

da natureza. Pitágoras e seus seguidores foram levados a esta suposição ao perceberem como tudo na natureza é governado por relações numéricas, como a harmonia dos sons musicais depende de intervalos regulares, dos quais a avaliação numérica eles foram os primeiros a determinar¹⁰.

Finalmente não podemos deixar de mencionar que para eles o Universo é regido por um senso de beleza, simetria e harmonia, dentro do qual todos os corpos celestes são esféricos e movem-se uniformemente em trajetórias circulares. Cada uma das diferentes revoluções destes corpos, segundo os pitagóricos, produz diferentes sons, compondo uma música incessante, que nossos ouvidos são incapazes de ouvir já que a temos ouvido desde o nosso nascimento. Esta música é conhecida como "harmonia das esferas".

Assim, como afirma Aristóteles,

eles [os pitagóricos] supõem que os elementos dos números são os elementos de todas as coisas, e todo o Céu é um número e uma harmonia musical¹¹.

Podemos então concluir que para Pitágoras e os pitagóricos a astronomia é pura matemática, uma combinação de geometria, aritmética e harmonia. E que a estrutura do Universo pode ser entendida e expressa na linguagem matemática¹².

¹⁰DREYER, 1953, p. 36.

¹¹A esse respeito, ver: ARISTÓTELES. *Metaphysica* I, 5, 986^a 1-10.

¹²Para uma leitura mais minuciosa sobre o pensamento pitagórico ver: GOMPERZ, T. *The Development of the Pythagorean Doctrine*. In: MUNITZ, 1957; HEATH, 1981, v. 1, cap. 5; DREYER, 1953, COHEN & DRABKIN, 1966.

Capítulo 2

O Universo das Formas Perfeitas de Platão e seus Discípulos

"Que ninguém ultrapasse minha porta sem conhecer a geometria" (Inscrição que, segundo se diz, estava colocada na porta da Academia de Platão)*.

Embora a preocupação em explicar as variações cíclicas observadas nos Céus dentro de um marco teórico já estivesse, como dissemos anteriormente, presente entre os pré-socráticos, Platão, no início do século IV a.C., parece ter sido o primeiro a enunciar aquele que foi, talvez, por cerca de dois mil anos, o problema mais importante dos astrônomos, a saber: Quais são os movimentos circulares uniformes e ordenados que podem ser tomados como hipóteses para explicar os movimentos aparentes dos planetas?¹³.

As idéias cosmológicas de Platão são apresentadas, na sua forma mais completa e final, no *Timaeus*, embora encontremos em outros diálogos, o *Phaedo*, a *República* e as *Leis*, algumas considerações a este respeito. Sua visão é fortemente influenciada pelo sistema de Pitágoras

que dá ênfase aos números, à uniformidade básica que subordina a aparente irregularidade e ao movimento cir-

* Sobre o papel da geometria na ciência ver: PLATÃO. *República* VII, 527.

¹³A este respeito ver: SIMPLICIUS. In *Aristotelis Quatuor Libros de Caelo Commentaria*. Livro II, comentário 43. Apud COHEN & DRABKIN, 1966, p. 97, e PLATÃO. *República* VII, 527^{ss}. Trad. por B. Jowett. In: HUTCHINS, 1952, v. 7, p. 295-441.

cular e formas esféricas, como os mais perfeitos de suas espécies¹⁴.

*Nem sempre é fácil seguir a construção do Universo platônico e há várias opiniões divergentes sobre muitos pontos do seu sistema cósmico. Esta dificuldade se deve, particularmente, ao fato de que os *Diálogos* de Platão são mais uma meditação filosófica do que o que poderíamos chamar de uma ciência sistemática¹⁵. Além disso, como afirma Dreyer, seus textos

são freqüentemente interrompidos com ilustrações mitológicas a partir das quais seu significado filosófico deve ser extraído, embora haja na realidade uma perfeita concordância entre as passagens claramente enunciadas e aquelas revestidas de imagens mitológicas. Mesmo no único diálogo que é especialmente devotado às questões físicas, o *Timaeus*, Platão misturou mito e ciência¹⁶. *

O sistema cosmológico de Platão, embora não desenvolvido detalhadamente e apresentado de uma forma não sistemática, influenciou, e muito, o desenvolvimento posterior da astronomia. Por isso alguns pontos deste sistema devem ser notados. Segundo Platão, Deus

fez o mundo na forma de um globo, uma esfera, tendo seus extremos em todas as direções equidistantes do centro, a mais perfeita e a mais semelhante a si mesma de todas as figuras; pois ele considerou que o semelhante é infinitamente mais belo que o dessemelhante¹⁷.

Fora do mundo não havia nada e sua superfície foi, por Deus, arredondada e polida.

¹⁴ COHEN & DRABKIN, 1966, p. 98.

¹⁵ É bem verdade que a distinção por nós empregada aqui entre a ciência sistemática e meditação filosófica é mais moderna que antiga.

¹⁶ DREYER, 1953, p. 54.

¹⁷ PLATÃO. *Timaeus*, 33. Trad. por B. Jowett. In: HUTCHINS, 1952, v. 7, p. 422-77. Doravante as citações do *Timaeus* serão feitas a partir desta tradução.

No centro dessa esfera repousaria a Terra, que também é esférica¹⁸, a qual permaneceria lá, para não alterar o equilíbrio simétrico do Universo, sem necessidade de ar ou de qualquer força similar para sustentá-la, já que para Platão

uma coisa em equilíbrio no meio de qualquer substância uniforme não teria causa para inclinar-se mais ou menos para qualquer direção¹⁹.

A esfera do Universo platônico gira uniformemente de leste para oeste, no mesmo lugar, em torno do seu próprio eixo, que passa pelo centro da Terra.

¹⁸ Dissemos que, de acordo com Platão, a Terra ocupava o centro do Universo e não possuía movimento algum. Porém muitos comentaristas antigos e modernos atribuem a Platão a idéia de que a Terra gira em torno de seu eixo. Estas interpretações baseiam-se numa obscura passagem do *Timaeus* (40^b) "A Terra, nossa governanta, gira ao redor de um eixo estendido de pólo a pólo através do Universo".

Essa passagem é comentada por Aristóteles nos seguintes termos: "Alguns dizem que a Terra, realmente, está colocada no centro, e ainda gira e se move em torno de um eixo estendido através do Universo de pólo a pólo como está escrito no *Timaeus*" (ARISTÓTELES. *De Caelo* II, 13, 293^b 30).

