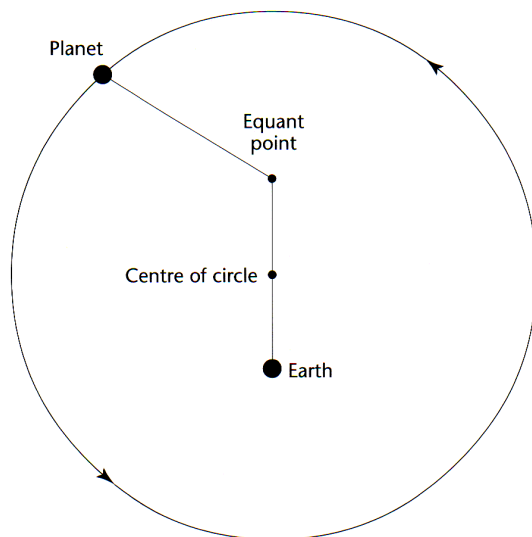
libro. Esto lo debe haber llevado a pensar que su teoría era simplemente una herramienta de cálculo pero no podía pretender ser una representación de la realidad.

El gran mérito de Ptolomeo está en el desarrollo que hizo de la teoría de epiciclos para el movimiento de los planetas. La Tierra está inmóvil, en el centro del sistema. Cada planeta gira en un pequeño círculo (epiciclo), el centro del cual se traslada alrededor de la Tierra siguiendo un círculo mayor (deferente).

Para Mercurio y Venus los planetas interiores, siempre el centro C del epiciclo permanece Alineado con la Tierra y el Sol, completando por ende su revolución en un año. Para los planetas exteriores (Marte, Júpiter y Saturno) el radio vector que une el centro del epiciclo y el planeta permanece siempre paralelo a la recta Tierra-Sol. Se elige la razón entre el radio del epiciclo y el del deferente de modo de reproducir con la mejor precisión posible las retrogradaciones.

Pese a que el sistema tolemaico es un sistema geocéntrico, el Sol rompe la armonía pues su presencia es determinante en las retrogradaciones de los planetas. Las retrogradaciones de los planetas superiores se producen cuando éstos se encuentran en oposición al Sol. Para los planetas interiores, los centros de sus deferentes están siempre sobre la línea que une a la Tierra y al Sol.

Ptolomeo introduce una modificación en el sistema de epiciclos, pues coloca el deferente en forma excéntrica. Además el centro del epiciclo no recorre el deferente con una velocidad angular uniforme con respecto al centro del deferente o al centro de la Tierra. La uniformidad la acepta con respecto a un punto llamado ecuante, que se sitúa al otro lado del centro del deferente, simétrico de la Tierra con respecto al centro (ver figura).

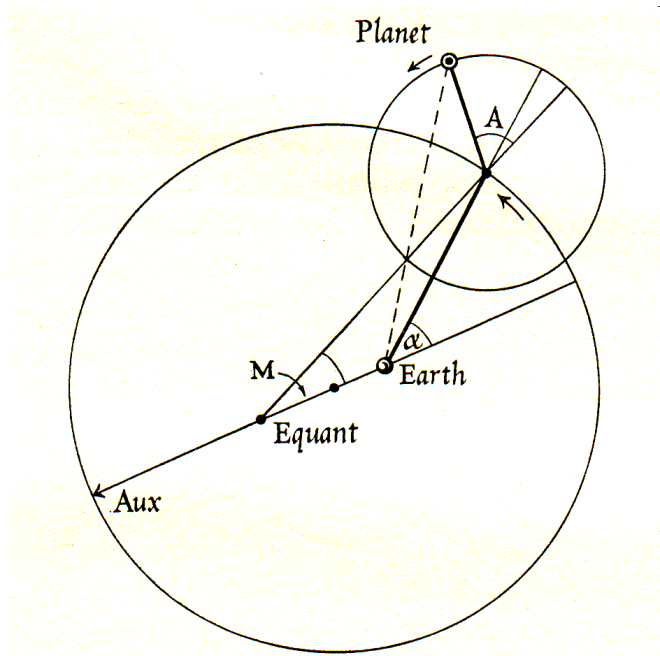


In a circle with an equant point, the Earth is located to one side of the centre, and the equant point is symmetrically positioned on the opposite site. The planet moves with a variable speed in such a way that it appears from the equant point to be moving uniformly. The planet therefore moves slower when near the equant point (at the top of the figure) and faster when distant from it (at the bottom).

