

Maria Helena Oliveira Lopes

**A Retrogradação dos Planetas e Suas
Explicações:
Os Orbes dos Planetas e Seus Movimentos, da
Antigüidade a Copérnico**

**Dissertação apresentada à Banca
Examinadora da Pontifícia Universidade
Católica de São Paulo, como exigência
parcial para obtenção do título de Mestre em
História da Ciência, sob a orientação do Prof.
Dr. Roberto de Andrade Martins.**

**Pontifícia Universidade Católica de São Paulo
São Paulo**

2001

**Autorizo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos,
a reprodução desta dissertação por processos fotocopiadores ou
eletrônicos.**

Local e data: _____

Assinatura: _____

Hiparco, que nunca será venerado em demasia, descobriu uma nova estrela que apareceu em seu tempo. Devido às mudanças ocorridas no dia de sua aparição, começou a se perguntar se o mesmo não ocorria com frequência e se as estrelas que se consideram fixas não poderiam também se mover. Fez algo admirável, contou as estrelas e constelações para as futuras gerações e atribuiu a todas nomes. Com este fim, desenhou instrumentos mediante os quais assinalou a posição e tamanho de cada estrela e como resultado disso é fácil distinguir não só se as estrelas estão morrendo ou nascendo, como se movem de seus lugares e se sua luz está aumentando ou diminuindo. Ele deixou o céu como herança a todos que quiserem tomar posição nele.

Plínio

Resumo

O estudo dos céus permitiu aos sábios da Mesopotâmia a previsão de muitos fenômenos astronômicos. No entanto, esse conhecimento não levou ao desenvolvimento de modelos do universo que dessem conta dos movimentos dos astros. No mundo grego, os filósofos pré-socráticos foram adquirindo gradualmente o conhecimento dos fenômenos celestes e, ao mesmo tempo, elaborando um sistema de mundo que pudesse explicá-los. Partindo de modelos simples, a cosmologia grega foi se sofisticando e começou a gerar teorias que iam muito além dos fenômenos observáveis. Os filósofos pitagóricos deram um importante passo, procurando associar a cosmologia à matemática e procurando modelos simples – mas não necessariamente de senso comum – que pudessem explicar as aparentes irregularidades dos movimentos celestes. Com Platão, torna-se explícita a norma de procurar explicar todos os fenômenos celestes através de movimentos perfeitos: círculos ou esferas girando uniformemente. Eudoxo e Cálipo procuraram salvar os fenômenos utilizando um modelo de esferas girantes concêntricas à Terra. Essa teoria era capaz de dar conta das retrogradações dos planetas, contudo, não conseguia explicar as variações periódicas dos diâmetros angulares do Sol e da Lua e, também, as sensíveis variações de brilho observadas nos planetas, que pareciam indicar variações de distância. Alguns pensadores antigos sugeriram que a Terra poderia girar em torno de um eixo, ou mesmo que poderia se mover pelo espaço, como os planetas. Heráclides explicou o movimento peculiar de Mercúrio e Vênus sugerindo que eles giravam em torno do Sol. Aristarco propôs uma teoria em que o Sol estava imóvel, e a Terra girava em torno dele. No entanto, as teorias que ganharam maior aceitação no mundo antigo admitiam que a Terra estava parada no centro do universo e que todos os astros giravam em torno dela. Apolônio e Hiparco utilizaram círculos excêntricos e deferentes com epiciclos para descrever os movimentos dos astros, conseguindo dar conta dos fenômenos. Ptolomeu aperfeiçoou esse sistema, introduzindo no entanto mecanismos que violavam o princípio platônico de rotações uniformes. Durante a Idade Média e o Renascimento vários pensadores criticaram a teoria astronômica de Ptolomeu, mas não surgiram alternativas à altura do sistema geocêntrico alexandrino. No século XVI, Copérnico propôs sua teoria heliocêntrica sem no entanto refutar a hipótese geocêntrica. Copérnico conseguiu dar uma explicação mais natural do

movimento retrógrado dos planetas e, reinterpretando dados antigos, calculou a distância dos planetas ao Sol.

Abstract

The sages of Mesopotamia studied the skies and became able to predict several astronomical phenomena. However, this knowledge did not lead to the development of models of the universe to account the motions of the celestial bodies. In the Greek world, the presocratic philosophers gradually learned the celestial phenomena and, at the same time, developed a world system to explain them. Starting from simple models, Greek cosmology became highly refined and produced theories that went beyond observable phenomena. The Pythagoric philosophers attempted to associate cosmology to mathematics and searched for simple geometrical models – not necessarily obeying common sense – that could explain the seemingly irregular celestial motions. From Plato onwards a general norm was established that all celestial phenomena should be explained by combinations of perfect motions: circles or spheres with uniform rotation. Eudoxos and Callippos attempted to save the phenomena by nested rotating spheres concentric with the Earth. This theory was able to account for the retrograde motion of the planets. However it could not explain the periodic changes of the angular diameters of the Sun and the Moon, and the observable changes of the brightness of planets, that seemed to be related to distance changes. Some thinkers suggested that the Earth could be turning around its axis, or that it could even move in space, as the planets. Heraclides explained the peculiar motions of Mercury and Venus by suggesting that they could turn around the Sun. Aristarchos proposed a theory where the Sun was still, and the Earth rotated around it. However, the theories that gained widespread acceptance in Antiquity were those that assumed a still Earth at the centre of the universe, with all planets rotating around it. Apollonios and Hyparchos were able to save the phenomena employing eccentric circles and deferents with epicycles. Ptolemy improved this system, but introduced new mechanisms that violated the Platonic requirement of uniform rotation. During the Middle Ages and the Renaissance several authors criticised Ptolemy's astronomical theory, but there were no alternatives as commendable as the Alexandrian geocentric system. In the 16th century, Copernicus proposed his heliocentric theory, without providing a refutation of the geocentric hypothesis. Copernicus was able to provide a more natural explanation of the retrograde motion

of the planets and, by reinterpreting the old data, he computed the distances between the planets and the Sun.

Sumário

INTRODUÇÃO	1
1 – A ASTRONOMIA ANTIGA, ATÉ PLATÃO	6
1.1 INTRODUÇÃO	6
1.2 A ASTRONOMIA DA MESOPOTÂMIA.....	6
1.3 A ASTRONOMIA EGÍPCIA.....	11
1.4 O PENSAMENTO GREGO ANTES DOS FILÓSOFOS PRÉ-SOCRÁTICOS	16
1.5 TALES	18
1.6 ANAXIMANDRO.....	21
1.7 ANAXÍMENES	24
1.8 XENÓFANES E HERÁCLITO	26
1.9 PITÁGORAS.....	27
1.10 PARMÊNIDES.....	29
1.11 ANAXÁGORAS.....	30
1.12 O MODELO COSMOLÓGICO PITAGÓRICO DE FILOLAU	31
2 – A COSMOLOGIA DE PLATÃO	37
2.1 PLATÃO	37
2.2 AS IRREGULARIDADES DOS MOVIMENTOS CELESTES.....	37
2.3 ESTRUTURA GERAL DO UNIVERSO.....	39
2.4 AS VELOCIDADES DOS PLANETAS.....	41
2.5 O “TIMEU” DE PLATÃO	43
2.6 OS MOVIMENTOS DO UNIVERSO	45
2.7 OS PLANETAS	48
2.8 AS DISTÂNCIAS DOS PLANETAS	49
2.9 A ORDEM DE DISTÂNCIAS DOS PLANETAS À TERRA.....	52
3 – O MODELO DAS ESFERAS HOMOCÊNTRICAS À TERRA.....	59
3.1 INTRODUÇÃO	59
3.2 EUDOXO	62
3.3 OS PRINCÍPIOS DA TEORIA DE EUDOXO	63
3.4 O CONJUNTO DE ESFERAS	66
3.5 O MODELO LUNAR EUDOXIANO	69
3.6 O MODELO SOLAR.....	71
3.7 A HIPOPÉDIA E O MOVIMENTO RETRÓGRADO DE UM PLANETA.....	72

3.8 CÁLIPO	76
3.9 ARISTÓTELES	79
3.10 OS PRINCÍPIOS FÍSICOS.....	79
3.11 EVIDÊNCIAS DE UMA TERRA ESFÉRICA, IMÓVEL E CENTRAL	82
3.12 O MODELO DE ESFERAS DE ARISTÓTELES.....	88
3.13 AS DIFICULDADES DO MODELO DE EUDOXO.....	94
4 – ALGUMAS DISTÂNCIAS ASTRONÔMICAS	97
4.1 INTRODUÇÃO	97
4.2 POSSÍVEL MOVIMENTO DE ROTAÇÃO TERRESTRE.....	97
4.3 HERÁCLIDES DE PONTO	98
4.4 O MODELO DE UNIVERSO DE HERÁCLIDES	100
4.5 A DESCRIÇÃO DE MARTIANUS CAPELLA.....	103
4.6 ARISTARCO.....	106
4.7 AS DISTÂNCIAS DA LUA E DO SOL	109
4.8 O MÉTODO DE ARISTARCO: DISTÂNCIAS	111
4.9 COMPARAÇÃO ENTRE O RAIO DA TERRA COM OS RAIOS DA LUA E DO SOL	113
4.10 ERATÓSTENES E A MEDIDA DO TAMANHO DA TERRA.....	115
5 – A ASTRONOMIA DOS EXCÊNTRICOS, EPICICLOS E DEFERENTES	118
5.1 INTRODUÇÃO	118
5.2 APOLÔNIO DE PERGA.....	120
5.3 CÍRCULO EXCÊNTRICO	121
5.4 DEFERENTE E EPICICLO	123
5.5 EQUIVALÊNCIA ENTRE EXCÊNTRICOS E DEFERENTES COM EPICICLOS	124
5.6 HIPARCO.....	126
5.7 O MOVIMENTO DO SOL	127
5.8 O MOVIMENTO DA LUA.....	129
5.9 CÁLCULO DA DISTÂNCIA TERRA–LUA E TERRA–SOL	130
5.10 O CATÁLOGO DAS ESTRELAS.....	132
5.11 A PRECESSÃO DOS EQUINÓCIOS	133
5.12 CLÁUDIO PTOLOMEU	135
5.13 O “ALMAGESTO”	136
5.14 DEFERENTES EXCÊNTRICOS, EPICICLOS E EQUANTES	138
5.15 ALGUNS EXEMPLOS SIMPLES CONSIDERANDO-SE UM DEFERENTE E UM EPICICLO	141
5.16 OS MODELOS DE PTOLOMEU PARA OS PLANETAS	148
5.17 MOVIMENTO DO PLANETA EM LATITUDE	151
5.18 DISTÂNCIAS DOS ASTROS À TERRA	152
5.19 O UNIVERSO DE PTOLOMEU	156
6 – A ASTRONOMIA NA IDADE MÉDIA	158

6.1 INTRODUÇÃO	158
6.2 OS COMENTÁRIOS DE PROCLOS.....	162
6.3 A CIVILIZAÇÃO ISLÂMICA E A ASTRONOMIA	166
6.4 ALGUNS DESENVOLVIMENTOS DA ASTRONOMIA ISLÂMICA.....	169
6.5 O GRUPO IKHWAN AL-SAFA	171
6.6 OBSERVATÓRIOS E MEDIDAS.....	174
6.7 A ORDEM E AS DISTÂNCIAS DOS PLANETAS	175
6.8 CRÍTICAS ÀS TEORIAS ANTIGAS.....	177
6.9 A TEORIA DE HERACLEIDES NA IDADE MÉDIA	180
6.10 O RENASCIMENTO DA ASTRONOMIA NA EUROPA	183
6.11 ANTES DE COPÉRNICO	187
7 – O SISTEMA HELIOCÊNTRICO.....	190
7.1 INTRODUÇÃO	190
7.2 COPÉRNICO.....	190
7.3 OS PRINCÍPIOS DA TEORIA DE COPÉRNICO.....	193
7.4 A ORDEM DOS PLANETAS	198
7.5 POSSÍVEIS RAZÕES DE COPÉRNICO EM TRANSFORMAR A LUA NUM "SATÉLITE" DA TERRA.....	199
7.6 O MOVIMENTO RETRÓGRADO.....	200
7.7 EXPLICAÇÃO DO MOVIMENTO RETRÓGRADO PARA UM PLANETA COM "ÓRBITA EXTERNA"	205
7.8 EXPLICAÇÃO DO MOVIMENTO RETRÓGRADO PARA UM PLANETA COM "ÓRBITA INTERNA"	207
7.9 PERÍODOS HELIOCÊNTRICOS DOS MOVIMENTOS DOS PLANETAS	208
7.10 DISTÂNCIA AO SOL DE UM PLANETA INTERNO	210
7.11 DISTÂNCIA AO SOL DE UM PLANETA EXTERNO	212
7.12 OS EPICICLOS DA TEORIA DE COPÉRNICO.....	215
7.13 OUTROS ASPECTOS DA TEORIA DE COPÉRNICO	217
7.14 A MOTIVAÇÃO DO TRABALHO DE COPÉRNICO.....	219
COMENTÁRIOS FINAIS	223
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	229

Introdução

Este trabalho estuda alguns aspectos da história da astronomia, da Antigüidade até Copérnico. Abrangendo um período tão extenso, é impossível discutir detalhadamente todos os aspectos dessa história. O foco principal do estudo será analisar como as concepções sobre a estrutura do universo foram se alterando, até Copérnico, influenciadas por pressupostos filosóficos sobre a simplicidade e harmonia da natureza e pela busca de explicações para as irregularidades aparentes dos movimentos dos astros.

No mundo grego, o avanço do conhecimento astronômico observacional foi acompanhado por modelos cada vez mais sofisticados do universo. Inicialmente esses modelos eram qualitativos, mas depois foi surgindo a tentativa de quantificar a estrutura do universo (distâncias e velocidades dos astros) e desenvolver modelos geométricos complexos, de modo a explicar os detalhes conhecidos dos movimentos celestes. Com Hiparco e Ptolomeu esses modelos astronômicos atingem grande sofisticação e permitem explicar de modo bastante satisfatório os movimentos do Sol, da Lua e dos planetas, incluindo fenômenos como a precessão dos equinócios.

Comparados com o período que vai de Pitágoras a Ptolomeu, os séculos seguintes não apresentaram um avanço significativo dos modelos astronômicos. A antiga teoria geocêntrica, sob a forma que lhe foi dada por Ptolomeu, podia ter se mantido durante muitos outros séculos, com aperfeiçoamentos de detalhe e utilização de parâmetros atualizados. A proposta de Copérnico, no século XVI, não se deveu a falhas de previsões da teoria antiga, e sim a uma busca de um modelo do universo que satisfizesse certos requisitos de simplicidade e harmonia. O modelo heliocêntrico proposto por ele alterou profundamente a estrutura do universo, mas a justificativa básica desse trabalho seguia a mesma linha de pensamento encontrada na Antigüidade. Foi uma revolução que obedeceu a uma tradição astronômica milenar.

A descrição apresentada nesta dissertação toma como ponto de partida as astronomias mesopotâmica e egípcia, passando em seguida para o pensamento cosmológico e astronômico grego antigo. Pelo estudo dos pré-socráticos (como

Tales, Anaximandro, Anaxímenes, etc.) é possível acompanhar o avanço gradual da compreensão grega dos fenômenos celestes mais simples, e suas tentativas de incluir esse conhecimento dentro de uma estrutura filosófica mais ampla. A idéia de uma Terra em equilíbrio no centro de um universo esférico é um avanço imenso, comparado com as concepções anteriores.

Os filósofos pitagóricos dão um passo fundamental, introduzindo a idéia de que a natureza obedece a leis matemáticas. A partir de então, começam a surgir modelos geométricos para a compreensão dos movimentos celestes e surge a preocupação em analisar as distâncias dos planetas – relacionando-as com números simples e com idéias sobre a harmonia celeste.

Encontra-se nas obras de Platão uma forte influência do pensamento pitagórico, e seus diálogos trazem conceitos fundamentais, que vão guiar todo trabalho astronômico posterior – como o princípio de que os movimentos circulares uniformes são os mais perfeitos, e de que toda aparente irregularidade dos movimentos celestes deve ser compreensível.

Logo após Platão, e provavelmente sob sua influência, Eudoxo desenvolveu o mais antigo modelo astronômico geométrico quantitativo que procurava explicar as aparentes irregularidades dos movimentos dos planetas, dando conta de suas paradas e retrocessos através de uma engenhosa combinação de esferas que giravam uniformemente, encaixadas umas nas outras. Essa teoria permitia explicar muitos dos aspectos dos movimentos observados. Logo em seguida, essa proposta foi aperfeiçoada por Cálipo, que conseguiu melhorar a concordância entre a teoria e os fatos conhecidos (introduzindo maior número de esferas); e por Aristóteles, que discutiu a fundamentação física da teoria geocêntrica e adicionou novas esferas ao modelo de Eudoxo e Cálipo para superar alguns problemas conceituais da teoria.

Apesar de representar um enorme avanço técnico, o sistema de Eudoxo apresentava problemas que foram imediatamente apontados. Supondo que a Terra estava imóvel no centro das esferas que giravam, a distância dos astros até a Terra deveria ser constante. Essa teoria era portanto incompatível com qualquer alteração de distância entre os astros e a Terra, por mais que se complicasse o sistema de esferas. Havia, porém, fatos que pareciam indicar que essas distâncias não eram constantes: os diâmetros angulares do Sol e da Lua não

eram constantes, e os planetas possuíam brilho variável, que parecia indicar que algumas vezes estavam mais próximos e outras vezes mais distantes de nós. Essas dificuldades levaram ao desenvolvimento de outros modelos, todos eles utilizando movimentos circulares, mas diferindo uns dos outros em aspectos fundamentais.