Sir Thomas Heath, comentando este texto de Aristóteles, afirma: "Isto naturalmente implica que Aristóteles atribua a Platão a visão de que a Terra girava em torno do seu eixo. Tal visão é, contudo, inteiramente inconsistente com todo o sistema descrito no *Timaeus* (e também nas *Leis*, que Platão não viveu para terminar) onde é a esfera das estrelas fixas que, pela sua revolução em torno da Terra em 24 horas, faz a noite e o dia; além disso, não há razão alguma para duvidar da evidência de que foi Heráclides de Pontos o primeiro a afirmar a rotação da Terra em torno de seu próprio eixo em 24 horas" (HEATH, Sir Thomas, 1981, p. 314). Outros detalhes sobre a prioridade da descoberta da rotação axial da Terra, ver Capítulo 4 deste livro. *

¹⁹ PLATÃO. *Phaedo*, 109^a. Trad. por B. Jowett. In: HUTCHINS, 1952, v. 7, p. 220-51. *Apud* HEATH, 1981, v. 1, p. 310.

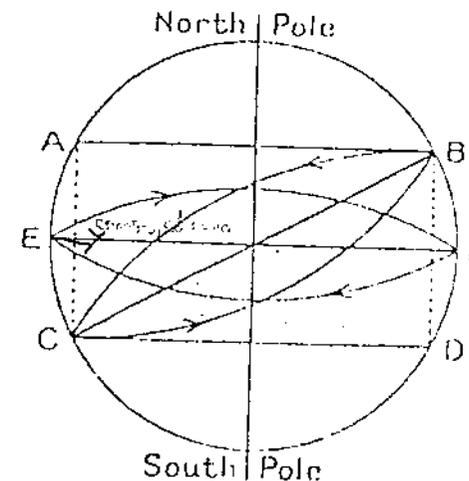
As estrelas – representando seres eternos, divinos e imutáveis – tal como eram observadas moviam-se, segundo Platão, com velocidade uniforme em torno da Terra, na mais perfeita e regular de todas as trajetórias, o círculo interminável²⁰.

O Sol, a Lua e as cinco estrelas, que são chamadas de planetas, são carregados pela rotação da esfera exterior, “horizontalmente, para a direita”, no movimento que, segundo Platão, Deus “chamou de movimento do Mesmo”. Além deste movimento cada um dos planetas, no Universo platônico, tem seu próprio movimento circular independente, que faz parte do movimento circular interior, chamado “movimento do Outro”, em um plano que corta o Equador celeste (ver: *Timaeus*, 36^c).

Cornford, ao comentar a passagem do *Timaeus* (36^c), onde Platão descreve os movimentos do Mesmo e do Outro, representa estes movimentos tal como aparece na Figura 2.

Platão considera a “revolução do Mesmo” superior à “do Outro” dado que a primeira foi a única que Deus teria deixado sem dividir; enquanto que o movimento do Outro “ele dividiu em seis partes e fez sete círculos desiguais” (ver: *Timaeus*, 36^c-36^d).

²⁰O fenômeno da precessão dos equinócios, que corresponde à variação das distâncias das estrelas fixas com respeito aos equinócios, não era conhecido antes de Hipparchos (séc. II a.C.), que descobriu a precessão comparando sua própria determinação da longitude de certas estrelas, feita em 129/128 a.C., com aquela feita por Timocharis, em 283 ou 295 a.C. Hipparchos descobriu, por exemplo, que a distância entre a estrela Spica e o ponto do equinócio de outono havia diminuído 2° durante os 150 anos que separaram suas observações daquelas feitas por Timocharis. A esse respeito ver: DREYER, 1953, p. 48 e p. 202-3; NEUGEBAUER, 1975, p. 292; e SARTON, 1966, p. 290.



Sobre a esfera

*FIGURA 2 – “AB é um diâmetro do Trópico de verão, CD um diâmetro do Trópico de inverno, CB a diagonal do retângulo obtido pela ligação AC, BD. O movimento do Mesmo é um movimento de toda esfera de leste (esquerda) para oeste (direita) no plano do Equador (EF), que é paralelo aos planos dos Trópicos e deste modo é ‘na direção dos lados’ AB, CD. O movimento do Diferente [na tradução de B. Jowett denominado de movimento do Outro] é em sentido oposto e no plano da diagonal CB, que é um diâmetro da Eclíptica, um grande círculo que tangencia o Trópico de verão junto ao ponto (B) em Câncer, e o Trópico de inverno junto ao ponto (C) em Capricórnio. O Zodíaco é uma banda larga, contendo doze signos, ao longo de cujo centro gira a Eclíptica”²¹.

²¹CORNFORD, F.M. *Plato's Cosmology: The Timaeus of Plato Translated with a Running Commentary*. London: Routledge & Kegan Paul, 1948, p. 73. Segundo Cornford, o movimento do Mesmo é visivelmente manifestado na esfera das estrelas fixas (ver: CORNFORD, 1948, p. 76).

Segundo Koyré o círculo ‘do Mesmo’ corresponde ao círculo do Zodíaco e o ‘do Outro’ ao círculo da Eclíptica (ver: KOYRÉ, 1973, p. 31). Esta visão não é compartilhada por Cornford, segundo o qual o círculo do Outro “antes de ser subdividido deve ser identificado com o Zodíaco, mais do que com a Eclíptica” (CORNFORD, 1948, p. 76).

Depois de ter formado o corpo do Sol, da Lua e das cinco estrelas "errantes" (planetas), Deus

colocou-os nas órbitas onde o círculo do Outro estava se movendo - nas sete órbitas sete estrelas: primeiro, encontra-se a Lua, na órbita mais próxima da Terra; e o seguinte, o Sol, na segunda órbita depois da Terra; então vêm a estrela da manhã (Vênus) e a estrela consagrada a Hermes (Mercúrio), movendo-se em órbitas com a mesma rapidez que o Sol, mas em direção oposta; e esta é a razão porque o Sol e Hermes e Lúçifer (Vênus) alcançam e são alcançados uns pelos outros²².

Quanto aos outros planetas, Platão não entra em detalhes, no *Timaeus*, sobre sua posição, afirmando apenas que eles se movem com

velocidades diferentes tanto entre eles, como em relação aos três primeiros (Sol, Mercúrio e Vênus), mas segundo uma proporção devida²³.

Uma vez que cada um dos planetas chegou à sua órbita apropriada, eles começam a girar na órbita do Outro que é oblíqua e

passa através da órbita do Mesmo e é dominada por ela. Uns giram em órbitas maiores e outros em órbitas menores - aqueles que têm órbitas menores giram mais rapidamente, e aqueles que tem órbitas maiores mais lentamente. Agora, devido ao movimento do Mesmo, aqueles que giram mais rápido parecem ser alcançados por aqueles que se movem mais lentamente, embora realmente sejam estes que são alcançados, pois o movimento do Mesmo faz eles todos girarem em espiral²⁴.