De este modo se logra que, visto desde la Tierra, el centro del epiciclo se mueve más rápido cuando pasa por el perigeo. Retener la uniformidad con respecto a algún

punto es muy importante para los efectos de calcular posiciones. Además como se ha dicho, es uno de los dogmas introducidos por Platón. Es importante recordar que éstas eran elaboradas construcciones geométricas. El álgebra no se había desarrollado y faltaban siglos para que se inventara el cálculo. Tampoco se conocían los logaritmos. Por eso los movimientos circulares uniformes eran una necesidad práctica, junto con ser un verdadero dogma.

El sistema de epiciclos de Ptolomeo, con ligeras variantes, perduró por 15 siglos como la herramienta básica para calcular posiciones planetarias. Durante ese largo período a veces se complicó el sistema recurriendo a epiciclos cuyo centro gira sobre otro epiciclo, que a su vez gira sobre un deferente. Cada epiciclo extra pretendía explicar nuevas irregularidades detectadas en el curso del planeta a lo largo del zodiaco.



1.2.32. Orden del Sistema Planetario:

En los primeros tiempos los astros fueron considerados a igual distancia de la Tierra. Cualquier orden que se les asignara era completamente arbitrario. Ninguna teoría de los griegos, ni siquiera la de Ptolomeo, fija las distancias a los planetas. Pese a lo arbitrario se encuentran dos ordenamientos principales: el de Anaxágoras, adoptado por los pitagóricos, Platón, Eudoxio, Aristóteles y los antiguos estoicos. Este es: Tierra, Luna, Sol, Venus, Mercurio, Marte, Júpiter, Saturno, estrellas fijas.

El otro ordenamiento fue propuesto por los estoicos, coloca al Sol en el centro de la secuencia, por simetría. Esta es: Tierra, Luna, Mercurio, Venus, Sol, Marte, Júpiter,

Saturno y las estrellas fijas. Este orden fue adoptado por Hiparco y Ptolomeo y conservado hasta Copérnico.

La regla empírica detrás de ambas ordenaciones es que una revolución más larga debe indicar una distancia mayor. Las revoluciones siderales nos indican entonces el siguiente orden: Luna (27 días), Sol (1 año), Marte (2 años) Júpiter (12 años) y Saturno (30 años). Para Mercurio y Venus surge el problema; ambos son arrastrados por el Sol en su curso anual. El período sideral de estos astros es de 88 días para Mercurio y 225 días para Venus. El período sinódico, es decir, el tiempo que transcurre entre dos conjunciones con el Sol (situación en que el planeta, el Sol y la Tierra se alinean, estando el planeta más allá del Sol) son 116 días para Mercurio y 584 días para Venus. Por ser el período sinódico de Venus mayor que un año se explica por qué algunos astrónomos situaron a Venus (y a Mercurio por añadidura) más allá del Sol.

Remitiéndose a los períodos siderales se obtiene el segundo orden que fue adoptado por muchos siglos. Curiosamente en él hay tres cuerpos (Luna, Mercurio y Venus) interiores a la órbita solar y otros tres (Marte, Júpiter y Saturno) exteriores a ella. Según los estoicos eso le daba belleza al sistema y situaba al Sol en un lugar de privilegio.