Heráclides manteve a Terra no centro do universo, mas em seu sistema, o orbe das estrelas fixas está em repouso, e a Terra está girando em torno de seu eixo. Além disso, o Sol, que gira em torno da Terra, teria dois "satélites": Mercúrio e Vênus. Com Mercúrio e Vênus girando em torno do Sol, pode-se explicar o porquê desses planetas estarem sempre nas proximidades do Sol, suas paradas e retrogradações, e também as variações de brilho desses planetas ao se aproximarem ou afastarem da Terra. Nessa proposta, a Terra deixa de ser o centro de todos os movimentos celestes. Aristarco de Samos vai ainda mais longe, abandonando a idéia de que a Terra está parada, e propondo que ela (juntamente com os planetas) giraria em torno do Sol.

As posições relativas e distâncias dos diversos astros até a Terra era um ponto importante nos modelos astronômicos, mas não existiam métodos para medir essas distâncias. Aristarco sugeriu um processo para medir a razão entre as distâncias Terra-Sol e Terra-Lua, e a partir desse momento esses parâmetros deixaram de ser arbitrários.

A idéia de uma Terra fixa no centro do universo manteve-se como a mais aceita, apesar da sugestão de Aristarco. Apolônio e Hiparco desenvolveram novos modelos geocêntricos para explicar os movimentos dos planetas, introduzindo círculos excêntricos e epiciclos. Com esses recursos, conseguiram explicar as variações de velocidade do Sol, os complicados movimentos dos planetas e as variações de suas distâncias à Terra. Observações cuidadosas, comparadas a medidas antigas, permitiram a Hiparco determinar a existência da precessão dos equinócios.

Embora mantivessem a Terra parada, esses novos modelos abandonaram o princípio de que todos os corpos celestes descrevem movimentos circulares em torno do centro do universo, já que os epiciclos giram em torno de outros pontos (que se deslocam pelo céu) e o centro dos círculos excêntricos (como o do Sol)

não coincide com o centro da Terra. Esses modelos entravam em conflito, portanto, com a física aristotélica.

Ptolomeu, já no século II de nossa era, refinaria os trabalhos de Apolônio e de Hiparco, introduzindo, ainda, o chamado *ponto equante* e abandonando o princípio de uniformidade dos movimentos circulares celestes. O sistema de universo de Ptolomeu permitia calcular as futuras posições que ocupariam os planetas, em relação às estrelas fixas, com boa precisão. Sua teoria, extremamente detalhada, representou o ápice técnico da astronomia matemática antiga. Além do aspecto quantitativo, Ptolomeu introduziu uma concepção qualitativa de cascas esféricas (com espessura finita) encaixadas em outras cascas esféricas, para descrever a estrutura do universo. Utilizando o princípio de que não deveria existir espaço livre entre as várias esferas necessárias para explicar os movimentos planetários, seu modelo permitia calcular as distâncias relativas dos vários astros à Terra, eliminando uma arbitrariedade das teorias anteriores.

Durante o período medieval, o conhecimento astronômico decaiu na Europa, tornando-se quase totalmente qualitativo. Não havia a preocupação em fazer cálculos e previsões dos fenômenos celestes. Conservou-se na tradição medieval a discussão sobre a estrutura geral do universo e sobre os movimentos dos astros, e muitas propostas antigas (como as de Aristarco e Heráclides) foram discutidas durante esse período.

No mundo árabe o conhecimento astronômico antigo foi conservado e desenvolvido. A matemática se aperfeiçoou, e foram feitas observações cuidadosas dos fenômenos celestes, que levaram à correção de alguns parâmetros da teoria de Ptolomeu e à introdução de algumas modificações conceituais (como a teoria da trepidação). No entanto, a base da astronomia árabe era a teoria ptolomaica – embora alguns autores medievais tenham procurado retornar a modelos mais simples (por motivos filosóficos).

Houve durante o período medieval uma preocupação com o antigo problema da ordem das esferas celestes, e foram feitos estudos sobre variações de brilho dos planetas e tentativas de observação da passagem de Vênus diante do Sol, para decidir entre as diferentes alternativas.

Em torno de 1510, Copérnico escreveu um pequeno tratado, o *Commentariolus*, propondo um modelo astronômico em que o Sol estava parado, em posição central (e não a Terra). Em 1543 publicou sua grande obra, *Sobre as Revoluções dos Orbes Celestes*, onde esse modelo foi aperfeiçoado e apresentado de forma detalhada, seguindo o exemplo do *Almagesto* de Ptolomeu. A teoria de Copérnico apresenta uma explicação mais simples dos movimentos retrógrados dos planetas, levando em conta o movimento da Terra em torno do Sol. Essa teoria explica várias “coincidências” do modelo ptolomaico (como, por exemplo, as semelhanças entre os epiciclos de Marte, Júpiter e Saturno). Através desse novo modelo, partindo de parâmetros já medidos anteriormente, Copérnico estabeleceu os períodos dos movimentos dos planetas e suas distâncias relativas ao Sol. Nessa teoria, já não existe nenhuma arbitrariedade na ordem escolhida, eliminando-se assim o antigo problema de saber se Mercúrio e Vênus estavam abaixo ou acima do Sol.

A teoria de Copérnico tinha grandes problemas conceituais, e não era (como um todo) mais simples do que a de Ptolomeu. Os métodos astronômicos utilizados eram semelhantes, a base empírica era a mesma, e a precisão das previsões dos movimentos dos planetas não era melhor do que em uma teoria ptolomaica atualizada. Aos olhos do próprio Copérnico, sua teoria representava um avanço por satisfazer mais adequadamente os antigos princípios astronômicos, que procuravam explicar os movimentos celestes por movimentos circulares uniformes, rejeitando os equantes de Ptolomeu.

1 – A astronomia antiga, até Platão

1.1 INTRODUÇÃO

Os povos mais antigos que nos deixaram registros escritos de sua cultura tinham um forte interesse pelos fenômenos celestes. Conheciam o movimento cíclico do Sol e sua relação com fenômenos terrestres, daí surgindo os conceitos do ano e suas estações. Conheciam o movimento da Lua, suas fases e eclipses. Sabiam que as estrelas mantinham sempre as mesmas posições relativas, e conheciam grupos de estrelas, que identificavam com nomes especiais. Identificaram certas estrelas especiais, que se moviam em relação às outras – os planetas – e passaram a acompanhar seus movimentos.

O estudo dos céus estava associado a preocupações práticas (como as mudanças terrestres associadas ao ciclo anual), religiosas (porque os céus e os astros estavam associados a deuses) e astrológicas (previsão de fenômenos futuros pelo estudo dos astros). Em alguns povos surgiu a tentativa de medir e calcular os movimentos celestes, criando técnicas matemáticas que permitissem previsões; e explicações desses movimentos, baseados em um modelo da estrutura celeste. Este capítulo estudará alguns desses desenvolvimentos, até a época de Platão.

1.2 A ASTRONOMIA DA MESOPOTÂMIA

A escrita parece ter surgido 30 a 35 séculos antes da era cristã na Mesopotâmia. Nessa região, entre os rios Eufrates e Tigre, viveram diversas civilizações, como as dos Sumérios, Acádios, Assírios e Caldeus.

A tradição grega e helenística atribuiu grande importância à astronomia dos Caldeus¹. No entanto, de acordo com Neugebauer, há uma grande distância entre

¹ Os gregos identificavam pelo nome “Caldeu” todos os povos da Mesopotâmia, indiferentemente.

a descrição tradicional desse conhecimento e aquilo que se descobriu pelo estudo dos documentos primários mais antigos que foram conservados².

De acordo com Otto Neugebauer, a astronomia mesopotâmica mais antiga era grosseira e meramente qualitativa, semelhante à astronomia egípcia da mesma época³. O conhecimento sumério sobre os céus (cerca de 25 séculos a.C.) parece ter sido limitado a mitos, acompanhados de descrições de estrelas e de constelações⁴.

Para os caldeus, herdeiros culturais dos povos sumérios, o Universo era uma região fechada⁵. A Terra era plana, imóvel e flutuava no centro de um grande mar. Uma enorme muralha, muito distante, represava as águas desse mar onde flutuava a Terra. O céu, que fora construído por Marduk, era feito de um metal polido, de formato hemisférico e apoiava-se sobre a muralha que represava o mar. Durante o dia, o polimento do céu refletia a luz solar; à noite, o céu se escurecia para o aparecimento dos deuses, identificados com a Lua, os planetas e as estrelas⁶.

Um texto do período dos cassitas (aproximadamente 15 séculos a.C.) parece conter uma descrição do céu como constituído por uma seqüência de esferas, começando com a da Lua, e indica suas distâncias: “19 da Lua às Plêiades, 17 das Plêiades a Orion, 14 de Orion até Sírius [...]” e assim por diante⁷.

O estudo dos céus (assim como o estudo dos fígados de animais sacrificados) era utilizado para fazer previsões. O texto mais antigo conhecido que descreve o significado atribuído a sinais celestes é o *Enuma Anu Enlil*, escrito aproximadamente no século XI a.C.⁸

² Otto Neugebauer, *The Exact Sciences in Antiquity* (New York: Dover, 1969), 98.

³ Neugebauer, 97.

⁴ Neugebauer, 99.

⁵ Giorgio Abetti, *Historia de la Astronomia* (México: Fondo de Cultura Económica, 1992), 23.

⁶ Marco Arturo Moreno Corral, *La Morada Cósmica del Hombre: Ideas e Investigaciones Sobre el Lugar de la Tierra en el Universo* (México: Fondo de Cultura Económica, 1997), 24.

⁷ Neugebauer, 99.

⁸ Neugebauer, 101.

A partir do período Assírio (cerca de 10 séculos antes da era cristã), começa a aparecer uma descrição matemática dos fenômenos celestes⁹.

No fim do período Assírio, aproximadamente 700 anos antes da era cristã, foram escritos textos chamados *Mul Apin* descrevendo as constelações, os planetas, a Lua, as estações do ano, a variação das sombras do Sol, etc. Nessa mesma época aparecem observações astronômicas e meteorológicas sistemáticas. Já se sabia que os eclipses lunares ocorrem apenas na época da Lua cheia, e os solares na época da Lua nova¹⁰.

Quanto aos dados observacionais, parecem ter existido listas completas dos eclipses¹¹ observados desde o reino de Nabonassar (747 a.C.)¹², o que indica uma preocupação com a realização de registros sistemáticos dos fenômenos celestes; porém, há poucas observações conhecidas, dessa época, sobre os movimentos dos planetas.

Os caldeus dividiram a região onde se observam os movimentos do Sol, da Lua e dos planetas em 12 regiões e identificaram, cada uma delas, com um grupo de estrelas. Acreditavam ver nesses grupos de estrelas figuras relacionadas com o seu cotidiano. Em tábuas com escritura cuneiforme, localizadas no vale do rio Eufrates, que datam de 600 a. C., encontram-se alguns nomes de constelações que foram mantidos na nomenclatura atual: Carneiro, Touro, Escorpião, Leão, etc.¹³

Nessa época, a Mesopotâmia foi invadida pelos persas. Não se sabe se a astronomia documentada a partir desse período sofreu uma grande influência dos invasores.

No século V a.C. já existiam na Mesopotâmia sistemas numéricos mais sofisticados de descrição dos ciclos lunares e dos eclipses. Sabia-se que 19 ciclos solares (ano solar) correspondem a 235 ciclos lunares¹⁴. O ciclo de 19 anos

⁹ Neugebauer, 97.

¹⁰ Neugebauer, 101.

¹¹ Um dos mais antigos registros de um eclipse, em relação ao nosso calendário, data de 19 de março de 721 a.C. Abetti, 26

¹² Neugebauer, 97.

¹³ Abetti, 27.

¹⁴ Neugebauer, 102.

parece ter sido descoberto pelos babilônios entre 500 e 400 anos antes da era cristã. Atribui-se a Meton sua introdução em Atenas, no ano 431 a.C.¹⁵

Em algum momento que não foi determinado, passaram a ser realizadas observações do movimento dos planetas: seus movimentos para Leste, suas paradas e retrogradações em relação ao fundo estrelado; o nascimento helíaco de certas estrelas; a aparente trajetória do Sol em torno da Terra, que chamamos de Eclíptica; e o seu movimento anual dividido em quatro partes pelos solstícios e equinócios, representando as estações. Anotavam-se as datas de aparição de cometas, astros portadores de acontecimentos excepcionais, bem como as das chuvas de estrelas cadentes¹⁶.

Em 331 a.C. a região foi conquistada pelo exército de Alexandre, o Grande e, a partir de então, as culturas da Babilônia e da Grécia estavam em contato direto¹⁷. É difícil determinar, no entanto, o que foi transmitido de uma civilização para a outra, nesse período.

Há documentos da Mesopotâmia mostrando que em torno do ano 300 a.C. já existiam esquemas bem desenvolvidos de astronomia matemática. A partir dessa época, surgem tabelas detalhadas de efemérides, com a posição da Lua e dos planetas calculados em intervalos de tempo regulares¹⁸. Não foram conservados, no entanto, textos que descrevam detalhadamente como essas tabelas eram construídas. Aparentemente, não eram utilizados modelos geométricos, e sim métodos numéricos de interpolação, baseados nos ciclos conhecidos¹⁹.

No caso dos planetas, em vez de tentar desenvolver uma teoria que proporcionasse a posição do astro em qualquer instante desejado, a astronomia babilônica desenvolveu métodos numéricos para determinar quando ocorriam alguns pontos especiais do movimento: oposição, conjunção, pontos estacionários (onde o movimento mudava de sentido), instantes em que o planeta

¹⁵ Otto Neugebauer, *A History of Ancient Mathematical Astronomy* (Berlin: Springer-Verlag, 1975), vol. I, 355.

¹⁶ Abetti, 26

¹⁷ Michael Hoskin, "Astronomy in Antiquity," in: Michael Hoskin (ed), *Astronomy* (Cambridge: Cambridge University Press, 1997), 23

¹⁸ Neugebauer, *The Exact Sciences in Antiquity*, 105.

¹⁹ Neugebauer, 110-113.

se tornava invisível (pela proximidade com o Sol) ou visível (ao se afastar do Sol)²⁰. Esse tipo de estudo empregava uma metodologia muito diferente da astronomia grega, como será visto.

Os babilônios contaram o número de ciclos de retrogradação (anomalias) de cada planeta, e o número de rotações siderais (retorno ao mesmo ponto do zodíaco) que eles completavam em um certo número de anos. Os dados numéricos que aparecem nos textos babilônicos são²¹:

Planeta	Anomalias	Rotações	Anos
Saturno	256	9	265
Júpiter	391	36	427
Marte	133	151	284
Vênus	720	1151	1151
Mercúrio	1513	480	480

Valores como esses foram utilizados por Hiparco e Ptolomeu, posteriormente.

Há documentos mesopotâmicos astronômicos antigos chamados "astrolábios" (por causa de sua semelhança com os astrolábios posteriores). Trata-se de placas de argila contendo três círculos concêntricos, e cada círculo dividido em 12 seções por doze raios. Em cada um dos 36 setores assim obtidos, estavam inscritos o nome de uma constelação e alguns números cujo significado não é conhecido²².

Na Mesopotâmia foi desenvolvido um calendário lunar, com um ciclo de 12 meses. Como o mês lunar (intervalo de tempo entre duas luas cheias, chamado de mês sinódico) tem, aproximadamente, 29,5 dias ($12 \times 29,5 = 354$ dias), no decorrer do tempo haveria uma defasagem entre o calendário e as estações. Assim, um 13^o mês era, às vezes, adicionado para que o ano mantivesse a sua coincidência com o transcurso das estações. Este 13^o mês, introduzido primeiramente de maneira aproximada, foi em seguida calculado com precisão:

²⁰ Neugebauer, 126-127.

²¹ Neugebauer, *A History of Ancient Mathematical Astronomy*, vol. I, 390-391.

²² Abetti, 26

notou-se que certas estrelas, de preferência as mais brilhantes, pertencentes a certas constelações conhecidas, apareciam antes da aurora em épocas que deveriam ser previstas pelo calendário. Quando isso não acontecia um 13^o era intercalado; caso contrário, o ano era de 12 luas. No entanto era difícil encontrar estrelas suficientemente brilhantes que fossem visíveis pouco antes do nascer do Sol, o que acarretava irregularidades na contagem dos anos de 13 meses.

Os babilônios também usavam uma espécie de semana: os dias 7, 14, 21 e 28 do mês lunar eram considerados "nefastos". Nesses dias, certas classes de pessoas estavam proibidas de realizar determinadas atividades, ou ainda, deviam cumprir determinados rituais. O instante do ocaso do Sol marcava, para os babilônios, o início do dia, que estava dividido em doze intervalos angulares iguais, chamados de *kaspu*. Em suas observações celestes, usavam o *kaspu* solar, isto é a distância angular de 30^o que o Sol percorre, em seu movimento diurno aparente, em duas horas²³.

Pode-se dizer que a astronomia desenvolvida na Mesopotâmica se baseava em observações e medidas bastante cuidadosas, e desenvolveu métodos de predição bem sucedidos, com base no estudo de ciclos dos astros. No entanto, parece não ter havido o desenvolvimento concomitante de uma visão astronômica do universo, que discutisse as causas dos movimentos dos astros e que fornecesse modelos geométricos sobre a estrutura celeste.

1.3 A ASTRONOMIA EGÍPCIA

Os gregos tinham grande respeito pelo conhecimento dos egípcios, e em particular pela sua astronomia. Heródoto, no século V a.C., comentou:

Foram também os egípcios que tiveram a idéia de consagrar cada mês e cada dia do mês a um deus, assim como foram os primeiros a predizer o futuro das pessoas pela observação da data do seu nascimento. Os poetas gregos fizeram uso dessa ciência, mas os

²³ Abetti, 25-26

egípcios têm a primazia neste, como em muitos outros ramos do conhecimento humano.²⁴

Contrariando essa visão tradicional, Otto Neugebauer comentou que os documentos egípcios existentes não mostram a existência de uma astronomia avançada. Ele considera que a astronomia egípcia teve pequena influência e nunca alcançou um desenvolvimento superior ao dos outros povos²⁵.