Assim, segundo Platão, a real trajetória no espaço com respeito à Terra, de qualquer um dos planetas, é transformada em uma espiral, isto devido à combinação do movimento do Mesmo (movimento circular de leste para oeste,

²²PLATÃO. *Timaeus*, 38^c-38^e.

²³PLATÃO. *Timaeus*, 36^d-36^e.

²⁴PLATÃO. *Timaeus*, 38-39^b.

em um plano paralelo ao equador celeste) com o movimento do Outro (movimento circular em um plano que corta o equador). Tal órbita, obviamente, está incluída entre dois planos paralelos ao Equador celeste, sendo a distância entre cada um dos planos e o Equador igual ao afastamento máximo de cada um dos planetas em relação ao Equador.

Cornford, comentando as conseqüências da teoria do movimento duplo de Platão, afirma que uma delas é a rotação espiral, a qual, segundo Cornford, é explicada por Martin como segue:

O Sol, por exemplo, que neste sistema é um planeta, descreve do solstício de inverno ao solstício de verão, sobre a superfície de uma esfera cujo raio é a distância do Sol ao centro da Terra, uma espiral ascendente contida entre os dois trópicos; então ele desce novamente a partir do solstício de verão ao solstício de inverno descrevendo sobre a mesma esfera uma espiral inversa anterior. As duas espirais tomadas juntas completam tantas voltas quanto são os dias do ano. As voltas das duas espirais tornam-se maiores quando elas se aproximam do Equador, mas elas são todas percorridas em tempos iguais (Martin, ii, 76).

Se imaginarmos [conclui Cornford] um modelo de esferas celestes revolvendo como um todo para a direita, enquanto os círculos planetários dentro revolvem mais lentamente para a esquerda, a rotação espiral será a trajetória seguida por qualquer um dos planetas sobre uma esfera com o mesmo raio que aquele do círculo do próprio planeta. Não obstante, será verdade que o planeta, com respeito ao seu próprio movimento, mantém sempre uma trajetória circular, representada pelo círculo que lhe é fixado²⁵.*

Assim, os movimentos dos planetas, no Universo platônico, embora não constituindo círculos perfeitos, são certamente combinações de círculos perfeitos, já que os planetas, sendo corpos celestes, devem mover-se da maneira

²⁵CORNFORD, 1948, p. 114.

mais adequada à sua elevada categoria, ou seja, mover-se com o movimento circular uniforme.

A idéia platônica de que o movimento observado dos corpos celestes pode ser decomposto em movimentos circulares e uniformes influenciou todos os sistemas antigos e medievais. Aristóteles, por exemplo, tentou explicar os fatos observados nos Céus por meio de seu sistema de esferas concêntricas que giravam uniformemente.

Capítulo 3

A Dinâmica Celestial e a Mecânica Terrestre de Aristóteles

"Sob o alto céu da sempiterna paz gira uma esfera a cuja influência bela se anima tudo o que por dentro jaz" (ALIGHIERI, D. A divina comédia, Paraíso, canto II, 112-115).

O Cosmo ou Universo aristotélico tem muitas características comuns àquele de Platão. Em ambos os sistemas, o Universo se contém a si mesmo e é auto-suficiente; e tem como estrutura básica o Universo das duas esferas, sendo formado por uma pequena esfera, a Terra, suspensa no centro geométrico de uma vasta, porém finita, esfera em rotação, que leva consigo as estrelas fixas. Além da esfera exterior não há nada, nem espaço, nem matéria. Diz Aristóteles em seu Tratado *De Caelo*:

A partir de nosso argumento, é evidente que não somente não há, mas também que nunca poderia haver, qualquer massa de nenhum corpo fora da circunferência [habitualmente chamada de todo ou totalidade, "o Céu"]. O

* Na Divina Comédia, escrita por volta de 1300, Dante combinou a visão cosmológica de Aristóteles com a concepção cristã de paraíso, purgatório e inferno. Segundo John North, nesta que foi a mais majestosa de todas as alegorias medievais, Dante teria desenvolvido o tema moral "dentro da estrutura cosmológica aristotélica. O paraíso de Dante é mais do que uma contínua sucessão de descrições da felicidade celestial. Ele tem uma estrutura astronômica, e quando a alma, por exemplo, se eleva um nível após o outro, os níveis são simplesmente as esferas planetárias" (NORTH, J. *The Medieval Background to Copernicus*. In: BEER, A. & STRAND, K. (ed.). *Copernicus, Yesterday and Today*. New York : Pergamon, 1975, p. 5).

mundo como um todo, portanto, inclui toda matéria disponível (...) Portanto, nem há agora, nem houve antes, nem poderá existir mais de um Céu, mas este nosso Céu é um, único e completo.

Além disso é evidente que não há lugar, nem vazio, nem tempo fora do Céu. Pois em todo lugar há possibilidade de haver um corpo; e o vazio se define como aquele em que a presença de um corpo, embora não real, é possível (...)²⁶.

Uma diferença entre ambas as cosmologias é que a de Aristóteles apresenta vários refinamentos, descrevendo com muito mais detalhes a constituição interior do Universo. Os refinamentos geométricos do sistema aristotélico são derivados, na verdade, de Eudoxos e Callipos²⁷.

Além disso, Aristóteles, como afirma Dreyer, ao contrário de Platão,

procura a idéia na sua realização concreta nos fenômenos da natureza, e todos os resultados da experiência e observação, portanto, chamavam sua atenção²⁸.

Sua cosmologia estava fundada na "percepção sensível" e no senso comum e, embora incorporando em seu sistema os artifícios geométricos do sistema matemático das esferas homocêntricas de Eudoxos e Callipos, Aristóteles considera problemática a identificação do espaço concreto do Cosmo, que para ele é finito e ordenado, com o espaço da geometria²⁹.

²⁶ ARISTÓTELES, *De Caelo* I, 279^a 5-15.

²⁷ Eudoxos, (408-355 a.C.), discípulo de Platão, foi o primeiro a responder à pergunta de Platão sobre os movimentos cíclicos dos planetas. No sistema homocêntrico, proposto por Eudoxos, cada planeta se encontra em uma esfera interior de um grupo de duas ou mais delas, interconectadas e concêntricas, cuja rotação simultânea em torno de diferentes eixos reproduz os movimentos observados dos planetas.

²⁸ DREYER, 1953, p. 108.

²⁹ A este respeito é sugestiva uma passagem do *De Caelo* II, 293^b 1-5, onde Aristóteles, comentando a cosmologia dos pitagóricos, afirma:

Dois princípios fundamentais sustentam a cosmologia aristotélica, a saber:

(1) que o comportamento das coisas era devido a formas ou naturezas qualitativamente determinadas, e (2) que em sua totalidade essas naturezas eram arranjadas para formar um todo ou Cosmo hierarquicamente ordenado³⁰.