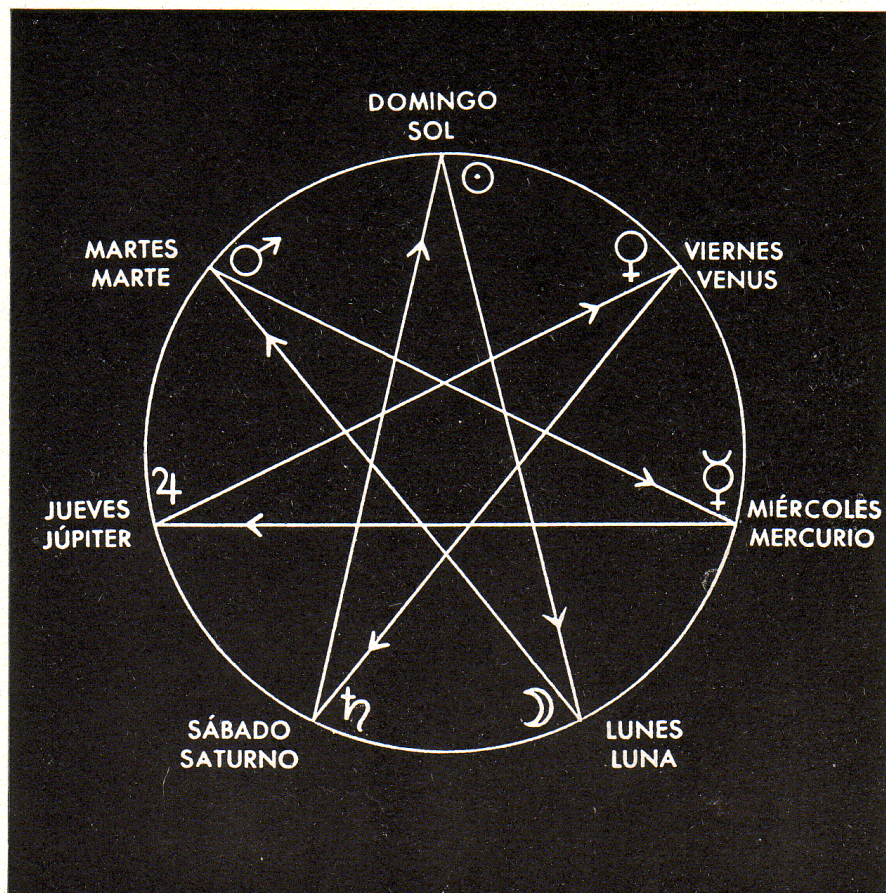


FIG. 1. — Significado astrológico de los días de la semana

Como nota curiosa diremos que ese orden: Luna, Mercurio, Venus, el Sol, Marte, Júpiter y Saturno, tiene que haber sido adoptado con anterioridad a la designación de los días de la semana. Parece ser que se pensaba que cada hora del día era regida en forma sucesiva por cada uno de los siete cuerpos, partiendo de Saturno hasta llegar a la Luna. Así si la primera hora de un día era regida por Saturno, ese día se lo llamó "de Saturno" (en castellano Sábado, día del Sabbat; en inglés Saturday). La segunda hora esta regida por Júpiter, la séptima por la Luna, la octava por Saturno nuevamente, como así también la decimoquinta y vigésimo segunda, la vigésimo tercera por Júpiter y la última hora por Marte. La primera hora del día siguiente estaría regida por el Sol y sería "el día del Sol" (Sunday en inglés; en castellano se cambió al día de Dios, Domingo). La primera hora del día siguiente resulta regida por la Luna y es Lunes, etc. El orden de los días de la semana resulta entonces de combinar repetidamente los siete cuerpos celestes en ciclos de 24 horas (ver figura).

1.2.33. Física Aristotélica:

La mecánica interesó a un gran número de filósofos griegos. Desgraciadamente las dificultades de las observaciones cotidianas les llevaron a concluir lo que a primera vista parecen indicarnos nuestros sentidos: el reposo es más natural que el movimiento. Fundada sobre ese principio falso, la dinámica quedó embotellada por dos mil años después de Aristóteles.