Em resumo, dos quase três mil anos de escritos egípcios, os únicos textos que chegaram até nós com predições numéricas de fenômenos astronômicos pertencem ao período Helenístico ou Romano. Nenhum dos documentos astronômicos mais antigos contém elementos matemáticos; são esquemas observacionais brutos, com objetivos parcialmente religiosos, parcialmente práticos. A ciência antiga foi o produto de alguns poucos homens; e aconteceu que estes poucos não foram egípcios²⁶.

O único aspecto em que, segundo Neugebauer, a astronomia dos egípcios alcançou um bom desenvolvimento, foi no estudo do calendário. O calendário egípcio era bastante simples, comparado com o babilônico ou com o grego. Ele não se baseava no estudo dos meses lunares. Tinha 12 meses de 30 dias e 5 dias adicionais²⁷.

Associa-se a criação desse calendário com o estudo de um fenômeno não-astronômico: as cheias anuais do rio Nilo. O rio, uma vez ao ano, transbordava de seu leito e cobria grande parte de seu vale. Quando voltava ao seu leito, deixava o seu vale enriquecido de matéria fértil para o plantio do trigo. Seguia-se, então, um período de amadurecimento e colheita do trigo. Em meados do terceiro milênio a.C., tem-se registros de que os egípcios se habituaram a dividir o ano em três estações: o da inundação, o abaixamento das águas e o plantio e colheita do

²⁴ Herodoto, *Clio. História* (Rio de Janeiro: W. M. Jackson, 1950), vol. 1, liv. II, LXXXII, 148.

²⁵ Neugebauer, *The Exact Sciences in Antiquity*, 80.

²⁶ Neugebauer, 91.

²⁷ Neugebauer, 81.

trigo. Cada um desses períodos correspondia aproximadamente a quatro meses lunares. Porém, como o mês lunar tem, aproximadamente, 29,5 dias²⁸, após um certo tempo, o ano de 12 meses lunares ia se defasando em relação às enchentes do rio. Então, de vez em quando, uma dessas três estações teria que receber um quinto mês lunar²⁹. Como as cheias do Nilo não acompanhavam a Lua, os egípcios parecem ter sido levados a procurar um outro modo de prever esse importante fenômeno.

Segundo Abetti³⁰, os egípcios já teriam estabelecido um calendário de 365 dias, cerca de 30 séculos a.C., que permitia relacionar, com precisão, as datas das inundações do Nilo. Mesmo assim, verificaram depois que esse ano de 365 dias sofria um atraso de um dia a cada quatro anos e de quase um mês a cada 120 anos. Esse calendário foi chamado de "vago". Portanto, era necessária a elaboração de um calendário "fixo" para se calcular em cada ano "vago" as datas que deveriam ocorrer as cheias do rio Nilo. Esse fenômeno apresentado pelo rio, coincidia com o aparecimento de Sírio, a estrela mais brilhante do céu austral³¹, pouco antes do nascer do Sol. À relação do aparecimento de Sírio com as subidas das águas, e posteriormente com o plantio das sementes da sobrevivência dos egípcios, talvez tenha identificado a estrela com Ísis. Se a cada período de 4 anos egípcios se deve somar um dia aos 365 dias, então o ano egípcio deveria ter $365 \text{ dias} + 1/4 \text{ dia} = 365,25 \text{ dias}$. Assim, se o ano de 365 dias não fosse corrigido, continuando a defasagem entre o aparecimento da estrela Sírio, sempre um pouco antes do nascer do Sol, e a primeira cheia do Nilo, seriam necessários 1.461³² "anos vagos" para que essa coincidência voltasse a acontecer novamente. O dia da coincidência entre a primeira cheia do Nilo e a

²⁸ O tempo de 29,5 dias representa, aproximadamente, o intervalo de tempo entre duas luas cheias e recebe o nome de mês sinódico.

²⁹ Hoskin, 24.

³⁰ Abetti, 34-35

³¹ A estrela Sírio, embora pertença ao céu austral, é visível do Egito.

³² Esse intervalo de tempo pode ser obtido através da mesma equação que será usada, no Capítulo 7, para se determinar o período sideral de um planeta externo à órbita terrestre, a saber: $\Delta t = T_1 \cdot T_2 / (T_2 - T_1) = 365 \cdot 365,25 / (365,25 - 365) = 1.461 \text{ anos}$.

presença da estrela Sírio pouco antes da saída do Sol, os egípcios comemoravam como sendo o dia do Grande Ano ou ano Sotíaco³³.

Além disso, os egípcios foram os responsáveis pela divisão do dia em 24 horas. Em meados do segundo milênio antes da era cristã eles já utilizavam relógios solares e relógios de água³⁴. Inicialmente, eles dividiam separadamente o dia e a noite em 12 partes cada uma, havendo portanto 12 horas correspondentes à parte escura do dia, e outras 12 horas à parte clara do dia. No entanto, como a duração do dia e da noite varia ao longo do ano, geralmente as horas noturnas eram diferentes das diurnas³⁵. Depois, os astrônomos passaram a utilizar horas de duração constante, e as dividiram em 60 partes, seguindo o sistema de numeração sexagesimal babilônico³⁶.

Ao contrário dos povos da Mesopotâmia, os egípcios parecem não ter tido interesse por eclipses, e seu estudo do movimento dos planetas não atingiu a sofisticação e o nível de previsão matemática dos caldeus³⁷. Só aparecem estudos mais detalhados sobre os planetas a partir da dinastia dos Ptolomeus, quando existe forte influência grega no Egito.

Como no caso da Mesopotâmia, não foram encontrados documentos egípcios que evidenciem o desenvolvimento de um modelo astronômico capaz de explicar os movimentos observados dos planetas.

Há autores que afirmam ter surgido no Egito a idéia de que Mercúrio e Vênus giravam em torno do Sol, e não em torno da Terra³⁸. Observa-se que Mercúrio e Vênus se deslocam pelo céu, sempre próximos ao Sol. Esses planetas somente são vistos pouco antes do amanhecer ou logo após o pôr do Sol. Se os egípcios de fato fizeram essa suposição de que os dois planetas se moviam em torno do Sol, poderiam ter se baseado nesse fato. No entanto, não existem evidências

³³ Abetti, 34-35. Sotíaco deriva de Sotis, nome egípcio da estrela Sírio.

³⁴ Olaf Pedersen, *Early Physics and Astronomy: a Historical Introduction* (Cambridge: Cambridge University, 1993), 2.

³⁵ Neugebauer, 81.

³⁶ Neugebauer, 81.

³⁷ Pedersen, 4; Neugebauer, 95.

³⁸ Abetti, 35.

documentais de que realmente os egípcios tenham desenvolvido algum modelo sobre os movimentos dos planetas.

Na verdade, a atribuição dessa teoria aos egípcios se baseia exclusivamente em um autor medieval. Macrobius (século V d.C.), no seu *Comentário ao Sonho de Cipião*, apontou a existência de autores como Platão que, “seguindo os egípcios”, colocavam a esfera do Sol logo após a da Lua, enquanto Cícero, “em concordância com o sistema dos caldeus”, colocava Mercúrio e Vênus entre a Lua e o Sol³⁹. Ele explica então que somente existem dúvidas sobre a posição de Mercúrio e Vênus, e não dos outros planetas, pois para todos os outros é possível estabelecer uma ordem baseada nos tempos que demoram para percorrer o Zodíaco (os que demoram mais tempo estariam mais distantes). No entanto, o mesmo critério não pode ser aplicado ao Sol, a Mercúrio e a Vênus, pois todos completam seus circuitos em aproximadamente um ano⁴⁰. Então, Macrobius fornece uma explicação para os movimentos de Vênus e Mercúrio, e tenta esclarecer o conflito:

A proximidade dos três planetas vizinhos – Vênus, Mercúrio e o Sol – foi responsável pela confusão da ordem que lhes é assinalada pelos astrônomos, com exceção dos hábeis egípcios, que entenderam a razão, esboçada aqui.

A esfera em que o Sol viaja é circundada pela esfera de Mercúrio, que está acima dele, e pela esfera mais elevada de Vênus, também. Daí resulta que quando esses dois planetas se movem nas partes superiores de suas esferas, nota-se que eles estão acima do Sol, mas quando passam para as partes inferiores de suas esferas, pensa-se que eles estão abaixo do Sol. Os que lhe atribuíram uma posição abaixo do Sol fizeram suas observações em um momento em que os movimentos dos planetas pareciam abaixo do Sol, o que acontece algumas vezes, como indicamos; realmente, esta posição é mais

³⁹ Macrobius, *Commentary on the Dream of Scipio* (New York: Columbia University Press, 1952), 162.

⁴⁰ Macrobius, 163.

notável, pois temos uma visão mais brilhante nesse momento. Quando Mercúrio e Vênus estão em suas posições superiores, eles são menos visíveis, por causa dos raios do Sol. Daí resultou que a falsa opinião se tornou mais forte, e esta ordem recebeu aceitação quase universal⁴¹.

Segundo Neugebauer, foi apenas com base nessa obra de Macrobius que os autores posteriores atribuíram aos egípcios a idéia de que Mercúrio e Vênus giravam em torno do Sol⁴².

1.4 O PENSAMENTO GREGO ANTES DOS FILÓSOFOS PRÉ-SOCRÁTICOS

Os mais antigos testemunhos da cultura grega que chegaram até nós são provenientes dos poetas Homero (século IX ou VIII a.C.) e Hesíodo (séc. VIII a.C.). A partir dos poemas homéricos é possível perceber a concepção de mundo da época. A Terra era representada como um disco achatado, cercado pelo rio Okeanos, que nascia ao norte das colunas de Hércules e girava no sentido horário em torno da Terra. O céu (Ouranos) era uma cúpula sólida cobrindo a Terra e Okeanos⁴³. Os astros se movem abaixo do céu, na região do éter, acima da atmosfera. Abaixo da Terra há o Tártaro, que é também circundado por uma casca sólida, metálica. A Aurora nasce de Okeanos, e o Sol nasce do “lago do Sol”, a leste. A região abaixo da Terra (o Tártaro) nunca é iluminada pelo Sol, e portanto não parecia existir a idéia de que o Sol se move sob a Terra, durante a noite. Um mito antigo (mas posterior a Homero) descrevia que o Sol, depois de sumir no horizonte, navegava em uma tigela dourada, ao longo de Okeanos, retornando ao oriente⁴⁴.

⁴¹ Macrobius, 163-164.

⁴² Neugebauer, *A History of Ancient Mathematical Astronomy*, vol. 2, 695.

⁴³ J. L. E. Dreyer, *A History of Astronomy from Thales to Kepler*, 2. ed. (New York: Dover, 1953), 6; G. S. Kirk, J. E. Raven, M. Schofield, *The Presocratic Philosophers. A Critical History with a Selection of Texts*, 2. ed. (Cambridge: Cambridge University Press, 1983), capítulo 1.

⁴⁴ Kirk et al., 12-13.

No livro XVIII da *Ilíada*, Homero fala sobre o novo escudo que Vulcano fabricara a Aquiles e sobre algumas constelações:

[]. Sólido forma o escudo, orlado e vário
De orla alvíssima e tripla, donde argênteo
Boldrié pende, e lâminas tem cinco.
Com dedáleo primor, divino engenho,
Insculpiu nele os céus e o mar e a terra;
Nele as constelações, do pólo engastes,
Orion valente, as Híades, as Pleias,
A Ursa que o vulgo domina Plaustro,
A só que não se lava no Oceano.⁴⁵

A menção à Ursa é interessante: indica que ela sempre está sobre o horizonte (para os gregos), na mesma posição, e portanto nunca desce até o rio Oceano, como as outras estrelas fazem. A Ursa era utilizada para orientar a navegação, na época de Homero⁴⁶. Ele menciona também outras estrelas, como Arcturus e Sirius, e fala sobre a estrela matutina e a estrela vespertina, aparentemente sem saber que ambas são a mesma coisa (Vênus).

Hesíodo descreveu um universo semelhante ao de Homero. Além disso, forneceu indicações entre relações entre fenômenos celestes e terrestres – por exemplo, os agricultores deveriam semear os grãos quando as Plêiades desaparecem do céu e colher quando elas reaparecem⁴⁷.

Podem ser notadas fortes influências de Homero e Hesíodo nos mais antigos filósofos gregos que conhecemos, pois eles desenvolveram suas concepções sobre o universo a partir desse fundo cultural mais antigo.

⁴⁵ Homero, *Ilíada* (Rio de Janeiro: W. M. Jackson, 1950), liv. XVIII, 332.

⁴⁶ Pedersen, 11.

⁴⁷ Pedersen, 11.

1.5 TALES

Tales de Mileto (c. 624 – c. 546 a.C.) parece ter afirmado que a Terra flutuava sobre a água⁴⁸. Essa descrição parece indicar que Tales ainda pensava na Terra como um disco achatado. Sua concepção pode ter se originado em idéias egípcias⁴⁹. De acordo com Sêneca, Tales explicava os terremotos como sendo devidos a oscilações da Terra, produzidas pelo movimento das águas⁵⁰.

Não são conhecidas as idéias de Tales sobre os astros, mas atribui-se a ele a previsão de um eclipse solar. A fonte original dessa anedota é a *História* de Heródoto, escrita um século e meio após a morte de Tales.

Segundo Heródoto,⁵¹

Durante cinco anos, os Medos e os Lídios obtiveram, alternadamente, vantagens, e no sexto ano de luta aconteceu algo extraordinário, que motivou o término das hostilidades. Durante um combate em que os triunfos se eqüivaliam de parte a parte, o dia transformou-se em noite. Tales de Mileto havia predito aos Iônios [Jônios] esse fenômeno, fixando a data em que se verificaria⁵². Os Lídios e os Medos, vendo a noite tomar inopinadamente o lugar do dia, cessaram de combater e procuraram, o mais depressa possível, fazer as pazes [...].

De acordo com cálculos astronômicos atuais, ocorreu um eclipse do Sol a 28 de maio de 584 a.C. que poderia ter sido visível por ocasião dessa batalha⁵³.

⁴⁸ A única fonte antiga dessa informação é Aristóteles (*De Caelo*, livro II, cap. 13, 294^a28). Ver Kirk *et al.*, 88-93.

⁴⁹ Kirk *et al.* 92-93.

⁵⁰ Ibid.

⁵¹ Heródoto, vol. 1, liv. I, LXXIV, 38.

⁵² Essa tradução do texto de Heródoto não parece muito correta, pois Kirk *et al.* traduzem: “[...] Tales de Mileto havia predito aos Iônios, colocando como seu limite o ano em que o fenômeno realmente ocorreu”. Kirk *et al.*, 82.

⁵³ Evidentemente não existia esse tipo de calendário na época. Trata-se de um modo moderno de indicar uma data antiga.

A suposta predição do eclipse foi também relatada por autores posteriores, como Diógenes Laércio e por Dercilides⁵⁴. Laércio chega a afirmar que tanto Heráclito quanto Demócrito foram testemunhas dessa previsão. Cícero e Plínio, o Velho, também relatam a mesma anedota⁵⁵.

Na época de Tales, Mileto era aliada da Lídia, e esta mantinha relações culturais com a Mesopotâmia, cujos astrônomos haviam descoberto que os eclipses da Lua se repetem após um período de cerca de 19 anos. Alguns autores supõem que Tales poderia ter aprendido dos astrônomos da Mesopotâmia a técnica de previsão dos eclipses pelo estudo do “ciclo de Saros” e, com um pouco de sorte, teria previsto o eclipse do Sol de 585 a.C.⁵⁶; alguns autores sugeriram que ele teria se baseado em conhecimentos egípcios⁵⁷.

Há no entanto fortes dúvidas de que Tales pudesse ter feito essa previsão; e há um erro histórico em chamar o ciclo de 19 anos de “ciclo de Saros”.

Em primeiro lugar, é necessário assinalar que os astrônomos da Mesopotâmia somente sabiam prever eclipses lunares. A explicação desse fato é que os eclipses lunares são visíveis de uma grande extensão da superfície terrestre, enquanto que os do Sol somente são visíveis em uma faixa muito estreita da superfície terrestre. Não se sabia prever, na época, qual seria essa faixa, e portanto não se podia prever se haveria algum eclipse visível ou não. Portanto, os astrônomos sabiam que em determinada data poderia ocorrer um eclipse do Sol (isto é, que a Lua poderia estar entre o Sol e algum ponto da Terra). Mas era somente isso que sabiam. Não há motivo para acreditar que Tales tivesse conseguido ultrapassar esse conhecimento.

É importante também esclarecer o equívoco bastante comum sobre o “ciclo de Saros”. De acordo com Neugebauer⁵⁸, o termo “saros” vem do signo Sumério “sar”, que significa *universo*, e que correspondia ao número 3.600 (ou seja, 60 x 60). O autor babilônico Berossos, que se mudou para a Ilha de Cos aproximadamente em 270 a.C., se referiu a 3.600 anos como o período de

⁵⁴ Kirk *et al.* 81-82.

⁵⁵ Thomas Heath, *Aristarchus of Samos, the Ancient Copernicus* (New York: Dover, 1981), 15.

⁵⁶ A. B. Gerd, *Os Filósofos Pré-Socráticos* (São Paulo: Cultrix, 1997), 22.

⁵⁷ Kirk *et al.*, 82.

⁵⁸ Neugebauer, 141-142.

“saros”, e afirmações semelhantes aparecem em outros autores antigos. No entanto Suidas, um autor medieval no século XI, afirmou que os Caldeus utilizavam uma medida de tempo chamada “saros” que correspondia a 222 meses, ou 18 anos e 6 meses. Por outro lado, Plínio, o Velho, descreveu que os eclipses se repetem em intervalos fixos, de cerca de 18 ou 19 anos. No século XVII, Edmund Halley associou as duas informações e supôs que Suidas estava se referindo ao ciclo de eclipses, e que o seu texto deveria se referir a 223 meses, e não 222. Assim, a partir do final do século XVII, teria surgido uma interpretação errônea da palavra “saros” como o ciclo de 223 meses (ou 19 anos) em que os eclipses se repetem⁵⁹. Neugebauer comenta ainda:

O mito do saros é geralmente utilizado como uma “explicação” da suposta predição por Thales do eclipse solar do dia 28 de maio de 584 a.C. Não existe ciclo para os eclipses solares visíveis em um certo local. Todos os ciclos modernos se referem à Terra como um todo. Em 600 a.C. não existia nenhuma teoria Babilônica para prever eclipses solares, como se pode ver pela situação bastante insatisfatória 400 anos depois; e os Babilônios nunca desenvolveram uma teoria que levasse em conta a influência da latitude geográfica. Pode-se dizer com segurança que a estória sobre a previsão de um eclipse solar por Tales não é mais confiável do que a outra estória de que Anaxágoras teria predito a queda de meteoros⁶⁰.