A maior parte do Cosmo de Aristóteles (Figura 3) está cheia por um só elemento: o éter, que é um elemento celeste, a quinta essência, puro, eterno, inalterável e incorruptível³¹.

Fixada no centro do Universo estava a esfera da Terra, sendo rodada concentricamente por uma série de esferas ocas. As primeiras delas correspondem às dos três elementos terrestres, a água, o ar e o fogo, respectivamente.

Imediatamente após a esfera de fogo existem, segundo Aristóteles, exatamente cinquenta e cinco esferas cristalinas interconectadas, cujo centro comum é a Terra³². Cada um dos sete planetas, Lua, Mercúrio, Vênus, Sol, Marte, Júpiter e Saturno, se encontra no interior de um grupo destas esferas, cada uma das quais completa uma revolução axial em intervalos de tempo diferentes repro-

"Eles sustentam que a parte mais importante do mundo, que é o centro, seria mais exatamente guardada, e chamam-na, ou melhor ao fogo que ocupa este lugar, 'Altar de Zeus', como se a palavra 'centro' fosse inteiramente inequívoca, e o centro da figura matemática fosse sempre o mesmo da coisa ou o centro natural".

³⁰ CROMBIE, A.C. *Augustine to Galileo*. Cambridge: Harvard University, 1979, v. 1, p. 89.

³¹ Ver: ARISTÓTELES. *De Caelo*, 270^b 20-30.

³² O sistema de esferas homocêntricas proposto por Aristóteles encerra em um mecanismo físico o sistema matemático das esferas homocêntricas elaborado por Eudoxos e seu sucessor, Callipos. Assim, para Aristóteles, as esferas não são apenas representações de fórmulas matemáticas, mas antes elas tem realidade física compondo uma vasta máquina na qual os corpos celestes são mantidos em movimento.

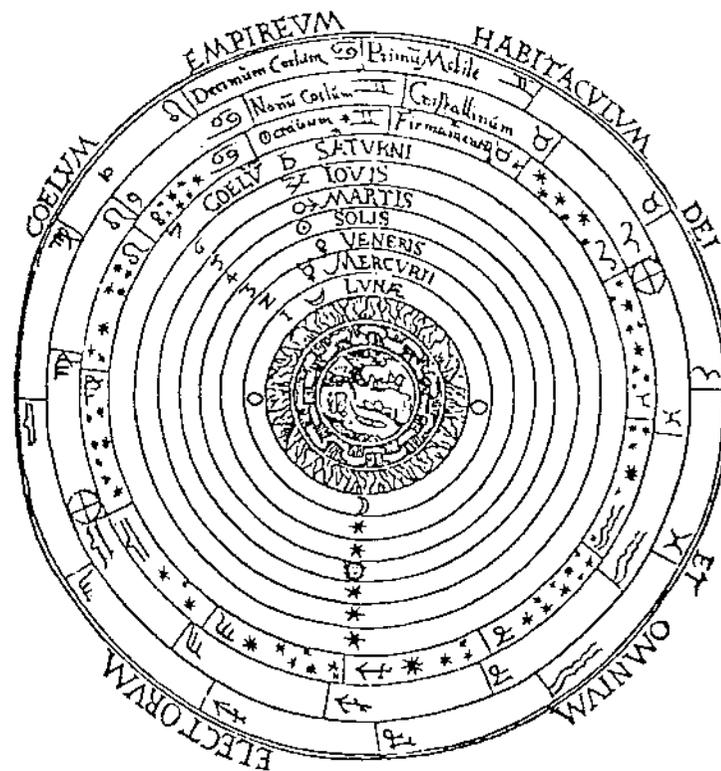


FIGURA 3 - "Aristotle's Cosmology. From Petrus Apianus, *Cosmographia per Gemma Phisius Restituta*, Antwerp, 1539". Apud CROMBIE, 1979, v. 1, p. 130.

duzindo assim, com boa aproximação, o movimento planetário e explicando os movimentos irregulares, as estações do ano e os movimentos retrógrados dos planetas, observados temporariamente³³.

A função dessas esferas era a de proporcionar uma engrenagem capaz de manter em rotação o conjunto de esferas homocêntricas. O movimento de todo o sistema era transmitido pelo contato de uma esfera com as outras. A esfera das estrelas, em seu movimento, arrasta a mais exterior das sete esferas homocêntricas, que compõem o conjunto que leva consigo Saturno. As rotações axiais destas sete esferas (com diferentes velocidades, algumas vezes em sentidos diferentes e em torno de diferentes eixos) reproduzem o movimento de Saturno, não permitindo que este seja carregado, tal qual uma estrela fixa, pelo movimento diurno da esfera estelar. Dentro da penúltima esfera do conjunto de Saturno, Aristóteles adiciona uma esfera que, devido à posição dos seus pólos, sentido e magnitude da sua velocidade de rotação, move-se como se estivesse unida à primeira esfera que, por sua vez, move-se junto com a esfera das estrelas fixas. Portanto, a última esfera do grupo das sete esferas de Saturno move-se da mesma forma que a esfera das estrelas fixas. E esta última esfera transmitirá o movimento ao seu vizinho mais próximo, a primeira esfera do planeta seguinte, Júpiter. Assim Júpiter se moverá como se as esferas de Saturno não existissem. Uma engrenagem semelhante àquela que Aristóteles propôs para as esferas de Saturno, ele propõe para os outros planetas. Através deste

³³De um modo geral, os planetas movem-se diariamente para oeste sendo carregados pela esfera das estrelas fixas, e simultaneamente deslocam-se lentamente para leste no seu chamado "movimento normal". Porém este movimento normal de cada um dos planetas, exceto aquele do Sol e da Lua, é substituído, durante breves intervalos de tempo, por um movimento de retrocesso para oeste, conhecido como movimento retrógrado dos planetas.

mecanismo o movimento é finalmente transmitido à esfera mais baixa, aquela responsável pelo movimento da Lua³⁴.

A última esfera, a da Lua, divide o Universo em duas regiões nitidamente distintas, a terrestre e a celestial, ocupadas por materiais distintos e governadas por leis distintas. Todas as coisas que compõem a região celestial, a saber, as estrelas, os planetas e as esferas cristalinas, são feitas de éter. Todas as coisas que pertencem à região terrestre, por outro lado, são feitas de um dos quatro elementos terrestres: a terra, o ar, o fogo e a água (ou de uma combinação deles).

No Universo aristotélico, cada uma das coisas, seja celestial ou terrestre, tem seu lugar "natural" e seu movimento local "natural"³⁵ para este lugar. Todo movimento que não é natural é violento.