El principio de inercia no es obvio al hacer observaciones terrestres. Por el contrario, es natural concluir de ellas que un cuerpo se detiene, a menos que actúe una fuerza sobre él. En los espacios celestes, donde no existe el roce, y en principio se podría "ver" el principio de inercia, las cosas no son tan simples tampoco, pues los cuerpos celestes que observamos están siempre sujetos a la fuerza atractiva del Sol (y de la Tierra en el caso de la Luna).

Por muchos años se aceptó el esquema Aristotélico de un mundo sub-lunar, con dos categorías de cuerpos terrestres: los graves (con peso) es decir sólidos y líquidos y los cuerpos ligeros como el fuego y los vapores. Los graves tienen su "lugar natural" en el centro del Universo y al ser liberados caen hacia la Tierra, buscando su lugar natural. Los cuerpos más pesados caen más rápido. Los fuegos y vapores se elevan estado natural es el movimiento circular uniforme. El orden que reina en el cielo, comparado al caos de los movimientos terrestres, parece resultar de una inteligencia, de una voluntad. Para Platón, el cielo es geométrico, por lo tanto, divino.

La física aristotélica reinó sin contrapeso por 20 siglos. Hasta comienzos del siglo XVII tenemos este cosmos dual con un mundo sub-lunar y otro supra-lunar, con dos tipos distintos de materia y regidos por distintos tipos de leyes. Recién con Newton, en 1687, se logra la unificación y se ve que ambos tipos de materia son en principio iguales y ambas están afectadas por la inercia y demás leyes de la mecánica y la física. La manzana de Newton cae a la Tierra por la misma razón que la Luna gira en torno a ella.

Bibliografía:

- Abetti, G. *"Historia de la Astronomía"*, Fondo Cultura Económica, México, 1956.
- Asimov, I. *"Los Griegos"*, Alianza Editorial, Madrid, 1983 (El libro de bolsillo # 810)
- Berry, A. *"A Short History of Astronomy"*, Dover, N. York, 1961
- Clagett, M. *"Greek Science in Antiquity"*, Colliers, N. York, 1969
- Christianson, G.E. *"This Wild Abyss"*, Free Press, N. York, 1979
- Couderc, P. *"Las Etapas de la Astronomía"*, EUDEBA, B. Aires, 1962
- Dreyer, J.L.E. *"A History of Astronomy from Thales to Kepler"*, Dover, N.York, 1953
- Gurev, G. A. *"Los Sistemas del Mundo. Desde la Antigüedad hasta Newton"*,
Editorial Problemas, Buenos Aires, 1947.
- Heath, Thomas *"Aristarchus of Samos, the ancient Copernicus"*, Dover, N.York, 1981.
- Hoskin, M., Editor, *"The Cambridge Concise History of Astronomy"*, Cambridge
University Press, Cambridge, 1999.
- Lloyd, G.E.R. *"De Tales a Aristóteles"*, EUDEBA, B. Aires, 1973
- Mieli, A. *"Panorama General de Historia de la Ciencia"*, Volumen I, *"El Mundo
Antiguo"*, Espasa-Calpe, B. Aires, 1952
- North, John *"The Fontana History of Astronomy and Cosmology"*, Fontana
Press, Londres, 1994
- Rey, Abel *"El Apogeo de la Ciencia Técnica Griega"*, UTEHA, México, 1962
- Russell, B. *"The Wisdom of the West"*, Crescent Books, Inc., Londres, 1959
- Sarton, G. *"Historia de la Ciencia"*, 4 volúmenes, EUDEBA, B. Aires, 1965
- Toulmin, S. Y Goodfield, J. *"La Trama de los Cielos"*, EUDEBA, B. Aires, 1963