Assim, não existiam processos de cálculo de eclipses solares que permitissem prever se ocorreria algum eclipse *visível* em certa região da Terra. Além disso, de acordo com o relato de Heródoto, ele teria previsto apenas o ano em que o eclipse deveria ocorrer, e não o dia. Se de fato existiu a previsão, ele pode ter sido apenas um palpite que, por sorte, deu certo⁶¹.

⁵⁹ Neugebauer, 141-142.

⁶⁰ Neugebauer, 142.

⁶¹ Kirk *et al.*, 82.

Alguns autores antigos contam também que Tales teria medido os tempos dos solstícios, explicado os eclipses e estudado as estrelas da Ursa Menor⁶². Além disso, Aristóteles relata também que ele teria estudado os corpos celestes e previsto que haveria uma grande colheita de azeitonas. Então, ele teria conseguido antecipadamente um empréstimo e alugado todas as prensas em Mileto e Chios. Quando houve a colheita, os agricultores necessitaram dessas prensas, e Tales as alugou por preços elevados, conseguindo um grande lucro⁶³. Se de fato Tales tentou fazer esse tipo de previsão, ele praticava não apenas astronomia, mas também astrologia.

Pouco se sabe de Tales para que se possa reconstruir satisfatoriamente seus pensamentos, mas de seus sucessores se sabe um pouco mais.

1.6 ANAXIMANDRO

Anaximandro (c. 610 – 545 a.C.), contemporâneo mais jovem de Tales, apresentou uma teoria sobre o universo que é conhecida com um bom número de detalhes, através de autores posteriores. Ele parece ter afirmado que a Terra tem forma cilíndrica (como um tambor ou uma coluna) e a sua profundidade é um terço de sua largura. Os homens vivem sobre uma das superfícies planas desse cilindro⁶⁴.

Todos os pensadores gregos anteriores parecem ter imaginado que o céu era hemisférico, cobrindo a Terra. Anaximandro abandonou essa idéia. Para ele, o universo é ilimitado ou infinito. Vemos apenas a metade do céu, mas ele está em torno da Terra, por todos os lados. A Terra está no centro do universo, e não se move para nenhum lado porque, estando equidistante de todas as coisas celestes, não tem nenhum motivo para se mover em nenhuma direção⁶⁵. Assim, ele abandonou também a concepção de que alguma coisa sustentava a Terra.

⁶² Kirk *et al.*, 82-83.

⁶³ Kirk *et al.*, 80-81.

⁶⁴ Kirk *et al.*, 133-134.

⁶⁵ Heath, 24-25; Kirk *et al.*, 133-134.

Os corpos celestes estariam associados a esferas e anéis que giram em torno da Terra⁶⁶. No caso do Sol, por exemplo, existiria um gigantesco anel invisível em torno da Terra, com fogo no seu interior. Esse anel teria uma abertura voltada para a Terra, e essa abertura seria vista por nós como o Sol. O centro desse anel seria fixo, mas à medida que esse anel girasse em torno da Terra, veríamos o Sol se mover, e durante a noite ele passa sob a Terra. A Lua seria explicada por um anel semelhante – e, portanto, a Lua teria luz própria. As fases da Lua eram explicadas supondo que a abertura do respectivo anel varia de tamanho, e os eclipses também seriam produzidos pelo bloqueio dessas aberturas, e não pela interposição da Lua ou do Sol na frente do outro. Os anéis teriam uma posição inclinada, segundo o filósofo.



Fig. 1.1 – Reconstrução do modelo cosmológico de Anaximandro. A Terra, cilíndrica, é cercada pela atmosfera, e por anéis invisíveis, cheios de fogo. Esse fogo só é visível por causa de aberturas, por onde a luz escapa.

Para nós, a idéia desses anéis, cuja maior parte é invisível, pode parecer desprovida de sentido. No entanto, pode ser que Anaximandro tivesse imaginado os astros dessa forma para resolver um problema importante: por que o Sol e a Lua não caem? No caso do modelo dos anéis, eles não caem pelo mesmo motivo

⁶⁶ Heath, 26-28; Kirk *et al.*, 134-137.

pelo qual a Terra não se move do centro: por simetria. Todas as partes do anel são “puxadas” igualmente para o centro, e por isso ele fica imóvel. Deve ficar claro que isso é apenas uma sugestão. Nenhum testemunho antigo permite afirmar que Anaximandro realmente fez esse tipo de raciocínio.

Anaximandro chegou a indicar os tamanhos desses anéis. O anel do Sol teria um tamanho 27 ou 28 vezes maior do que a Terra, e o da Lua seria 18 ou 19 vezes o tamanho da Terra. Abaixo da Lua estariam as estrelas (ou planetas?), mas a distância não é indicada⁶⁷. Kirk, Raven e Schofield sugerem que Anaximandro poderia ter pensado em distâncias regulares (9, 18 e 27 vezes o tamanho da Terra).

Os relatos antigos não indicam como Anaximandro poderia ter chegado a esses números. Além disso, comentadores recentes observaram que os números atribuídos a ele entram em conflito com um dado observacional simples. Se o Sol fosse do mesmo tamanho da Terra e se o tamanho de seu anel fosse 27 vezes maior do que a Terra, o tamanho angular do Sol, visto da Terra, seria de aproximadamente 4° . No entanto, o tamanho angular do Sol é 8 vezes menor, ou seja, meio grau⁶⁸. Isso parece indicar que os números utilizados por Anaximandro não podem ter se baseado em nenhum dado observacional. Pode ser que os números 9, 18 e 27 fossem simplesmente baseados na consideração de que 3 e 9 eram números sagrados⁶⁹.

Não se sabe ao certo como Anaximandro imaginava os planetas e as estrelas. Pode ser que ele aplicasse o mesmo modelo de anéis a todos os corpos celestes. Pode ser que ele imaginasse esse modelo apenas para os planetas, e não para as estrelas – afinal, as estrelas parecem presas umas às outras, e formam algo mais parecido com uma esfera do que um conjunto de anéis.

Anaximandro parece ter se dedicado também a observações astronômicas – em particular, do movimento do Sol. Segundo Diógenes Laércio, ele teria sido o primeiro a descobrir o *gnomon* para medir o movimento do Sol; estabeleceu um relógio solar em Esparta para determinar os solstícios e equinócios; e construiu

⁶⁷ Heath, 27-28; Kirk *et al.*, 134-137.

⁶⁸ Heath, 32.

⁶⁹ Heath, 38.

um globo celeste⁷⁰. Sabe-se, no entanto, que o *gnomon* era utilizado há muito tempo na Mesopotâmia⁷¹. Mais uma vez citamos o complemento da citação anterior de Heródoto:

[...] Quanto ao *gnômon* ou relógio solar e a divisão do dia em doze partes, os gregos devem-nos aos Babilônios.⁷²

Pode ser que Anaximandro tenha *introduzido* o *gnômon* na Grécia, ou tenha utilizado o instrumento de um modo especial⁷³. Plínio, o Velho, afirmou que Anaximandro descobriu a obliquidade da eclíptica⁷⁴. Isto sugere que o filósofo fez uso de um *gnômon* para determinar o valor da obliquidade, o que poderia justificar a interpretação acima. Note-se, além disso, que Anaximandro descreveu o anel associado ao Sol como tendo uma posição oblíqua. Talvez ele tenha procurado explicar as estações do ano utilizando esse anel inclinado, como a eclíptica.

É difícil compreender o salto conceitual realizado por Anaximandro, que o separa tanto de seus antecessores. Poderiam ter existido influências de outras culturas? Segundo Pedersen, a idéia de rodas girando em torno da Terra era conhecida na cosmologia persa⁷⁵.

Independentemente da origem e justificativa das idéias de Anaximandro, aquilo que conhecemos sobre sua cosmologia mostra que havia começado a existir uma tentativa de formular um modelo da estrutura e dos movimentos celestes, e que havia uma preocupação com as distâncias e os tamanhos dos astros.

1.7 ANAXÍMENES

Anaxímenes (c. 585 – c. 525 a.C.), também de Mileto e posterior a Anaximandro, não seguiu suas idéias. Para ele, o universo é formado a partir do

⁷⁰ Kirk *et al.*, 100.

⁷¹ Dreyer, 13.

⁷² Heródoto, vol. 1, liv. II, CIX, 160-161.

⁷³ Kirk *et al.*, 103.

⁷⁴ Pedersen, 14.

⁷⁵ Pedersen, 15.

ar, e está cheio de ar. A Terra é achatada e fina, como uma grande tábua, e não cai porque é sustentada pelo ar (como uma folha de uma árvore, que cai muito lentamente)⁷⁶. Aristóteles atribuiu a mesma interpretação a Anaxágoras e Demócrito:

Anaxímenes, Anaxágoras e Demócrito dizem que o achatamento [da Terra] é responsável por ela ficar em repouso: pois ela não corta o ar abaixo dela, mas cobre-o como uma tampa, como os corpos achatados de fato fazem.⁷⁷

O Sol, a Lua e os outros astros são feitos de fogo, e também seriam achatados – não caem porque são sustentados pelo ar⁷⁸. Note-se que, em vez de utilizar um argumento de simetria, como seu predecessor, Anaxímenes utiliza uma explicação mais simples, baseada no conhecimento cotidiano.

As estrelas estariam implantadas como pregos em uma casca semelhante ao gelo, e estariam mais distantes do que o Sol e a Lua. Essa casca, aparentemente, era pensada como um hemisfério, e não como uma esfera transparente pois, segundo Anaxímenes, os corpos celestes não se movem sob a Terra, mas em torno dela, como um chapéu gira em torno da cabeça. A noite não seria produzida, portanto, quando o Sol passa embaixo a Terra, e sim quando ele fica oculto por partes mais elevadas da Terra, na direção norte⁷⁹.

Pode ser que Anaxímenes tenha feito uma distinção entre os movimentos dos planetas e os das estrelas e que tenha se referido aos seus retrocessos. De fato, de acordo com os testemunhos existentes, ele teria se referido às estrelas como pregos *fixos* na cúpula transparente, mas teria também se referido aos planetas como se fossem semelhantes a folhas de fogo e afirmado que as estrelas [planetas?] executam suas voltas [retrocessos?] em consequência de serem desviadas de seu caminho pelo ar condensado, que resiste ao seu movimento⁸⁰.

⁷⁶ Dreyer, 16-17; Heath, 40-41.

⁷⁷ Aristóteles, *De Caelo* livro II, cap. 13, 294^b13. Kirk *et al.*, 153.

⁷⁸ Dreyer, 16-17; Heath, 40-41.

⁷⁹ Kirk *et al.*, 154-157; Dreyer, 16; Heath, 40-42.

⁸⁰ Heath, 42; Kirk *et al.*, 154-155.

Além dos corpos celestes visíveis, Anaxímenes teria afirmado a existência de outros corpos de natureza terrestre, invisíveis, que se movem no céu⁸¹. Comentadores recentes sugeriram várias interpretações: talvez ele pensasse que as estrelas possuíam um núcleo sólido; ou então, pensou na existência de corpos invisíveis que se moviam entre os astros para explicar eclipses e fases da Lua – o que é uma explicação mais razoável⁸². Outra interpretação poderia ser a de que Anaxímenes queria explicar os meteoritos, mas só existe documentação *posterior a Anaxímenes* de que os gregos tomaram conhecimento da queda de meteoros⁸³.

Não se sabe se Anaxímenes se dedicou à astronomia observacional. Um autor – Plínio, o Velho – menciona que ele teria inventado o estudo das sombras e o *gnomon* (que, como já vimos, é de origem mesopotâmica) e que apresentou um Esparta um relógio solar⁸⁴. No entanto, pode tratar-se de um engano de Plínio pois, como vimos, atribuía-se a Anaximandro exatamente a mesma coisa.

1.8 XENÓFANES E HERÁCLITO

Xenófanes de Colofon (c. 570 – c. 475) é um autor nascido pouco depois de Anaxímenes. Suas idéias sobre o universo são também muito diferentes das desenvolvidas posteriormente.

A Terra, para Xenófanes, seria achatada na parte de cima (onde vivem os homens), mas teria uma profundidade infinita, não existindo nem céu nem ar abaixo dela⁸⁵. O ar, acima da Terra, é também ilimitado. O Sol se forma a cada dia, não possuindo permanência, pois se extingue durante a noite. Ele e os demais astros são nuvens que se tornam ígneas por causa da rapidez de seu movimento, e possuem movimento retilíneo. A aparência circular de seus movimentos é apenas uma ilusão causada por sua grande distância⁸⁶. Existiriam

⁸¹ Kirk *et al.*, 154-156; Heath, 43-44.

⁸² Heath, 43-44.

⁸³ Um meteorito famoso caiu em Aegospotami em 467 a.C. Ver Kirk *et al.*, 156.

⁸⁴ Pline l'Ancien, *Histoire Naturelle* (Paris: Belles Lettres, 1950), vol. 2, 82.

⁸⁵ Heath, 54; Kirk *et al.*, 175.

⁸⁶ Dreyer, 18; Kirk *et al.*, 173; Heath, 55-56.

muitos sóis e muitas luas, sobre diferentes partes da Terra. Os eclipses e as fases da Lua seriam produzidos pela extinção dos seus fogos.

Heráclito de Éfeso (aproximadamente 500 a.C.) também acreditava que os astros são formados a cada dia, a partir do fogo. O Sol, a Lua e as estrelas seriam semelhantes a cuias, com a parte côncava voltada para baixo, que se enchem de fogo proveniente de exalações saídas da terra. As fases da Lua são produzidas por uma lenta rotação dessa cuia, que vai escondendo a parte interna, brilhante. Os eclipses do Sol e da Lua também seriam produzidos por rotações das cuias. O Sol seria realmente pequeno, como parece⁸⁷.

Não se sabe se Heráclito pensava em uma Terra plana, nem há informações sobre a forma do céu e sobre os movimentos celestes.

1.9 PITÁGORAS

Pitágoras (c. 580 – c. 500 a.C.) e seus sucessores imediatos não deixaram nenhuma obra escrita conhecida, não se sabendo, portanto, se suas doutrinas foram fielmente transcritas pelos seus discípulos e seguidores⁸⁸. É difícil, assim, saber quais idéias atribuídas aos pitagóricos são mais antigas (da época do próprio Pitágoras) ou posteriores.

Atribui-se a Pitágoras⁸⁹ a descoberta de que a harmonia entre dois sons musicais (de um monocórdio, por exemplo) depende de proporções numéricas simples, como $1/2$, $2/3$ e $3/4$. Essa relação entre número e som parece ter sido o ponto de partida que levou os pitagóricos a tratarem os números como a base ou modelo de tudo. Pensaram que essa relação numérica simples não era privativa da música, deveria ser um princípio fundamental da natureza e que poderia se estender a todos os fenômenos.

Supõe-se que foi Pitágoras o primeiro grego a afirmar que a Terra era esférica, assim como o universo⁹⁰. Aparentemente, essa foi uma concepção original,

⁸⁷ Heath, 59-61; Kirk *et al.*, 200-202.

⁸⁸ S. Sambursky, *El Mundo Físico de los Griegos* (Madrid: Alianza Editorial, 1990), 48.

⁸⁹ Kirk *et al.*, 232-235; Heath, 46-47; Pedersen, 17.

⁹⁰ Dreyer, 37.

inexistente em outras civilizações⁹¹. Não se sabe a primeira justificativa de tal idéia. Talvez ela tenha sido sugerida por motivos filosóficos – pela perfeição da forma geométrica da esfera⁹². Pitágoras teria também dividido a Terra em 5 zonas, associadas a outras tantas zonas celestes⁹³. Talvez ele tenha sido também o primeiro grego a descrever a diferença entre os movimentos regulares das estrelas e os movimentos irregulares dos planetas⁹⁴. Aparentemente Pitágoras pensava em uma Terra parada, no centro do universo.

Há um texto de Euclides, escrito dois séculos depois, que indica como a idéia de um céu esférico poderia ter surgido:

Como as estrelas fixas sempre são vistas surgindo dos mesmos lugares e pôr-se nos mesmos lugares, e as que surgem ao mesmo tempo são sempre vistas surgindo ao mesmo tempo, e as que se põem ao mesmo tempo são sempre vistas pondo-se ao mesmo tempo, e essas estrelas em seus percursos do nascimento ao ocaso permanecem sempre às mesmas distâncias umas das outras, e como isso só pode acontecer com objetos que se movem em movimento circular, quando o olho [do observador] está a igual distância da circunferência em todas as direções, como foi provado na Óptica, devemos assumir que as estrelas [fixas] se movem circularmente, e estão presas em um corpo, enquanto o olho está eqüidistante da circunferência dos círculos. Porém existe uma certa estrela entre as Ursas que não se move de lugar para lugar, mas giram em torno da posição em que está. E como esta estrela parece estar eqüidistante em todas as direções da circunferência dos círculos em que as estrelas restantes se movem, devemos assumir que os círculos são

⁹¹ Heath, 48.

⁹² Pedersen, 45; Heath, 48.

⁹³ Heath, 48-49.

⁹⁴ Heath, 50-51. A palavra planeta (em grego, *πλανητες*) vem de um verbo (*πλαναομαι*) que significa “vaguear”, ou “errar”. Em latim, foram posteriormente utilizadas as expressões “stellae errantes” e “errantia sidera”, para transmitir a mesma idéia.

todos paralelos, de modo que todas as estrelas fixas se movem em círculos paralelos tendo a dita estrela como um dos pólos.