Além de dividir o movimento local em natural e violento, Aristóteles divide o movimento natural em movimento celestial, que é circular e uniforme; e o terrestre, que é retilíneo (ou para cima ou para baixo).

A tendência do movimento para cima ou para baixo das coisas terrestres depende da natureza da substância de que o corpo particular é composto.

Assim, o lugar natural da Terra, que é absolutamente pesada, é no centro do Universo (que, por sua vez, coincide com o centro da Terra) e seu movimento natural é para

³⁴Para mais detalhes, ver: DREYER, 1953, cap. 5.

³⁵O conceito aristotélico de movimento (*kinesis*) não corresponde a um estado, como ocorre na dinâmica moderna, mas a uma espécie de processo de mudança, é a realização [grifo meu] do que existe potencialmente, na medida em que existe potencialmente" (ARISTÓTELES. *Physica* III, 1, 201^a 10). E, como afirma Aristóteles, "é sempre com respeito a substância ou quantidade ou qualidade ou lugar que o que muda muda" (*Physica* III, 1, 200^b 30-35). Assim, o movimento para Aristóteles inclui não apenas a locomoção, como também outros tipos de mudanças, como alteração qualitativa, geração e corrupção.

baixo, ou seja, em direção ao centro do Universo; o lugar natural da água é a região imediatamente após a região central e seu movimento é para baixo, exceto na região central; o lugar natural do fogo, que é absolutamente leve, é a região externa da esfera sublunar e seu movimento é para cima em relação ao centro do Universo; finalmente, o lugar natural do ar é a região intermediária entre a água e o fogo, e seu movimento natural é para cima, exceto na região do fogo³⁶. O lugar e o movimento natural dos corpos compostos por mais de um elemento correspondem àqueles do elemento predominante.

Todo movimento local, para Aristóteles, é ou retilíneo ou circular, ou uma combinação destes dois, isto porque, segundo ele, estas duas linhas, retilínea e circular, são as únicas magnitudes simples³⁷. No caso dos corpos simples que são entendidos por Aristóteles como "aqueles que possuem um princípio de movimento em sua própria natureza"³⁸, seus movimentos devem ser ou retilíneos ou ao redor de um centro³⁹.

E embora o movimento circular seja natural para os corpos celestes, ele é não-natural para os terrestres, pois, afirma Aristóteles:

Todo movimento ou é natural ou não-natural (forçado), e aquele movimento que é não-natural para um corpo é natural para outro - assim, por exemplo, é o caso com o movimento para cima e para baixo, que é natural e não-natural para o fogo e para a terra, respectivamente. Segue-se necessariamente que o movimento

³⁶A este respeito ver: ARISTÓTELES. *De Caelo* IV, 4, 311^b 5-15.

³⁷Ver: ARISTÓTELES. *De Caelo* I, 2, 268^b 14-15.

³⁸ARISTÓTELES. *De Caelo* I, 268^b 30. Aristóteles continua sua definição de corpos simples, corpos regidos por um princípio único, apresentando dois exemplos: "o fogo e a terra com suas espécies e tudo quanto for semelhante a eles".

³⁹Ver: ARISTÓTELES. *De Caelo* I, 268^b 10-30.

circular, sendo não-natural para estes corpos, é natural para algum outro (...). Se, por outro lado, o movimento de rotação dos corpos em torno de um centro fosse não-natural, seria extraordinário e na verdade inconcebível que fosse contínuo e eterno, sendo contrário à natureza⁴⁰.

Deste argumento segue-se necessariamente que se a Terra girasse em torno de seu próprio eixo, como propôs Heráclides de Pontos, um discípulo de Platão (séc. IV a.C.), o seu movimento não poderia ser eterno, já que é não-natural.

Para que o movimento de rotação axial da Terra fosse eterno, segundo a dinâmica aristotélica, ele deveria ser o movimento "natural" da mesma. Porém, se assim o fosse, todas as partículas que pertencem à Terra deveriam, cada uma delas, compartilhar, com a Terra, de seu movimento "natural", movendo-se então, "naturalmente", segundo uma trajetória circular. Mas não é isto que é observado; elas, pelo contrário, movem-se ao longo de uma linha reta em direção ao centro do Universo.

Portanto, o movimento circular seria para a Terra forçado e não-natural. Mas "como todas as coisas cujo movimento é violento e não-natural são movidas por algo, e algo exterior a elas"⁴¹ (um motor em contato direto), temos que, para que o movimento da Terra fosse eterno, contínuo e infinito, haveria a necessidade de que algo exterior a ela causasse este movimento infinito, porém, "nada finito pode causar movimento que dure um tempo infinito"⁴² e uma força infinita não pode residir em uma magnitude finita. Mesmo no caso da Terra ser movida por algo que está, ele

⁴⁰ARISTÓTELES. *De Caelo* I, 269^a 30-35, 269^a 1-10.

⁴¹ARISTÓTELES. *Physica* VIII, 255^b 30-35. Trad. por R.P. Hardie & R.K. Gaye. In: HUTCHINS, 1952, v. 8. Doravante as citações da *Physica* serão feitas a partir desta tradução.

⁴²ARISTÓTELES. *Physica*, 266^a 10-25.

próprio, em movimento, e que, novamente, é movido por algo exterior que está em movimento, e assim continuamente, segundo afirma Aristóteles, a série não poderia ir ao infinito⁴³. Portanto, o movimento de rotação da Terra, em torno do seu próprio eixo, "sendo não-natural e violento, não poderia ser eterno; porém a ordem do Universo é eterna"⁴⁴.

Segue-se que o movimento circular observado no Universo, sendo eterno, não pode ser atribuído à Terra.

Embora o sistema das esferas homocêntricas, proposto por Aristóteles, como modelo explicativo dos movimentos celestes, desse conta das principais irregularidades planetárias, tais como os movimentos retrógrados dos planetas, ele e todos os sistemas que postulavam que o Universo era formado de uma série de esferas concêntricas não conseguiam dar conta de um certo número de fenômenos óbvios, em particular a variação no brilho aparente dos planetas e no diâmetro aparente da Lua, e do fato de que os eclipses solares são algumas vezes totais e outras vezes anulares.

Esta dificuldade dos sistemas das esferas homocêntricas deve-se ao fato de que eles supunham que a distância entre cada corpo celeste e a Terra era invariável. Assim sendo, todos os fenômenos celestes deveriam ser explicados simplesmente por meio das rotações das diversas esferas.

Vários astrônomos gregos, depois de Aristóteles, tentaram formular sistemas que explicassem os fatos que o sistema aristotélico não dava conta. Entre eles destaca-se o proposto por Apollonios (240-170 a.C.) e Hipparchos (190-120 a.C.): o sistema de epiciclo e deferente.