Algumas estrelas nunca nascem nem se põem, porque são transportadas em círculos que estão elevados e que são chamados “sempre visíveis”. Essas estrelas são as mais próximas do pólo visível e chegam até o círculo ártico⁹⁵. E, dessas estrelas, as mais próximas do pólo se movem em círculos menores, e as que estão sobre o círculo ártico em círculos maiores, estes últimos parecendo tocar o horizonte.⁹⁶

1.10 PARMÊNIDES

Outros autores atribuem a Parmênides⁹⁷ a idéia de que a Terra é esférica, como o universo⁹⁸. Ele teria também afirmado que a Terra permanece imóvel no centro porque, estando eqüidistante de todos os pontos (da esfera do universo), ela fica em equilíbrio, não havendo motivo para se mover para um lado ou para o outro⁹⁹. Este é um argumento de simetria, idêntico ao de Anaximandro – embora os dois filósofos discordassem sobre a *forma* da Terra. Segundo alguns autores, teria sido Parmênides e não Pitágoras o primeiro a dividir a Terra em zonas.

Independentemente de sabermos se foi Parmênides ou Pitágoras (ou algum outro pensador) quem chegou a essa concepção, pode-se ter certeza de que a idéia de uma Terra redonda já existia no início do século V a.C. pois estava presente na obra de Heródoto¹⁰⁰.

⁹⁵ Isso que Euclides denomina “círculo ártico” seria um círculo dependente da posição do observador (latitude), não correspondendo ao que atualmente denominamos “círculo ártico”.

⁹⁶ Euclides, *Phaenomena*, prefácio, traduzido em M. R. Cohen; I. E. Drabkin, *A Source Book in Greek Science* (New York: McGraw Hill, 1948), 98-99.

⁹⁷ Não se sabe a época aproximada de seu nascimento e morte, mas ele estava ativo em torno do ano 500 a.C.

⁹⁸ Gerd, 58; Corral, 47-48.

⁹⁹ Heath, 64.

¹⁰⁰ Dreyer, 39.

Parmênides parece também ter descrito um modelo para os astros semelhante ao de Anaximandro – com faixas ou anéis de vários tipos em torno da Terra¹⁰¹. No entanto, a descrição existente é tão obscura que não se consegue compreender exatamente o que ele pensava.

Há dúvidas sobre se teria sido Pitágoras ou Parmênides quem afirmou que a estrela matutina e a estrela vespertina são a mesma coisa (Vênus)¹⁰², mas sabe-se que Parmênides defendeu essa idéia¹⁰³. Existem relatos de que Parmênides teria afirmado que a Lua é iluminada pelo Sol e que, por isso, ela tem seu lado luminoso sempre voltado para ele¹⁰⁴. No entanto, costuma-se aceitar que foi Anaxágoras quem fez essa descoberta.

A partir da época de Parmênides, a idéia de que todos os astros são objetos permanentes que giram em torno da Terra parece ter se tornado parte da visão grega do universo.

1.11 ANAXÁGORAS

Anaxágoras (c. 500 – c. 428 a.C.) foi o primeiro filósofo que conhecemos que se fixou em Atenas. Ele ensinava que a Terra era achatada e sustentada pelo ar. O Sol, a Lua e as estrelas seriam como pedras, carregadas pelo éter em torno da Terra. O Sol seria “maior do que o Peloponeso”, e supõe-se portanto que ele não o imaginava do tamanho da Terra ou maior do que ela. A Lua seria feita de terra, e teria partes planas e acidentadas. A Lua não possuiria luz própria, sendo iluminada pelo Sol. Os eclipses do Sol ocorreriam quando, na fase da Lua Nova, ela se coloca entre a Terra e o Sol. Os eclipses da Lua ocorreriam quando a Terra fica entre o Sol e a Lua, ou quando algum outro corpo celeste inferior à Lua fica à sua frente¹⁰⁵.

¹⁰¹ Kirk *et al.*, 258-259; Heath, 66-67.

¹⁰² Heath, 66 e 75.

¹⁰³ Gregory Vlastos, *O Universo de Platão* (Brasília: Universidade de Brasília, 1987), 35.

¹⁰⁴ Heath, 75-76.

¹⁰⁵ Kirk *et al.*, 381-2; Heath, 78-80.

A idéia de que existem “pedras” no céu poderia ter sido sugerida pela observação de meteoritos¹⁰⁶. Sabe-se que ocorreu uma queda de um grande meteorito em Aegospotami em 467 a.C. e alguns autores antigos afirmaram que Anaxágoras teria predito esse fenômeno¹⁰⁷. É claro que esse tipo de previsão não seria possível, mas mostra que houve alguma conexão entre Anaxágoras e meteoritos. Quanto à existência de outros corpos inferiores à Lua que poderiam eclipsá-la, isso poderia ter sido sugerido pelo fato de que o número de eclipses observáveis da Lua é muito maior do que o número de eclipses do Sol.

Talvez ele tenha explicado as fases da Lua, mas há dúvidas sobre isso, porque ele admitia que a Terra era achatada, e se pensasse na Lua como um disco, seria impossível explicar suas fases¹⁰⁸.

1.12 O MODELO COSMOLÓGICO PITAGÓRICO DE FILOLAU

O mais antigo pitagórico sobre o qual existem informações mais detalhadas foi Filolau de Crótona, que viveu um século depois de Pitágoras, talvez em torno de 450 – 400 a.C. Os fragmentos conservados de Filolau enfatizam, seguindo o pensamento pitagórico, a importância dos números e da harmonia¹⁰⁹:

E realmente todas as coisas que são conhecidas possuem número; pois é impossível pensar ou conhecer qualquer coisa sem isso.

Como esses princípios [do universo] não eram semelhantes nem do mesmo tipo, seria impossível ordená-los em um universo se não tivesse sido pela harmonia – seja como for que ela surgiu. Coisas que são semelhantes e do mesmo tipo não precisam de harmonia, mas os que são diferentes e não são do mesmo tipo e que possuem ordens

¹⁰⁶ Pedersen, 35.

¹⁰⁷ Kirk *et al.*, 382.

¹⁰⁸ Heath, 78-82.

¹⁰⁹ Kirk *et al.*, 326-327.

diferentes devem ser presos um ao outro pela harmonia, para poderem se manter unidos em um universo ordenado.

Filolau propôs um modelo cosmológico completamente diferente dos anteriores. Nessa nova cosmologia¹¹⁰, o centro do universo é ocupado por um fogo central que é o altar de Zeus¹¹¹. A Terra e os astros giram em torno desse fogo central, que nunca vemos, porque a parte habitada da Terra estaria sempre voltada no sentido oposto a ele.

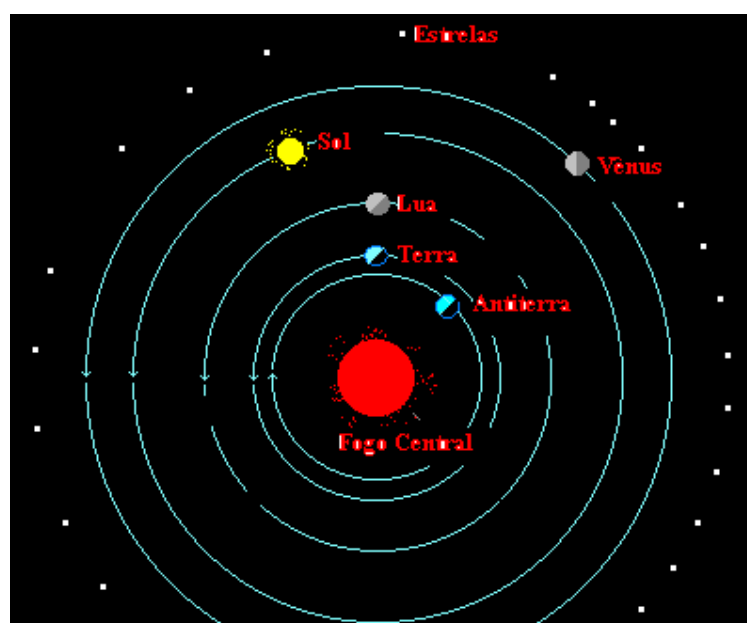


Figura 1.2 – Modelo de Universo dos Pitagóricos, a partir do fogo central, têm-se: a Anti-Terra, a Terra, a Lua, o Sol, etc. O sistema é limitado pela esfera das estrelas fixas (os planetas Mercúrio, Marte, Júpiter e Saturno não foram desenhados).

A estrutura do universo seria esta: a esfera das estrelas, que é o limite do mundo¹¹²; depois (de fora para dentro) os 5 planetas, o Sol, a Lua, a Terra, a Anti-

¹¹⁰ Kirk *et al.*, 342-344; Heath, 94-99.

¹¹¹ Torre de Zeus, ou Trono de Zeus, ou Casa de Zeus, ou Altar, são alguns dos nomes atribuídos a esse fogo central.

¹¹² Esse limite superior do universo era chamado por Filolau de Olimpo, por ser a região em que os elementos são mais puros.

Terra e o fogo central¹¹³. Existiriam assim 10 corpos divinos girando em torno do centro do universo. Note-se que este é o primeiro autor grego que sabemos ter indicado claramente a existência de 5 planetas.

O motivo para colocar um fogo no centro do universo, e não a Terra, parece ter sido filosófico: o centro seria o lugar mais nobre, e o fogo é mais nobre do que a terra¹¹⁴. Filolau supunha que somente o fogo central era gerador de energia. O Sol, segundo ele, era de natureza vítrea e porosa, capaz de absorver a luz invisível do Olimpo e do fogo central, tornando-se visível aos nossos olhos.¹¹⁵

A Anti-Terra seria um astro mais próximo do fogo central do que a Terra, e que sempre a acompanha. Fica, assim, invisível para os homens, que habitam a parte da Terra voltada para longe do fogo central. No entanto esse astro, quando estivesse entre o fogo central e a Lua, produziria um eclipse da Lua. Segundo Aristóteles, esse seria um motivo da introdução desse corpo: explicar o motivo pelo qual há mais eclipses da Lua do que do Sol¹¹⁶. Outro motivo, também indicado por Aristóteles, seria numerológico. Os pitagóricos consideravam que o número 10 é perfeito, por incluir a natureza de todos os números¹¹⁷. Por isso, esperavam que existissem 10 corpos se movendo nos céus. Como havia apenas 9, adicionaram a Anti-Terra para completar o número perfeito¹¹⁸.

Nesse sistema cosmológico, a Terra e todos os astros giram em torno do fogo central. Pelos com os testemunhos antigos, de acordo com Filolau, o dia e a noite é determinado pelo movimento da Terra. No entanto, não se deve pensar em um movimento da Terra em torno do seu eixo no nosso sentido atual. A Terra se move em torno do fogo central, sempre com a mesma face voltada para o centro (como a Lua, que sempre tem a mesma face voltada para a Terra)¹¹⁹. Assim,

¹¹³ Embora os astrônomos da Mesopotâmia já conhecessem 5 planetas (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter, Saturno) muito antes disso, este parece ter sido o primeiro modelo astronômico grego a mencionar todos esses planetas. Vlastos, 35.

¹¹⁴ Heath, 95; Kirk *et al.*, 343.

¹¹⁵ Abetti, 43-44; Dreyer, 46; Heath, 115-117.

¹¹⁶ Heath, 96.

¹¹⁷ Os números básicos, para os Pitagóricos, são 1, 2, 3, 4. A soma desses números é igual a 10.

¹¹⁸ Heath, 98.

¹¹⁹ Pode-se também dizer que está sempre com a mesma face voltada para longe do centro, ou seja, para o Olimpo.

quando a Terra completa uma volta em torno do fogo central, também completa uma volta em torno de seu próprio eixo. Portanto, embora os textos antigos não esclareçam esse ponto, a conclusão mais razoável é a de que Filolau precisaria supor que a Terra dá uma volta em torno do fogo central em um dia sideral¹²⁰.

Há um problema, percebido por vários autores, nessa interpretação. Ela pressupõe que a esfera das estrelas seria fixa; no entanto, todas as descrições do sistema de Filolau indicam que existiam 10 corpos *girando* em torno do fogo central. Há várias tentativas de resolver esse problema¹²¹, mas todas elas são conjecturais.

Atribui-se a Filolau a idéia de um ciclo de tempo de 59 anos¹²², chamado “grande ano”, no qual haveria 729 (= 9^3) meses lunares¹²³. Pode ser que a idéia desse “grande ano” fosse a de encontrar uma relação numérica simples entre os períodos dos movimentos da Lua e do Sol.

Os pitagóricos supunham que haveria uma harmonia entre os movimentos dos diversos astros. Cada um deles produziria um som, dependendo de sua velocidade. Os que se movessem mais depressa produziriam um som mais agudo, os mais lentos produziriam sons mais graves. Supunham que os mais rápidos eram os mais distantes do centro. De acordo com a concepção dos pitagóricos, esses vários sons seriam harmoniosos entre si, isto é, haveria relações numéricas simples entre eles¹²⁴. Platão afirmou que os pitagóricos chamavam a astronomia e o estudo matemático da harmonia de “ciências irmãs”¹²⁵.

A partir daí, iniciaram a busca de combinações numéricas, relacionadas a certos intervalos musicais, que poderiam explicar os movimentos da Lua, do Sol e dos planetas conhecidos. Segundo Corral¹²⁶, os movimentos dos corpos celestes

¹²⁰ Heath, 100; Abetti, 43-44.

¹²¹ Heath, 101-105.

¹²² A duração desses anos seria de 364 dias e meio.

¹²³ Heath, 102.

¹²⁴ Heath, 105-106; Kirk *et al.*, 344-345.

¹²⁵ Platão, *República* 530D. Rosemary Wright, *Cosmology in Antiquity* (London: Routledge, 1995), 135.

¹²⁶ Corral, 1997, pp. 46-47.

deveriam produzir a chamada música das esferas planetárias que somente seria ouvida pelos iniciados nas doutrinas pitagóricas¹²⁷.

Não se sabe exatamente como essa teoria era desenvolvida, na época de Filolau. Como a escala musical grega tinha sete notas, é provável que apenas fossem considerados 7 dos 10 corpos que se movem em torno do fogo central¹²⁸. Pela ordem de maior distância à sede de Zeus, tem-se: a esfera das estrelas, Saturno, Júpiter, Marte, Vênus, Mercúrio, Sol, Lua, Terra e Anti-Terra. Se excluirmos a esfera das estrelas, a Terra e a Anti-Terra, sobram 7 corpos. No entanto, de acordo com indicações presentes nas obras de Platão, pode ser também que eles considerassem 8 corpos, incluindo a esfera das estrelas (cobrindo então 8 notas musicais)¹²⁹.

Segundo Sambursky¹³⁰, há evidências de que os remanescentes da escola pitagórica, devolveram à Terra sua posição central, no centro do cosmo, e situaram o fogo central no centro da Terra, concordando, em princípio, com a cosmologia aristotélica de estar a Terra em repouso no centro do universo.¹³¹

Aproximadamente nessa mesma época, os astrônomos atenientes Euctêmon e Méton mostraram que as durações das estações do ano eram diferentes entre si, o que indicava que o movimento do Sol não mantinha sempre a mesma velocidade em relação às estrelas¹³². Seus resultados foram:

- Do solstício de verão ao equinócio de outono: 90 dias

¹²⁷ Mesmo os bem iniciados nas doutrinas pitagóricas, certamente, não conseguiam ouvir os sons do movimento planetário, contudo, a busca de combinações de números, relacionados a essa harmonia, além de produzir um grande avanço na Matemática, era, sem dúvida nenhuma, um modelo físico. E esse modelo físico, poderia ser extensivo à alternância do dia e da noite, do calor e do frio sobre a Terra, etc. Todos os fenômenos periódicos seriam regulados por leis harmônicas. Por toda essa harmonia, governada por leis matemáticas, os pitagóricos chamavam o Universo de Cosmo (Kósmos em grego significa ordem).

¹²⁸ Heath, 107-108.

¹²⁹ Ibid.

¹³⁰ Sambursky, 90.

¹³¹ Essa nova posição para o fogo central, localizado no centro terrestre, talvez justificasse o fato da presença de vulcões ativos na superfície terrestre.

¹³² Vlastos, 32; Heath, 215-216.

- Do equinócio de outono ao solstício de inverno: 90 dias
- Do solstício de inverno ao equinócio de primavera: 92 dias
- Do equinócio de primavera ao solstício de verão: 93 dias

Comparados com medidas modernas, esses resultados apresentam erros de 1 a 2 dias, mas essa diferença não é um ponto importante. O notável é a atitude de aceitar uma irregularidade no movimento do Sol, e procurar medir essa irregularidade¹³³.

¹³³ Vlastos, 32-33.

2 – A cosmologia de Platão

2.1 PLATÃO

Platão (429-347 a.C.), que procedia da aristocracia ateniense, foi discípulo de Sócrates e mestre de Aristóteles. Fundou em sua cidade uma escola, a Academia. Em suas obras, Platão não se dedica muito ao estudo da natureza, mas apesar disso suas idéias sobre o universo e seus movimentos tiveram grande influência. Além disso, como Platão é o mais antigo filósofo grego do qual foi preservado um grande volume de obras, trata-se de uma fonte inestimável para se conhecer, através de fontes primárias, o pensamento da sua época.

De acordo com Gregory Vlastos, Platão tinha conhecimento de muitos fatos astronômicos, como estes¹³⁴:

- Os planetas, além de acompanharem o movimento diurno (de leste para oeste) das estrelas fixas, possuem também um movimento inverso, muito mais lento, de oeste para leste, oblíquo em relação ao equador celeste.
- Os planetas possuem diferentes períodos de revolução (e os que estão a maior distância da Terra se movem mais lentamente), sendo que Vênus e Mercúrio têm períodos iguais ao do Sol.
- Os movimentos dos planetas apresentam irregularidades aparentes, como retrocessos e avanços.

Para explicar esses e outros fenômenos, Platão irá elaborar uma interessante concepção sobre a estrutura do universo.

2.2 AS IRREGULARIDADES DOS MOVIMENTOS CELESTES

É bastante difícil identificar claramente as concepções astronômicas de Platão, por vários motivos. Primeiramente, porque elas aparecem em diferentes obras, com diferentes enfoques, sendo difícil conciliar algumas das idéias que são

¹³⁴ Vlastos, 36-37.

apresentadas¹³⁵. Em segundo lugar, como os diálogos de Platão descrevem – supostamente – as idéias de diversos personagens, não se pode assegurar que Platão defendesse realmente todas as idéias que apresenta.

Aparentemente, Platão concebia uma astronomia teórica na qual seria descrito um céu matemático perfeito e eterno, do qual o céu visível seria apenas uma expressão imperfeita, no tempo e no espaço¹³⁶. Se essa interpretação é correta, Platão aceitava a existência de irregularidades nos movimentos celestes que não poderiam ser explicadas pela teoria¹³⁷. Alguns pensadores posteriores interpretaram assim o pensamento platônico:

Os intérpretes da Escola de Platão, em sua busca da causa, associaram a origem da igualdade e desigualdade dos movimentos [dos planetas] aos princípios vitais dos astros, como dizem Porfírio e Teodoro. Segundo eles, de fato, a igualdade de velocidade ou desigualdade de velocidade é devida a que os intelectos desses astros se voltam para a Essência sem intermediários ou com intermediários, e por tenderem ao mesmo fim (mesmo se tendem por intermediários diferentes) ou a um outro fim diferente¹³⁸.

Platão utilizou a expressão “movimentos errantes” ao se referir aos planetas¹³⁹, e de acordo com Gregory Vlastos isso implicava reconhecer que seus movimentos eram irregulares e sua trajetória não era circular (que eles se desviavam de uma trajetória simples). No entanto, Platão interpretava esses movimentos como o resultado de movimentos circulares totalmente regulares, chegando a dizer que seria uma blasfêmia supor que esses corpos celestes possuem qualquer irregularidade¹⁴⁰. Em uma de suas obra (*Leis*), Platão se refere

¹³⁵ Heath, *Aristarchus*, 134.

¹³⁶ Heath, *Aristarchus*, 136-138.

¹³⁷ Heath, *Aristarchus*, 139.

¹³⁸ Proclus, *Commentaire sur le Timée*, livro IV, 64.9-15, vol. 4, 89.

¹³⁹ Platão, *Timeu* 39D, 40B. Vlastos, 69.

¹⁴⁰ Platão, *Leis* 821D. Vlastos, 70.

claramente à idéia de que os planetas possuem movimentos irregulares como sendo falsa¹⁴¹.

Bem, meus bons amigos, essa opinião de que a Lua, o Sol e as outras estrelas vagueiam não é correta, mas acontece justamente o oposto. Pois cada uma delas atravessa o mesmo caminho, não muitos caminhos, e sempre em um círculo, embora pareça se mover em muitos caminhos.

2.3 ESTRUTURA GERAL DO UNIVERSO

A base das idéias astronômicas de Platão parece ter se originado das teorias pitagóricas¹⁴². Deve-se ter em mente que, no *Timeu* de Platão, o principal personagem do diálogo (cujo nome é exatamente Timeu) seria um pitagórico, e portanto as idéias astronômicas do diálogo seriam provenientes dessa escola filosófica.

Platão assume que a Terra está parada, no centro do universo. Como vimos, houve pitagóricos que propuseram outros modelos, em que a Terra giraria em torno do fogo central. No entanto, acredita-se que a teoria pitagórica mais antiga era geocêntrica¹⁴³.

Então eu estou convencido – disse ele – em primeiro lugar que se a Terra, sendo uma esfera, está no meio dos céus, ela não precisa do ar ou de qualquer outra força para impedi-la de cair, mas que a uniformidade da substância do céu em todas as suas partes e o equilíbrio da própria Terra são suficientes para sustentá-la. Pois uma coisa em equilíbrio no meio de qualquer substância uniforme não tem uma causa que a incline mais ou menos em qualquer direção, mas

¹⁴¹ Platão, *Leis*, livro VII, 821b-822c; Heath, *Aristarchus*, 182.

¹⁴² Heath, *Aristarchus*, 141.

¹⁴³ Heath, *Aristarchus*, 141.

permanecerá como está, sem tal inclinação. Primeiramente estou persuadido disso¹⁴⁴.

No seu diálogo *República*, Platão apresenta uma visão bastante detalhada do sistema astronômico¹⁴⁵. A descrição é apresentada em meio a um mito que descreve a jornada das almas dos mortos. Apresenta a visão de que existiria um tipo de pilar atravessando o universo de uma ponta até a outra, feito de luz de muitas cores (como o arco-íris) e abrindo-se em suas extremidades e espalhando-se para os lados, em torno do universo, como se fossem correntes prendendo-o e reforçando-o. Partindo dessas extremidades existiria o fuso ou eixo que mantém todas as rotações do universo. O eixo e seu encaixe seriam feitos de um material adamantino, enquanto as rodas do universo seriam feitas parcialmente desse material e parcialmente de outras substâncias.

A estrutura do universo seria formada por uma série de 8 cascas redondas concêntricas, encaixando-se umas nas outras. Não fica muito claro se essas cascas seriam esféricas ou hemisféricas, pela descrição de Platão¹⁴⁶. Elas teriam diferentes espessuras, e cada uma delas estaria associada a um planeta (incluindo-se a Lua e o Sol). Quando o eixo do universo gira, movendo a casca mais externa, os sete círculos internos giram lentamente no sentido oposto, com diferentes velocidades. Sobre cada um dos círculos fica uma Sereia, que canta uma única nota musical, e a partir das oito notas é produzida uma harmonia.

A descrição da *República* não dá nomes aos planetas, mas a partir de certas indicações (descritas abaixo) é possível notar que a ordem adotada por Platão nesta obra seria¹⁴⁷:

1	2	3	4	5	6	7	8
Estrelas	Saturno	Júpiter	Marte	Mercúrio	Vênus	Sol	Lua

¹⁴⁴ Platão, *Phaedo* 108c-109a; Heath, *Aristarchus*, 144.

¹⁴⁵ Platão, *República*, livro X, 616b-617d. Heath, *Aristarchus*, 148-149.

¹⁴⁶ O texto fala sobre bordas dessas “rodas”, mas fala também que são côncavas. Poderiam ser também faixas esféricas: Heath, *Aristarchus*, 153-155.

¹⁴⁷ Heath, *Aristarchus*, 156.

O texto de Platão se refere aos planetas (incluindo Sol e Lua) através de seus brilhos e cores, e não por seus nomes, mas a identificação é bastante fácil. Proclus foi um dos autores antigos que fez a interpretação aceita geralmente¹⁴⁸.

Pode-se perceber que Platão coloca o Sol logo depois da Lua, porque ele descreve que “o sétimo [de fora para dentro] é o mais brilhante, e o oitavo obtém sua luz do sétimo que brilha sobre ele”. Além disso, afirma que “o sexto é o segundo em brancura” e que “o segundo e o quinto são semelhantes entre si e mais amarelados do que os anteriores”, o que permite identificar o sexto como Vênus, e o quinto como Mercúrio. O quarto é descrito como vermelho pálido, e portanto corresponde a Marte.

Este é o mais antigo documento grego em que as cores dos planetas são descritas.

2.4 AS VELOCIDADES DOS PLANETAS

A ordem dos astros estaria relacionada às suas velocidades, considerando que o mais rápido (Lua) estaria mais próximo, e que Sol, Vênus e Mercúrio possuem a mesma velocidade (completam suas revoluções em um ano).

Desses círculos, o oitavo [Lua] se move mais rapidamente; em segundo lugar quanto à velocidade e movendo-se todos juntos, o sétimo, sexto e quinto [Sol, Vênus, Mercúrio]; em terceiro lugar em velocidade, move-se o quarto [Marte], com uma rotação que parece contrária; em quarto lugar, o terceiro [Júpiter], e em quinto lugar, o segundo [Saturno]¹⁴⁹.

Platão menciona tanto na *República* quando no *Timeu* a igualdade dos períodos dos movimentos de Mercúrio, Vênus e Sol¹⁵⁰.

¹⁴⁸ Proclus, *Commentaire sur la République* (Paris: J. Vrin, 1970), dissert. XVI, 222.27-224.7; vol. 3, 176-177.

¹⁴⁹ Platão, *República* 617B. Cornford, 88.

¹⁵⁰ Platão, *República* 617A-B; *Timeu* 38D. Vlastos, 99.

Nas *Leis*, esse princípio aparece também claramente:

Observamos no caso desta rotação que tal movimento carrega tanto o maior quanto o menor círculo, dividindo-se proporcionalmente para o menor e o maior, e sendo proporcionalmente menor e maior. Isso, de fato, é o que o torna uma fonte de todo tipo de maravilhas, pois proporciona aos círculos maiores e menores velocidades altas ou baixas correspondendo a seus tamanhos – um efeito que se poderia imaginar impossível¹⁵¹.

Como o Sol, Mercúrio e Vênus possuem períodos siderais iguais entre si, suas velocidades (em relação à Terra) não permitem determinar qual deles está mais próximo de nós. Platão optou pela ordem

Lua – Sol – Vênus – Mercúrio – Marte – Júpiter – Saturno

sem justificar essa escolha. Não há dúvidas, no entanto, de que essa é realmente a ordem adotada por Platão, que aparece explicitamente em outros pontos:

E para que pudesse haver uma medida notável para a velocidade relativa e lentidão com que eles se movem em suas oito revoluções, Deus acendeu uma luz na segunda órbita a partir da Terra – aquilo que atualmente chamamos Sol – para que pudesse preencher todo o céu com seu brilho e para que todos os seres vivos que pudessem possuir o conhecimento dos números, aprendendo-o da rotação uniforme do Mesmo¹⁵².

Muitos séculos depois, ao interpretar o *Timeu* de Platão, Proclus alegou que os próprio Oráculos antigos ensinavam que a Lua vinha logo depois do ar (da Terra para o céu), e o Sol logo depois da Lua.

¹⁵¹ Platão, *Leis* 893C. Cornford, 82.

¹⁵² Platão, *Timeu* 39B. Cornford, 115.

Talvez seja possível provar a partir dos *Oráculos*, portanto, como disse, que o Sol vem logo antes da Lua [de fora para dentro], como a Lua antes do ar, com o céu ocupando o lugar do fogo, o que também é a opinião de Platão¹⁵³.

Não sabemos se Platão utilizou alguma fonte antiga para se justificar.

Platão não indica, na *República*, quais seriam as distâncias dos vários astros à Terra, mas indica que certas cascas seriam mais espessas do que outras. A mais espessa de todas seria a primeira (das estrelas fixas), e a segunda mais espessa seria a sexta (correspondente a Vênus). A mais estreita seria a segunda (de Saturno). Não fica claro o motivo pelo qual Platão introduziu essas diferenças.

Segundo Proclus, a espessura das faixas estaria associada ao tamanho dos astros¹⁵⁴. A sétima faixa, associada ao Sol, seria a mais larga, porque o Sol é o maior dos astros. Em segundo lugar em tamanho viria a faixa do Lua, depois a de Vênus, depois Marte, depois Júpiter, depois Saturno e por último Mercúrio. Outra interpretação possível, segundo o mesmo Proclus, seria associar a espessura das faixas à variação das velocidades de cada astro: os que variam mais de velocidade teriam as faixas mais largas. No entanto, nenhuma dessas interpretações está de acordo com as indicações de Platão.

2.5 O “TIMEU” DE PLATÃO

Das várias obras de Platão, a que faz referências mais detalhadas à constituição do Universo e aos movimentos dos planetas é o *Timeu*.

Para Platão, o Universo é formado por quatro elementos: fogo, ar, água e terra. Cada um desses elementos, talvez por influência dos pitagóricos, é representado por um número, e estão em contínua proporção¹⁵⁵.

¹⁵³ Proclus, *Commentaire sur le Timée* (Paris: J. Vrin, 1968), livro IV, 61.25-29, vol. 4, 84.

¹⁵⁴ Proclus, *Commentaire sur la République* (Paris: J. Vrin, 1970), dissert. XVI, 217.20-219.20, vol. 3, 169-171.

¹⁵⁵ Platão, *Timeu e Crítias ou a Atlântida*, 32, [s. d.], pp. 82-83.

Assim Deus colocou o ar e a água no meio, entre o fogo e a terra, e dispôs esses elementos uns relacionados aos outros, tanto quanto seria possível numa mesma relação, de tal modo que o fogo é para o ar, o ar foi para a água, e o que o ar é para a água, a água foi para a terra. Destarte, uniu e conformou um Urano (céu) visível e tangível. Por esses procedimentos e com a ajuda desses corpos assim definidos, em número de quatro, foi engendrando o Corpo do Cosmos.

No *Timeu*, Platão não identifica claramente qual elemento (ou quais elementos) formam o céu, mas no *Phaedo* refere-se ao céu como constituído de éter¹⁵⁶.

Platão defende a idéia de que o cosmos deve ser esférico porque a esfera é a forma mais simétrica ou homogênea que existe¹⁵⁷, e o homogêneo é muito mais belo do que o heterogêneo¹⁵⁸.

Por isso, Deus tornou o todo em forma esférica e circular, sendo todas as distâncias iguais, do centro à extremidade. É esta, de todas as figuras, a mais perfeita e a mais completamente semelhante a si mesma. Com efeito, Deus pensava que o semelhante é mil vezes mais belo que o díspar.

Aqui, o Universo é descrito claramente como possuindo forma esférica (isso não fica claro nos outros textos), girando uniformemente em torno de um eixo¹⁵⁹.

¹⁵⁶ Platão, *Phaedo* 109a-110a; Heath, *Aristarchus*, 145-146.

¹⁵⁷ Platão, *Timeu* 33B. Ver Gregory Vlastos, *O Universo de Platão* (Brasília: Universidade de Brasília, 1987), 28.

¹⁵⁸ *Ibid.*, 33, p. 84.

¹⁵⁹ Platão, *Timaeus* 32c-33b; Heath, *Aristarchus*, 158.

2.6 OS MOVIMENTOS DO UNIVERSO

O artesão do universo, ou Demiurgo, constrói a alma do mundo cortando em tiras o material produzido e juntando as pontas para produzir faixas circulares, que vão ser colocadas em movimento circular. Para Platão, o movimento de rotação é o mais apropriado para a razão e a inteligência¹⁶⁰, sendo o único que pode ocorrer sem que o corpo saia de seu próprio lugar.

O círculo mais externo produz o “movimento do Mesmo”, um movimento uniforme que pode ser visto no movimento das estrelas, mas que também se propaga às regiões inferiores. O outro círculo da “alma do mundo” tem, segundo Platão, o “movimento do Diferente”, que é inclinado em relação ao “movimento do Mesmo”¹⁶¹.

O *Timeu* descreve os movimentos principais do universo referindo-se a duas faixas que são colocadas obliquamente uma sobre a outra, formando um X, e depois dobradas circularmente, de tal modo a formar dois círculos inclinados um ao outro. A faixa mais externa teria um movimento uniforme, “para o lado direito”, e a faixa interna, oblíqua, teria um movimento “para o lado esquerdo”.

Esse material, então, ele cortou longitudinalmente em duas metades. E fazendo as duas se cruzarem nos seus centros na forma da letra X, ele torceu cada uma em forma de um círculo e a fechou, fazendo com que cada uma encontrasse a si mesma e à outra em um ponto oposto àquele em que haviam sido colocadas em contato.

Ele então as colocou naquele movimento que transporta uniformemente no mesmo lugar, e fez um dos círculos externo, e o outro interno. O movimento externo ele denominou movimento do Mesmo; o interno, movimento do Diferente. O movimento do Mesmo ele fez girar para a direita. O movimento do Diferente para a esquerda, diagonalmente¹⁶².

¹⁶⁰ Platão, *Timeu* 34A. Ver Gregory Vlastos, *O Universo de Platão* (Brasília: Universidade de Brasília, 1987), 30.

¹⁶¹ Platão, *Timeu* 39A. Ver Vlastos, 31.

¹⁶² Platão, *Timeu* 36B-C. Cornford, 73.

A faixa interna, oblíqua, foi dividida em 7 círculos desiguais por 6 divisões, “na proporção dos intervalos duplos e triplos, cada um em número de 3”. Três desses círculos se moveriam na mesma velocidade, e os outros quatro com velocidades diferentes, mas de forma proporcional¹⁶³.

Ele dividiu a rotação interna em seis lugares, em sete círculos diferentes, correspondendo aos intervalos duplo e triplo, havendo três de cada um deles. E ele designou que os círculos deveriam se mover em sentidos opostos uns aos outros; enquanto em velocidade três deveriam ser semelhantes, mas os outros quatro deveriam diferir em velocidade entre si, e dos outros três, mas movendo-se de acordo com uma razão¹⁶⁴.

A faixa mais externa, que se move “para a direita”, é interpretada como representando o equador celeste, e a faixa mais interna, oblíqua, correspondendo à posição da eclíptica (ou da faixa do Zodíaco). Essa inclinação entre as duas faixas indica que os movimentos dos planetas descrevem trajetórias inclinadas em relação ao equador celeste. Na *República* não aparecia essa idéia da obliquidade dos movimentos dos planetas.

Francis Cornford supõe que o movimento do Diferente é o próprio movimento do Sol, que parece à primeira vista regular, percorrendo o círculo da eclíptica¹⁶⁵. Se tomarmos esse movimento como referência, alguns astros se movem mais depressa do que o Sol (a Lua, e algumas vezes Vênus e Mercúrio) e outros mais lentamente (Marte, Júpiter, Saturno). Assim, alguns movimentos, comparados ao Sol, são em sentido oposto ao dele¹⁶⁶.

Cornford interpreta esses círculos como meras indicações sobre os movimentos imaginados por Platão¹⁶⁷. A abóbada celeste não pode ser

¹⁶³ Platão, *Timaeus* 36b-d; Heath, *Aristarchus*, 159.

¹⁶⁴ Platão, *Timeu* 36D. Cornford, 74.