⁴³Ver ARISTÓTELES. *Physica* VII, 242^a 15-20.

⁴⁴ARISTÓTELES. *De Caelo* II, 14, 296^a 25-30.

Capítulo 4

As Primeiras Teorias Heliocêntricas: Heráclides de Pontos e Aristarchos de Samos

Embora Platão e Aristóteles nunca tenham abandonado a idéia de que a Terra permanecia em repouso, no centro do Universo, enquanto o Céu girava de leste para oeste fazendo o dia e a noite e embora a cosmologia aristotélica tenha dominado o pensamento ocidental até meados do século XVI, alguns antigos adotaram sistemas claramente contrários às cosmologias platônicas e aristotélicas, dotando a Terra de algum tipo de movimento.

Entre os primeiros a acreditarem no movimento da Terra, além de Philolaus e de alguns membros da escola pitagórica, como vimos anteriormente, destacam-se: Heráclides (Heracleides, Herakleides) de Pontos (387-315/310 a.C.), um contemporâneo de Aristóteles e talvez aluno de Platão, que considerava o Cosmo infinito e defendia uma teoria semi-heliocêntrica, segundo a qual Vênus e Mercúrio giram, como satélites, ao redor do Sol, enquanto que este e outros corpos celestes giram ao redor da Terra, que por sua vez gira em torno de seu próprio eixo em 24 horas (ver Figura 4); e Aristarchos de Samos (310-230 a.C.), precursor de Copérnico, que supôs que as estrelas fixas e o Sol estão imóveis, mas que a Terra possui dois movimentos, o de rotação diurna em torno do seu eixo e o de translação ao redor do centro do Universo, onde está o Sol.

Devemos notar que Heráclides pode não ter sido o único a sustentar a hipótese da rotação axial diária da Terra, já que Ecphantus de Siracusa (Séc. IV a.C.), um pitagórico,

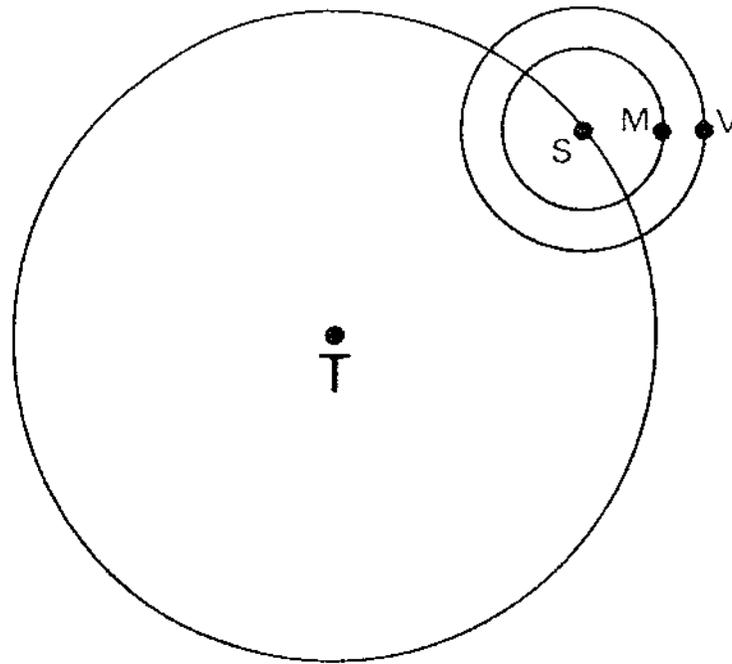


FIGURA 4 - Sistema semi-heliocêntrico de Heráclides de Pontos.

segundo Hippolytus, também teria afirmado que “a Terra, o centro do Universo, move-se ao redor de seu próprio centro na direção leste”⁴⁵. Cícero, por sua vez, apelando para a autoridade de Theophrastus, dá a prioridade da teoria da rotação axial da Terra a Hicetas (?-338 a.C.), também de Siracusa.

Afirma Cícero:

Hicetas ... sustentava que o Céu, o Sol, a Lua e as estrelas, todos os corpos celestes, em poucas palavras, estão em repouso; e que nada no Universo move-se, exceto a Terra, e como a Terra gira e roda em torno de seu eixo em velocidade muito alta, o efeito é exatamente o mesmo, como se o Céu estivesse rodando e a Terra estivesse em repouso⁴⁶.

Porém, muito pouco se sabe sobre os trabalhos de Ecphantus e Hicetas; dessa forma, não se pode afirmar com certeza se eles realmente pensaram na rotação axial da Terra.

Quanto a Heráclides de Pontos, não há dúvida de que ele pensou na rotação axial da Terra, nem há dúvida com respeito à originalidade de sua teoria semi-heliocêntrica.

Heráclides de Pontos [afirma Simplicius] supôs que a Terra está no centro e gira [lit. move-se em um círculo] enquanto o Céu está em repouso, e ele pensou isto para salvar as aparências⁴⁷.

Porém, embora Heráclides tenha dado o primeiro passo em direção à teoria heliocêntrica, ele ainda manteve a Terra no centro do Universo. O próximo passo só foi dado por Aristarchos de Samos, um genial astrônomo e geômetra,

⁴⁵HYPPOLYTUS. *Refutation of all Heresies* I, 15. Apud COHEN & DRABKIN, 1966, p. 106.

⁴⁶CICERO. *Academica* II, 39-123. Apud COHEN & DRABKIN, 1966, p. 106.

⁴⁷SIMPLICIUS. *Commentary on Aristotle's De Caelo*, 519 9-11. Apud HEATH, 1981, v. 1, p. 317.

que, deslocando a Terra do centro do Universo, desenvolveu um sistema astronômico que antecipou as hipóteses heliocêntricas de Copérnico.

O sistema de Aristarchos pode ser descrito nas palavras de um jovem contemporâneo seu, e, talvez, seu principal comentador: Archimedes (287-212 a.C.). No *Arenarius* Archimedes afirma:

Você (Rei Gelon) está ciente de que "Universo" é o nome dado por muitos astrônomos à esfera cujo centro é o centro da Terra, que seu raio é igual à linha reta entre o centro do Sol e o centro da Terra. . . Mas Aristarchos publicou um livro considerando certas hipóteses, no qual aparece, como uma consequência destas suposições, que o Universo é muitas vezes maior do que o "Universo" mencionado acima. Suas hipóteses são que as estrelas fixas e o Sol permanecem imóveis, que a Terra gira em torno do Sol em uma circunferência de um círculo, o Sol repousa no meio da órbita*, e que a esfera das estrelas fixas, situada ao redor do mesmo centro que o Sol, é tão grande que o círculo, no qual ele supôs a Terra revolver, mantém uma proporção tão grande em relação à distância das estrelas fixas quanto o centro da esfera mantém em relação à sua superfície⁴⁸.

O cálculo da distância entre a esfera da órbita da Terra e o centro desta esfera, ou seja, da distância entre a Terra e o Sol, que repousa no centro do Universo, foi desenvolvido por Aristarchos, através de um método extremamente en-

* O significado preciso da última frase é duvidoso: Neugebauer traduz assim: "a circunferência de um círculo que repousa no meio do curso (dos planetas)" (1942, p. 6); e Dreyer traduz assim: "a Terra é carregada ao redor do Sol em um círculo que está no meio do curso". Dreyer comenta, em seguida, que este círculo é aquele "que nós chamamos de Eclíptica que naqueles dias era conhecida como círculo médio do Zodíaco" (DREYER, 1953, p. 37).

⁴⁸ARCHIMEDES. *Sand-Reckoner* ou *Arenarius*. *Apud* HEATH, 1981, v. 2, p. 3.

genhoso, no qual ele calcula as distâncias comparativas do Sol e da Lua em relação à Terra.

Este cálculo é apresentado no extenso tratado *Sobre os tamanhos e as distâncias do Sol e da Lua*⁴⁹ que começa com seis hipóteses a partir das quais Aristarchos pretende provar dezoito proposições, por meio de demonstrações absolutamente rigorosas.

As três primeiras hipóteses são:

- 1) que a Lua recebe a luz do Sol;
- 2) que a Terra se comporta como um ponto e centro para a esfera na qual a Lua se move;
- 3) que, quando a Lua nos parece dividida em duas partes iguais, o grande círculo que divide as porções clara e escura da Lua está na direção do nosso olho⁵⁰.

Dado que a Lua recebe sua luz do Sol no momento da dicotomia, os centros do Sol, da Lua e da Terra formam um triângulo retângulo, como mostra a Figura 5.

Além destas hipóteses, Aristarchos faz mais três, duas das quais são necessárias para o cálculo das distâncias comparativas do Sol e da Lua em relação à Terra.

A primeira corresponde a uma estimativa do ângulo β , aquele formado junto à Terra no momento da dicotomia da Lua, como sendo "menor do que um quadrante, por 1/30

⁴⁹SAMOS. *On the Sizes and Distances of the Sun and Moon*. Trad. por T.L. Heath (Oxford, 1913). A respeito deste que foi o único tratado de Aristarchos que foi preservado, devemos notar que nele Aristarchos não se refere às suas hipóteses heliocêntricas, talvez porque estas hipóteses tenham sido formuladas depois dele escrever o tratado em questão. Se bem que seu método geométrico de cálculo das distâncias comparativas do Sol e da Lua independa da real posição da Terra, do Sol e da Lua; ele se baseia nas posições relativas destes corpos celestes.

⁵⁰SAMOS. *On the Sizes and Distances of the Sun and Moon*. *Apud* COHEN & DRABKIN, 1966, p. 109.

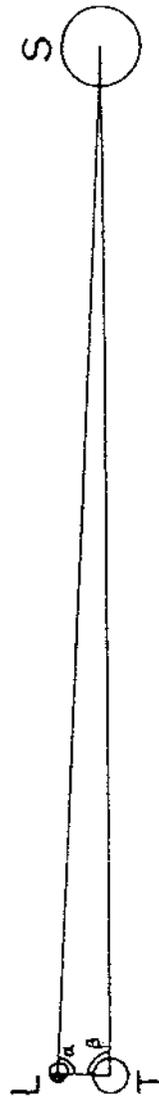


FIGURA 5 - Medidas de Aristarco das distâncias relativas do Sol e da Lua à Terra, onde α , ângulo formado junto à Lua, é um ângulo reto.

de um quadrante"⁵¹ (hipótese 4), isto é, 87° . A outra é a hipótese 5, de acordo com a qual "a largura da sombra (da Terra) é de duas Luas", isto é, a largura da sombra da Terra quando a Lua a atravessa é de duas Luas.

A sexta e última hipótese é "que a Lua subtende 1/15 de um signo do Zodíaco"⁵², ou seja, 1/15 do 30° , portanto, o diâmetro angular aparente da Lua seria de 2° .

Porém Archimedes atribui a Aristarchos a descoberta de que o diâmetro angular aparente do Sol é cerca de 1/720 do círculo do Zodíaco, isto é, $0,5^\circ$, determinação esta bastante próxima ao valor real.

Ou a descoberta que Archimedes atribui a Aristarchos foi feita depois da publicação do tratado *Sobre os tamanhos e distâncias* ou, como sugere Heath, a hipótese nº 6 não deve ser entendida como um dado determinado pela observação, pois

como a matemática de seu tratado não depende do real valor tomado, 2° pode ter sido suposto [por Aristarchos] meramente como ilustração; ou pode ter sido uma conjectura sobre o diâmetro aparente feita antes dele ter pensado na tentativa de medi-lo⁵³.

⁵¹ Arthur Berry, ao comentar em 1889 esta medida, afirma que o erro que Aristarchos cometeu ao determinar este ângulo "é devido à dificuldade em determinar com precisão suficiente o momento em que a Lua está meio cheia: o contorno divisório das partes clara e escura da face da Lua é na realidade (devido às irregularidades da superfície da Lua) uma linha débil e mal definida, tal que a observação na qual Aristarchos baseou seu trabalho não poderia ter sido feita com qualquer precisão até mesmo com nossos modernos instrumentos, muito menos com aqueles disponíveis no seu tempo" (BERRY, A. *A Short History of Astronomy*. New York : Dover, 1971, §32, p. 34-5.)

⁵² SAMOS. *On the Sizes and Distances of the Sun and Moon*. Apud COHEN & DRABKIN, 1966, p. 109.