¹⁶⁵ Cornford, 83.

¹⁶⁶ *Ibid.*, 86.

¹⁶⁷ Cornford, 78-79.

considerada como um círculo, mas ela é movida pelo “movimento do Mesmo”, e portanto esse círculo representa apenas um tipo de movimento. O círculo oblíquo poderia ser associado ao Zodíaco, mas é claro que o Zodíaco acompanha toda a esfera das estrelas e portanto não tem um movimento distinto dela. Trata-se, novamente, de uma mera indicação de um movimento circular.

Esse tipo de estrutura do universo é representado nas esferas armilares. Não se sabe com certeza se existiam esferas armilares na época de Platão, mas Cornford acredita que sim¹⁶⁸.

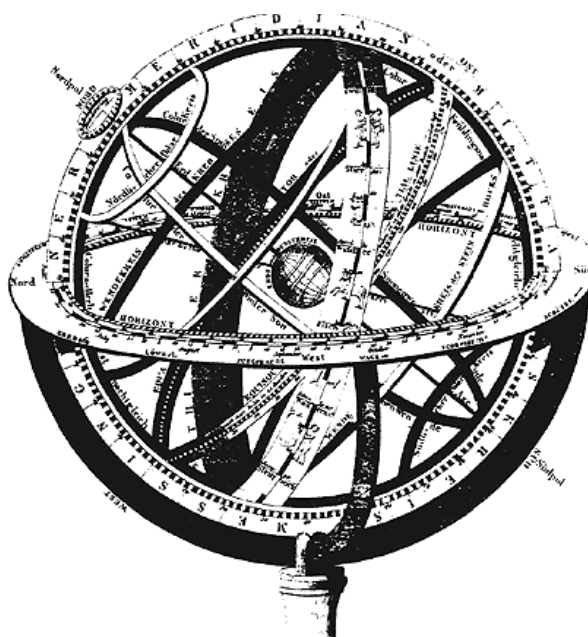


Figura 2.1 – Esfera armilar Renascentista, representando a Terra no centro, o eixo do universo atravessando a Terra (inclinado), o equador celeste (perpendicular ao eixo do universo), a faixa do Zodíaco (inclinada em relação ao equador celeste) e outros círculos.

Há um ponto do *Timeu* em que Platão parece indicar que todos os astros são esféricos e giram em torno de seus próprios eixos¹⁶⁹. A Terra também é descrita como esférica, colocada no eixo que atravessa o universo de uma ponta até a outra. Alguns autores interpretaram a descrição de Platão como indicando que a

¹⁶⁸ Cornford, 75.

¹⁶⁹ Platão, *Timaeus* 40^a-b; Heath, *Aristarchus*, 173.

Terra também girava em torno desse eixo¹⁷⁰, mas a interpretação mais aceita é a de que a Terra, para Platão, estaria parada no centro do universo¹⁷¹.

2.7 OS PLANETAS

A Terra é o centro do Universo; a Lua e o Sol são astros girando em redor da Terra:¹⁷²

[...] Deus os distribuiu em número de sete, nas sete órbitas descritas pela substância do Outro. A Lua, inicialmente, na primeira, ao redor da Terra, o Sol, em segundo lugar, acima da Terra, a estrela matutina e a que é consagrada a Hermes, de tal sorte que percorrem seus círculos com velocidade igual a do Sol, mas recebendo um impulso de direção contrária. Daí vem que o Sol, o astro da manhã e o de Hermes encontram-se um por vez, e são atingidos uns pelos outros, segundo uma lei constante.

Cada uma das 7 subdivisões da faixa interna representa o movimento de um dos planetas (incluindo Sol e Lua). Os três círculos que se movem com a mesma velocidade (velocidade angular média, vista a partir da Terra) correspondem a Sol, Vênus e Mercúrio, como no texto da *República*. Essa faixa interna deve ser imaginada como possuindo uma grande espessura, para que essa divisão possa ser feita.

No *Timeu*, Platão se refere explicitamente aos planetas e sua ordem:

Ele [o Demiurgo] colocou a Lua mais próxima à Terra, em segundo lugar acima da Terra ele colocou o Sol; depois, colocou as órbitas dos

¹⁷⁰ O próprio Aristóteles adota essa interpretação (*De caelo*, livro II, cap. 14, 296a25), e é difícil entender como ele poderia desconhecer ou interpretar incorretamente as idéias de Platão. No entanto, a idéia de que a Terra girasse em torno do eixo do universo entraria em conflito com todo o sistema de Platão.

¹⁷¹ Heath, *Aristarchus*, 174.

¹⁷² Platão, 38, [s. d.], p. 93.

planetas que se movem em um círculo que tem a mesma velocidade que o Sol, mas possuem uma força contrária a ele, que são a Estrela Matutina [Vênus] e a que é consagrada a Hermes [Mercúrio]. E assim, o Sol e a estrela de Hermes e a Estrela Matutina ultrapassam e são ultrapassadas uma pela outra¹⁷³.

As retrogradações dos planetas já eram conhecidas antes de Platão, e há pontos de suas obras em que ele parece reconhecer esse tipo de fenômeno, já que ele se refere explicitamente aos movimentos de Vênus e Mercúrio que às vezes ultrapassam o Sol e outras vezes são ultrapassados¹⁷⁴. No entanto, Platão não tenta explicá-los através de nenhum modelo geométrico. Apenas afirma que Mercúrio e Vênus possuem um “poder contrário” ao do Sol, que poderia explicar o porquê de algumas vezes se adiantarem ao Sol, e outras vezes se atrasarem em relação a ele¹⁷⁵.

2.8 AS DISTÂNCIAS DOS PLANETAS

A divisão da faixa interna em 7 partes obedeceria, segundo o texto do *Timeu*, a um plano matemático, seguindo as 3 primeiras potências dos números 2 e 3 (ou seja, 2, 4, 8 e 3, 9, 27). Note-se que esse tipo de análise tem um estilo platônico marcante.

Esses números poderiam ser interpretados como referindo-se aos raios dos diversos círculos, ou a suas espessuras, ou às razões entre os raios sucessivos¹⁷⁶. A interpretação mais simples ou natural¹⁷⁷ é a de que esses números representam os raios dos diferentes círculos: Lua = 1, Sol = 2, e assim por diante¹⁷⁸. Portanto, as distâncias dos vários planetas à Terra obedeceriam às seguintes proporções:

¹⁷³ Platão, *Timaeus* 38c-d; Heath, *Aristarchus*, 165.

¹⁷⁴ Cornford, 110.

¹⁷⁵ Platão, *Timeu* 38D. Cornford, 105-107.

¹⁷⁶ Heath, *Aristarchus*, 164.

¹⁷⁷ Cornford, F. M. *Plato's Cosmology*, 1956, p. 79.

¹⁷⁸ Cornford, 79.

Número	2	3	4	5	6	7	8
Planeta	Saturno	Júpiter	Marte	Mercúrio	Vênus	Sol	Lua
Distância	27	9	8	4	3	2	1

Deve-se notar que essa interpretação entra em contradição com o texto da *República*, segundo o qual a casca mais espessa seria a da esfera das estrelas fixas e, em segundo lugar, a da sexta esfera (Vênus), e em terceiro lugar a da quarta esfera (Marte). As outras interpretações do *Timeu* também são difíceis de conciliar com a *República*, sob este aspecto.

Chalcidius, relaciona a distância Terra – Lua com o primeiro número da série, 1; o segundo número da série, 2, é relacionado à distância Lua – Sol (e não à distância Terra – Sol). Nessa nova proposição, os raios sucessivos dos sete planetas conhecidos se relacionam aos números: 1, $1 + 2 = 3$, $1 + 2 + 3 = 6$, e assim por diante. Por outro lado, Macrobius diz que os platônicos relacionaram as distâncias dos planetas à Terra, tomando como unidade a distância Terra-Lua, e encontraram o seguinte: distância Terra-Sol, $1 \times 2 = 2$; distância Terra-Vênus, $1 \times 2 \times 3 = 6$; distância Terra-Mercúrio, $6 \times 4 = 24$; distância Terra-Marte, $24 \times 9 = 216$; distância Terra-Júpiter, $216 \times 8 = 1.728$; e a distância Terra-Saturno, $1.728 \times 27 = 46.656$ (curiosamente, neste arranjo, o número 9 vem antes do 8)¹⁷⁹.

Embora Platão tenha procurado descrever as distâncias entre os planetas e a Terra utilizando números inteiros – o que lembra o pensamento pitagórico, deve-se notar (como apontado por Francis Cornford) que os números utilizados não parecem estar relacionados à doutrina da harmonia musical, pois a sequência 1, 2, 3, 4, 8, 9, 27 não forma uma escala musical¹⁸⁰. Através de uma interpretação mais detalhada do texto de Platão, no entanto, Cornford mostrou que é possível interpolar entre os números 1, 2, 4, 8 e 1, 3, 9, 27 as médias aritméticas e harmônicas dos termos sucessivos, e que isso introduz frações correspondentes

¹⁷⁹ Heath, *Aristarchus of Samos: The Ancient Copernicus*, 1981, p. 164.

¹⁸⁰ Francis MacDonald Cornford, *Plato's Cosmology* (London: Routledge and Kegan Paul, 1952), 66-70.

à escala musical¹⁸¹. Platão não menciona, no *Timeu*, a idéia da música celeste, mas como essa é uma concepção pitagórica importante, e Timeu era um pitagórico, é plausível que a base desse esquema numérico fosse a busca de uma harmonia musical para os astros.

De acordo com o *Timeu*, parece que Platão não conhecia os períodos dos movimentos de todos os planetas, pois o texto afirma:

O mês acontece quando a Lua completa seu ciclo e ultrapassa o Sol. O ano, quando o Sol deu uma volta em seu próprio círculo. Os períodos dos outros não foram observados pelos homens, exceto alguns; e não lhes foram dados nomes, nem são comparados entre si através de cálculos numéricos¹⁸².

Platão parece não se interessar muito, também, pelos aspectos mais técnicos da astronomia matemática, ou sentir-se incapaz de escrever sobre isso, pois afirma no *Timeu*:

Descrever as evoluções na dança desses deuses [os astros], suas justaposições, as contra-revoluções de seus círculos relativamente um ao outro, e seus avanços; contar quais dos deuses se alinham um com o outro em suas conjunções, e quais em oposição, e em que ordem eles passam em frente ou atrás um do outro, e em que períodos de tempo eles se ocultam de nossa visão, e reaparecendo novamente produzem nos homens que não sabem calcular um terror pânico e presságios de coisas futuras – descrever tudo isso sem modelos visíveis deles seria um trabalho vão. Assim, isto [que foi apresentado] deve bastar sobre esse assunto, e aqui vamos deixar que termine nossa descrição sobre a natureza dos deuses visíveis e gerados¹⁸³.

¹⁸¹ Cornford, 71-72.

¹⁸² Platão, *Timeu* 39C. Cornford, 116.

¹⁸³ Platão, *Timeu* 40C-D. Cornford, 135.

2.9 A ORDEM DE DISTÂNCIAS DOS PLANETAS À TERRA

Platão procurava indicar quais os astros mais próximos e quais os mais distantes do centro do universo, e até mesmo tentava determinar suas distâncias relativas. Que critério poderia ser utilizado, naquela época, para se tentar estimar essas distâncias?

Sabe-se que essa era uma preocupação existente também em outros povos. Nos textos cuneiformes do período Selêucida (século II a.C.) os planetas aparecem na seguinte ordem¹⁸⁴:

Júpiter – Vênus – Mercúrio – Saturno – Marte

Não se sabe, no entanto, em quê se baseava essa ordem.

Não existiam ainda métodos para medir as distâncias dos astros. Era possível utilizar apenas um tipo de fenômeno para determinar quais estavam mais próximos e quais estavam mais distantes: eclipses e ocultações. A partir do instante em que se compreendeu que os eclipses solares eram produzidos pela passagem da Lua entre a Terra e o Sol (interpretação aceita por Anaxágoras e Empédocles)¹⁸⁵, tornou-se claro que a Lua está mais próxima de nós do que o Sol. Se fosse possível observar algum astro passando na frente da Lua ou sendo ocultado pela Lua, seria igualmente possível estabelecer que ele está mais próximo ou mais distante do que a Lua.

Consta que Aristóteles teria observado uma ocultação do planeta Marte pela Lua, portanto a Lua deveria se encontrar mais próxima da Terra do que Marte.¹⁸⁶

[...], vimos a Lua , em seu quarto, passar por baixo de Ares¹⁸⁷ e este se ocultando pelo (lado) escuro da Lua, saindo pelo lado iluminado. Relatos semelhantes de outros astros foram dados por egípcios e babilônios, [...]

¹⁸⁴ Neugebauer, 168-169.

¹⁸⁵ Pedersen, 34.

¹⁸⁶ Aristóteles, *Acerca del Cielo*, livro II, Cap. 12, 292^a 5 - 9.

¹⁸⁷ Ares em grego significa o planeta Marte.

Não sabemos, no entanto, se esse tipo de fenômeno era conhecido no mundo grego antes de Aristóteles.

Outro tipo de critério (indireto) utilizado por Platão era a diferença entre as velocidades dos diversos astros. Os planetas eram ordenados através da observação de seus períodos siderais.

O período sideral representa o intervalo de tempo empregado por um planeta em fazer duas passagens consecutivas pela mesma região do zodíaco. O período sideral da Lua era de aproximadamente um mês. Os períodos siderais do Sol, Mercúrio e Vênus (medidos em relação a Terra) são praticamente iguais entre si (1 ano), o de Marte 2 anos aproximadamente, o de Júpiter de 12 anos e o de Saturno 30 anos¹⁸⁸. A Lua está mais próxima de nós do que o Sol e percorre o zodíaco mais rapidamente do que ele¹⁸⁹; isso pode ter sugerido uma regra geral, de que os astros que percorrem o zodíaco mais rapidamente estão mais próximos de nós, e os mais lentos estão mais distantes. Assim, o mais distante de todos seria Saturno, depois Júpiter, depois Marte.

No entanto, esse critério não permitia determinar as posições de Mercúrio e Vênus, já que esses planetas demoravam um ano (como o Sol) para percorrer o zodíaco. Estariam mais próximos ou mais distantes da Terra do que o Sol? Era necessário algum outro critério, além das comparações de seus períodos siderais, para estabelecer a ordem desses astros. Por isso, surgiram diferentes opiniões com relação às posições de Mercúrio e Vênus.

A idéia de que os planetas que se movem mais lentamente são os mais distantes aparece nas mesmas obras¹⁹⁰.

Para resumir: quando cada um desses seres que deveriam se unir para produzir o Tempo adquiriu um movimento que lhe era adequado e, como corpos unidos a ligações vivas, tornaram-se criaturas vivas e aprenderam as tarefas que lhes foram designadas, ele começaram a

¹⁸⁸ Sedeño, E. P. *El Rumor de las Estrllas: Teoría y Experiencia en la Astronomía Grega*, 1986, p. 14.

¹⁸⁹ Kuhn, T. S. *A Revolução Copernicana*, 1990, p. 72.

¹⁹⁰ Platão, *República* 617A-B; *Timeu* 39A. Vlastos, 99.

girar com o movimento do Diferente, que era torto, cruzando o movimento do Mesmo e sujeito a ele. Alguns movendo-se em círculos maiores, outros em menores; os dos círculos menores se movendo mais rapidamente, os dos maiores mais lentamente.

Assim, por causa do movimento do Mesmo, os que giram mais rapidamente parecem ser ultrapassados pelos mais lentos, embora os estejam ultrapassando na realidade. Pois o movimento do Mesmo, que dá a todos seus círculos uma volta espiralada porque possuem dois movimentos distintos em sentidos diferentes, faz com que o corpo que se afasta mais lentamente dele [do Mesmo] – o mais rápido dos movimentos – parecer manter uma velocidade próxima dele¹⁹¹.

Não se sabe se na Antigüidade algum autor interpretava esse princípio como uma proporcionalidade simples entre distância e período, mas na Idade Média houve pensadores, como Martianus Capella, que utilizaram o princípio dessa forma:

Alguém irá duvidar que a órbita do Sol é 12 vezes maior do que a da Lua, se a última completa sua órbita em um mês e o primeiro em um ano? Descobre-se então que a órbita de Marte é 24 vezes maior [do que a da Lua]¹⁹², a de Júpiter é 144 vezes maior, e a de Saturno 336 vezes maior.¹⁹³

Sob o ponto de vista puramente observacional, os planetas, o Sol e a Lua “ficam para trás”, e se movem mais lentamente do que as estrelas. Todos dão uma volta completa em torno da Terra em aproximadamente um dia, mas quando as estrelas retornam à mesma posição anterior, a Lua é vista em uma posição diferente, como se tivesse ficado para trás aproximadamente 12 ou 13°. Alguns pensadores interpretavam esse fenômeno como um mero retardamento, no

¹⁹¹ Platão, *Timeu* 38E-39B. Cornford, 112.

¹⁹² Porque Marte tem um período de aproximadamente 2 anos = 24 meses.

¹⁹³ Martianus Capella, *The Marriage of Philology and Mercury* (New York: Columbia University Press, 1977), 335.

sentido seguinte. A Terra está parada, no centro do universo, e a esfera de estrelas gira com grande velocidade, afastada da Terra. Os planetas são arrastados pela rotação da esfera das estrelas, mas como estão mais próximos da Terra, possuem também uma tendência a ficar em repouso (o que poderia ser atribuído à Terra, ou a um enfraquecimento do poder das estrelas). O resultado seria que os planetas mais próximos da Terra são menos arrastados pelo movimento da esfera de estrelas (e portanto possuem menor velocidade em relação à Terra) e os mais distantes são mais facilmente arrastados pela esfera de estrelas (possuindo por isso maior velocidade em relação à Terra). Lucrécio atribuiu essa concepção a Demócrito:

Quanto mais próximos os diferentes astros estão da Terra, mais dificilmente eles são transportados pela rotação do céu; pois a velocidade de sua força, diz ele [Demócrito], se perde e a intensidade diminui nas partes inferiores, e por isso o Sol é gradualmente deixado para trás pelos signos, porque ele está muito abaixo dos signos flamejantes. A Lua mais do que o Sol: quando mais baixo é seu caminho e mais distante do céu, e quanto mais próxima ela fica da Terra, menos ela pode manter o passo dos signos. Pois o turbilhão em que ela é transportada é mais fraco, já que ela está abaixo do Sol, e por isso todos os signos em volta a ultrapassam. Portanto ela parece voltar a cada signo rapidamente, porque os signos caminham mais depressa do que ela¹⁹⁴.