⁵³ HEATH, 1981, v. 2, p. 4. Sir Thomas Heath nota que não é conhecido como Aristarchos chegou ao valor de $0,5^\circ$, um valor tão preciso, para o diâmetro aparente do Sol. Mas como é creditada a ele a invenção de um relógio de Sol aperfeiçoado, ele pode, segundo

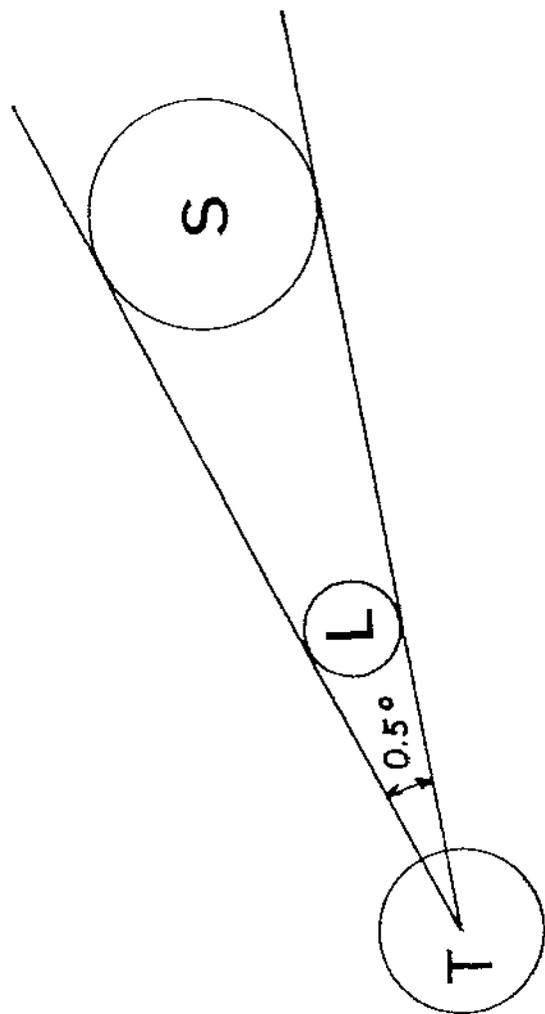


FIGURA 6 - Medida de Aristarcho do diâmetro angular aparente do Sol.

A partir das cinco primeiras hipóteses descritas acima, Aristarcho se acha apto a demonstrar, por exemplo, a proposição nº 7 do seu tratado; é ela:

A distância do Sol à Terra é mais do que dezoito vezes maior e menos do que vinte vezes a distância da Lua à Terra⁵⁴.

Embora esta estimativa das distâncias relativas do Sol e da Lua em relação à Terra tenha representado um grande aperfeiçoamento sobre todos os resultados obtidos até então, ele ainda estava muito longe da real avaliação, segundo a qual o Sol está cerca de quatrocentas vezes mais longe da Terra do que a Lua.

O erro de Aristarcho deve-se à enorme dificuldade em se determinar, com precisão, o ângulo junto à Terra no momento da dicotomia. Segundo a avaliação de Aristarcho, este ângulo é de 87°, quando na realidade é de 89,5°⁵⁵. Esta imprecisão levou Aristarcho a estimar, erroneamente, o ângulo junto ao Sol como sendo 3°.

A dificuldade em se determinar com precisão os ângulos internos do triângulo formado pela Terra, Sol e Lua no momento da dicotomia, quando então o ângulo junto à Lua é de 90°, deve-se à impossibilidade de se saber, exatamente, quando a metade do disco da Lua está iluminada pela luz do Sol.

Portanto, a imprecisão na estimativa de Aristarcho das distâncias comparativas do Sol e da Lua em relação à Terra deve-se exclusivamente a dificuldades práticas.

Aqui [na investigação de Aristarcho], nós encontramos [como afirma Heath] uma seqüência lógica de

⁵⁴SAMOS. *On the Sizes and Distances of the Sun and Moon*. Apud COHEN & DRABKIN, 1966, p. 110.

⁵⁵Com respeito às dificuldades em se efetuar esta medida ver nota 51 deste capítulo.

proposições e rigor absoluto das demonstrações características da geometria grega⁵⁶.

Devemos notar que a hipótese heliocêntrica de Aristarchos teve pouco sucesso na antigüidade. Primeiro porque ela contrariava a doutrina filosófica aristotélica então dominante, segundo a qual o lugar natural da Terra era o centro do Universo. Segundo porque, como notaram Cohen e Drabkin, ela também ia contra a

doutrina de um fogo central [dos pitagóricos] que, em várias formas, tornou-se uma matéria de crença religiosa*. Os astrônomos, contudo, de um modo geral rejeitaram as hipóteses heliocêntricas sobre bases científicas. Se a Terra gira em uma órbita ao redor do Sol, a posição das estrelas fixas tal como observada a partir de várias partes da órbita da Terra deveria variar. Uma vez que tal variação não era observada na antigüidade (...) Aristarchos foi compelido a supor que a esfera das estrelas fixas era incomparavelmente maior do que a esfera que continha a órbita da Terra⁵⁷.

⁵⁶ HEATH, 1981, v. 2, p. 4.

* Cf. PLUTARCH. *De facie in Orbe Lunae*, 922F-923A.

⁵⁷ COHEN & DRABKIN, 1966, p. 107. Cabe notar que o fenômeno da paralaxe estelar só foi detectado a partir de 1830, e sua observação requer um telescópio e técnicas de observação bastante apurados, já que a variação na posição das estrelas é extremamente pequena.

Segundo Koyré, "Aristarchos não teve sucesso, e não se sabe por quê. Por vezes se disse que a idéia do movimento da Terra contradizia demasiadamente as concepções religiosas dos gregos. Penso que, antes, foram outras as razões que determinaram o insucesso de Aristarchos, certamente as mesmas que, desde Aristóteles e Ptolomeu até Copérnico, se opuseram a toda hipótese não-geocêntrica: foi a invencibilidade das objeções físicas contra o movimento da Terra (...). Ora, para a física antiga, o movimento circular (de rotação) da Terra, no espaço, se afigura – e devia afigurar-se – como oposto a fatos incontestáveis e em contradição com a experiência cotidiana; em suma, como uma impossibilidade física. Ainda outra coisa constituía obstáculo à aceitação da teoria de Aristarchos, a saber, a grandeza desmesurada de seu Universo, pois se os gregos admitiam que o Uni-

Assim, Aristarchos explicou a ausência de paralaxe estelar e salvou as hipóteses heliocêntricas.

Além do problema de paralaxe, as hipóteses heliocêntricas de Aristarchos não tiveram sucesso em explicar alguns outros fenômenos, como a desigualdade das estações.

Esta é, como salientam Cohen e Drabkin, a provável razão por que Hipparchos e, mais tarde, Ptolomeu adotaram as hipóteses geocêntricas, que juntamente com os excêntricos, epiciclos e deferentes tornaram-se o sistema astronômico dominante não só na antigüidade como também na Idade Média.

verso era bastante grande em relação à Terra (...), ainda assim as dimensões postuladas pela hipótese de Aristarchos lhes pareciam excessivamente inconcebíveis (...). Também se dizia (...) que, se não se verifica nenhuma paralaxe, é que a Terra não gira. Admitir que a abóboda celeste é tão grande que as paralaxes das fixas não são observáveis parecia contrário ao bom senso e ao espírito científico" (KOYRÉ, 1973, p. 91).