Platão adotou uma interpretação oposta a essa. Admitindo os mesmos fatos observacionais, ele considera que os planetas mais próximos à Terra possuem a maior velocidade (em relação às estrelas).

¹⁹⁴ Lucretius, *De Rerum Natura*, livro V, 621 e seguintes. Cornford, 113.

De acordo com Alexandre de Aphrodisias, em seu comentário sobre a *Metafísica* de Aristóteles, foram os pitagóricos que utilizaram pela primeira vez esse tipo de princípio¹⁹⁵:

Eles [os pitagóricos] disseram que os corpos que giram em torno do centro possuem suas distâncias em proporção, e alguns giram mais rapidamente, outros mais lentamente, e ao fazer esses movimentos os mais lentos fazem o som mais grave, e mais alto no caso dos mais rápidos. Esses sons, então, que dependem da razão de suas distâncias, produzem um efeito harmonioso quando combinados [...]. Assim, sendo a distância do Sol à Terra o dobro da distância à Lua, a de Aphrodite [Vênus] o triplo e a de Hermes [Mercúrio] quádrupla, eles consideraram que haveria também alguma razão aritmética no caso dos outros planetas, e que o movimento no céu é harmonioso. Disseram que os corpos que se movem à maior distância são os que se movem mais rapidamente, e que os que se movem mais devagar estão à menor distância, e que os corpos a distâncias intermediárias se movem a velocidades correspondentes aos tamanhos de seus orbes.

Nesta citação, encontra-se a idéia de que os astros mais próximos da Terra são os que se movem mais lentamente. Nesse caso, interpreta-se essa passagem no sentido de que as velocidades são referentes à Terra, e não à esfera de estrelas fixas, e o significado seria o seguinte: a esfera das estrelas fixas gira de leste para oeste mais rapidamente do que os planetas (o que é o mesmo que afirmar que os planetas giram de oeste para leste em relação à esfera das estrelas). O astro que se atrasa mais, comparado às estrelas, é a Lua; pode-se dizer que a Lua tem o movimento mais lento (em relação à Terra) ou mais rápido (em relação às estrelas).

¹⁹⁵ M. R. Cohen, I. E. Drabkin, *A Source Book in Greek Science* (New York: McGraw-Hill, 1948), 96.

Note-se que os pitagóricos a que Alexandre se refere utilizavam a ordem Lua – Sol – Vênus – Mercúrio, e segundo o mesmo autor atribuíam distâncias equivalentes às indicadas por Platão no *Timeu*.

William Stahl, em sua tradução do comentário de Macrobius ao “Sonho de Cipião”¹⁹⁶, indica que Platão, Aristóteles e Crísipo adotavam a ordem:

Lua – Sol – Vênus – Mercúrio – Marte – Júpiter – Saturno

Eratóstenes inverteu a ordem de Mercúrio e Vênus, utilizando portanto a seqüência:

Lua – Sol – Mercúrio – Vênus – Marte – Júpiter – Saturno

Proclus atribuiu aos “Caldeus” a idéia de que o Sol é o astro que está no meio dos céus, no sentido de que três astros estão abaixo dele (Lua, Mercúrio e Vênus) e três estão acima (Marte, Júpiter, Saturno):

Sei muito bem que alguns astrônomos disseram que o Sol estava no meio dos planetas, embora eles não o tenham demonstrado a partir de premissas seguras. [...] No entanto, como aprendi dos Teurgos dos Caldeus¹⁹⁷ que “*Deus intercalou o Sol entre os sete e fez com que as outras seis esferas planetárias dependessem dele*”, e dos próprios deuses¹⁹⁸ que “*Deus fixou o fogo solar no local do coração*”, e como temo, segundo diz Ibycus, “ganhar honra por parte dos homens em troca de uma falta para com os deuses”, como foi dito por Sócrates, eu me conformo àquilo que foi revelado pelos deuses, declarando no entanto que Platão concordava nesse ponto com a astronomia de seu tempo¹⁹⁹.

Essa seqüência, que coloca Mercúrio e Vênus abaixo do Sol, parece ter se tornado mais popular a partir do século II a.C.

Lua – Mercúrio – Vênus – Sol – Marte – Júpiter – Saturno

¹⁹⁶ Macrobius, 162, nota 1.

¹⁹⁷ Proclus se refere aos dois Julianos conhecidos por Suidas.

¹⁹⁸ Aqui, Proclus se refere aos oráculos, que eram considerados revelações diretas dos deuses.

¹⁹⁹ Proclus, *Commentaire sur la République* (Paris: J. Vrin, 1970), dissert. XVI, 220.8-20; vol. 3, 172-173.

Ela foi adotada por Cícero no “Sonho de Cipião”, por Geminus, por Cleomedes, Vitruvius e Ptolomeu²⁰⁰.

Após o século II a.C., essa ordem dos corpos celestes se tornou a mais popular. Passaria, assim, às gerações futuras, mais pela notoriedade alcançada por Ptolomeu, do que por argumentos claros sobre a posição desses planetas²⁰¹.

²⁰⁰ Dreyer, 1953, p. 168.

²⁰¹ Ibid., 1997, p. 75; Kuhn, 1980, p. 74.

3 – O modelo das esferas homocêntricas à Terra

3.1 INTRODUÇÃO

O movimento aparentemente irregular dos planetas, contrastado com o movimento regular das estrelas fixas, parecia estranho e incompreensível a muitos autores antigos. Aratos de Soloi (c. 310-245 a.C.) manifestou essa visão em uma obra em que descreveu as constelações e seus movimentos, mas não incluiu os movimentos dos planetas, comentando apenas:

Tais são as constelações que, ao preço de observações noturnas e por teu desejo de conhecer a fundo o movimento eterno do universo, verás traçarem no céu sua revolução regular. Mas as cinco estrelas que se deslocam incessantemente ao longo do círculo dos doze signos não poderiam ser indicadas por um método semelhante, pois os vestígios de suas trajetórias, uma vez impressos no espaço, não se repetem sempre idênticos a eles mesmos. Assim é: elas preferem vagar de forma errática através das nuvens celestes e percorrer com um movimento variado seus próprios orbes. [...] Quanto a mim, eu não conseguiria desenredar seus caminhos tortuosos; mas aqueles [astros] que sempre giram em orbes fixos, assim como nos grandes círculos, esses nós revelaremos ao mundo.²⁰²

A idéia de movimentos erráticos era no entanto incompatível com a visão de universo da época, e por isso Aratos chegou a propor que se abandonasse o nome de “planetas” (isto é, de “errantes”):

Agora eu vou abordar as órbitas dos planetas. Seus movimentos não são errantes – pois seus caminhos são definidos, do mesmo

²⁰² Aratos, na tradução de Cícero, em: Marcus Tullius Cicerus, *Aratea, Fragments Poétiques* (Paris: Belles Lettres, 1993), 179-180.

modo que o do Sol, e não admitem nenhum erro – mas, como seu comportamento peculiar confunde as mentes dos mortais, eu os chamarei ‘corpos que confundem’ (*planontes*), como Aratus declara, e não ‘corpos errantes’ (*planetae*)²⁰³.

A partir de fontes indiretas, diz-se que Platão estimulava seus estudantes a encontrar quais seriam os movimentos ordenados e uniformes pelos quais os movimentos aparentes dos planetas podem ser explicados²⁰⁴. Se essa atribuição é correta, Platão teria lançado as bases do método astronômico grego, que utilizava movimentos circulares uniformes para tentar explicar as irregularidades dos movimentos dos planetas.

Sabia-se, antes de Platão, que as velocidades dos planetas não são constantes. No entanto, a existência de movimentos irregulares no mundo celeste parecia algo inadmissível para muitos pensadores gregos.

O universo era concebido como um cosmos, isto é, como um sistema harmonioso, ordenado, perfeito, e nesse tipo de sistema não deveriam existir irregularidades ou imperfeições. Deveria ser possível explicar as aparentes irregularidades dos movimentos celestes como sendo meras aparências, através de um modelo astronômico que utilizasse apenas movimentos regulares.

De acordo com Geminus, foram os pitagóricos que propuseram a busca de explicações dessas irregularidades a partir de combinações de movimentos regulares:

Toda a astronomia repousa sobre a hipótese de que o Sol, a Lua e os cinco planetas se deslocam com velocidades constantes, seguindo um movimento circular, contrário ao do universo. Os pitagóricos, que foram os primeiros a abordar esse tipo de pesquisa, partiram da hipótese de que os movimentos do Sol, da Lua e dos 5 planetas eram circulares e regulares. Eles não admitiram em objetos eternos e

²⁰³ Martianus Capella, *The Marriage of Philology and Mercury* (New York: Columbia University Press, 1977), 331.

²⁰⁴ A fonte dessa informação é Simplicius, citando Sosigenes, que por sua vez teria obtido a informação a partir de Eudemos. Heath, *Aristarchus*, 140.

divinos uma desordem que tornaria seu movimento às vezes mais rápido, às vezes mais lento, às vezes até interrompido (aquilo que se chamam de paradas, para os 5 planetas). De fato, mesmo no caso de um homem bem nascido, de hábitos regulares, não se poderia admitir uma tal irregularidade de movimento nos deslocamentos. São as contrariedades da existência que geralmente causam neste mundo inferior a lentidão ou a rapidez. Mas, quando se trata dos astros, cuja natureza é incorruptível, não se pode invocar nenhuma causa de rapidez ou lentidão. É por isso que surgiu a questão de como dar conta dos fenômenos por meio de movimentos circulares e regulares²⁰⁵.

Segundo outros autores (como Simplicio), foi Platão (e não os pitagóricos) quem pela primeira vez colocou essa questão²⁰⁶:

Retomando o que já disse, Platão impôs aos movimentos dos corpos celestes a obrigação de serem circulares, uniformes e regulares, propondo aos matemáticos o seguinte problema: quais são as hipóteses que, por movimentos uniformes, circulares e regulares, poderão salvar os fatos observados para os planetas?

Platão, então, teria feito o desafio a todos os astrônomos: Como seria possível explicar o complicado movimento de qualquer planeta com uma combinação de movimentos circulares e uniformes?²⁰⁷.

Não se sabe quem propôs pela primeira vez esse problema; parece claro, no entanto, que não houve tentativas de solucioná-lo antes de Platão, e a primeira

²⁰⁵ Geminus, *Introduction aux Phénomènes* (Paris: Belles Lettres, 1975), 5.

²⁰⁶ Simplicio, Comentário ao "Sobre o céu" de Aristóteles, 493 H. Ver Autolycos de Pitane, *La Sphère en Mouvement. Levers et Couchers Héliques. Testimonia* (Paris: Belles Lettres, 1979), 160.

²⁰⁷ Michael J. Crowe, *Theories of the World from Antiquity to the Copernican Revolution* (New York: Dover, 1990), 23.

proposta de solução do problema parece ter sido proposta por Eudoxo, um matemático cerca de 20 anos mais jovem do que Platão.

3.2 EUDOXO

Eudoxo nasceu em Cnido, na Ásia Menor, aproximadamente, em 408 a.C., e morreu com 53 anos. Conta-se que com a idade de vinte e três foi para Atenas e lá assistiu a algumas palestras de Platão, mas durante pouco tempo²⁰⁸ – sendo por isso inadequado chamá-lo de “discípulo de Platão”, como se costuma. Há notícias de que ele fez viagens à Itália e Sicília, e aproximadamente aos 30 anos de idade teria viajado para o Egito, onde permaneceria mais de um ano. Lá ele teria adquirido, com os sacerdotes de Heliópolis, conhecimentos sobre o movimento dos planetas, além de realizar observações²⁰⁹. Schiaparelli supõe que Eudoxo trouxe do Egito seu conhecimento dos períodos dos movimentos planetários²¹⁰.

Grande parte da teoria das proporções utilizada por Euclides, no quinto livro de sua obra *Elementos* (c. 300 a.C.), é devida a Eudoxo. Além disso, com seu “método de exaustão”, resolveu muitos problemas de cálculo de áreas e volumes que hoje são resolvidos pelo cálculo integral²¹¹. Ele foi, assim, um dos grandes matemáticos da Antiguidade.

Eudoxo também é conhecido como um dos primeiros astrônomos a propor um ciclo solar de quatro anos: três de 365 dias e um de 366 dias. Trezentos anos depois, essa proposta de Eudoxo seria utilizada por Júlio César ao estabelecer o calendário Juliano.²¹²

Seus escritos se perderam, mas aparentemente ele escreveu uma obra sobre espelhos e outra sobre fenômenos astronômicos²¹³. A contribuição astronômica

²⁰⁸ Heath, *Aristarchus*, 191-192.

²⁰⁹ Dreyer, 87-88.

²¹⁰ Giovanni Schiaparelli, *Scritti sulla Storia della Astronomia Antica*. Parte prima: scritti editi (Bologna: Nicola Zanichelli, 1926), vol. 2, 13.

²¹¹ Heath, 191.

²¹² Dreyer, 88-89.

²¹³ Heath, 192.

mais importante de Eudoxo é teórica: trata-se de uma teoria sobre o movimento dos planetas que tenta explicar as irregularidades aparentes como resultado de uma combinação de movimentos circulares uniformes – ou seja, o problema que teria sido proposto por Platão. Eudoxo propôs uma teoria segundo a qual os movimentos celestes seriam explicados pela composição de rotações uniformes de cascas esféricas encaixadas uma dentro das outras – tentando explicar, por esse modelo, as irregularidades aparentes dos movimentos dos astros.

Seu modelo é um engenhoso sistema cosmológico para o Universo conhecido, utilizando esferas homocêntricas à Terra, que daria conta da maioria dos problemas encontrados na Astronomia naquela época e até muito depois da época em que viveu.²¹⁴

As descrições mais antigas conhecidas do sistema de Eudoxo estão presentes nos escritos de Aristóteles. Porém, tais descrições não são muito detalhadas. O relato mais completo conhecido do modelo de Eudoxo foi escrito vários séculos depois, por Simplicius, em seu comentário ao *De Caelo* de Aristóteles²¹⁵. Foi apenas no final do século XIX que o astrônomo Giovanni Schiaparelli fez uma análise detalhada do modelo de Eudoxo sob o ponto de vista geométrico, permitindo compreender-se os aspectos técnicos de seu trabalho. Uma análise mais recente, desenvolvida por R. C. Riddell, procurou mostrar como os trabalhos matemáticos atribuídos a Eudoxo estão integrados à sua teoria astronômica²¹⁶.

3.3 OS PRINCÍPIOS DA TEORIA DE EUDOXO

A teoria de Eudoxo tinha o objetivo de explicar os movimentos dos astros e, portanto, devia se basear nos conhecimentos observacionais da época.

Considerar que as estrelas fixas pertencem a uma grande esfera que realiza um movimento de rotação uniforme, em torno de seu eixo, que passa pelos pólos celestes e pelo centro da Terra, é um princípio fundamental já aceito na época de

²¹⁴ Thomas S. Kuhn, *A Revolução Copernicana* (Lisboa: Edições 70, 1990), 76.

²¹⁵ Heath, *Aristarchus*, 193.

²¹⁶ R. C. Riddell, "Eudoxan Mathematics and the Eudoxan Spheres," *Archive for the History of Exact Sciences* **20** (1979): 1-19.

Eudoxo. O movimento dessa esfera faz com que as estrelas nasçam do lado Leste, descrevam uma trajetória circular, em torno desse eixo, até se ocultarem do lado Oeste. No caso das estrelas circumpolares, a trajetória circular inteira é visível; no caso de estrelas distantes dos pólos, apenas uma parte da trajetória é visível.

Aparentemente Eudoxo pensava que o pólo celeste norte coincidia com a posição de uma estrela²¹⁷, mas foi criticado por Hiparco:

A respeito do pólo norte, Eudoxo está enganado, pois ele diz: “Existe uma certa estrela que permanece sempre no mesmo ponto; esta estrela é o pólo do universo”, mas o fato é que no pólo não existe nenhuma estrela, mas existe um espaço vazio que tem três estrelas próximas a ele, as quais formam um quadrado com o ponto do pólo, como Piteas de Massala também afirma.²¹⁸

Considerar a Terra localizada no centro dessa esfera que contém as estrelas, é mais um dos princípios fundamentais assumidos por Eudoxo. Na época de Eudoxo (e também na nossa) não se observava, a simples vista, nenhuma paralaxe estelar ou qualquer variação no brilho das estrelas, concluindo-se, portanto, que se encontram todas à mesma distância da Terra. Um fragmento de Eudoxo explicita esse ponto:

Há no mundo dois pólos, ao redor dos quais (a esfera das estrelas fixas) gira. A Terra, que tem forma esférica, está situada no meio do mundo que é igualmente esférico, e os pólos ao redor dos quais gira o mundo estão imóveis. Com efeito, se o pólo subisse ou descesse, as Ursas apareceriam e desapareceriam, mas isso não acontece; se o pólo se deslocasse para o Leste ou para Oeste, os astros fixos não apareceriam nos mesmos pontos da Terra; mas sempre aparecem

²¹⁷ Um dos pólos dessa esfera, observado por Eudoxo, estava muito próximo da estrela conhecida em nossos dias: a Poláris.

²¹⁸ Hiparco, *Sobre os Fenômenos de Aratos e Eudoxo*, traduzido em Heath, *Greek Astronomy*, 119.

nos mesmos pontos. Portanto, o mundo dá volta em redor dos pólos imóveis.²¹⁹

Também o Sol e a Lua se movimentam de Leste para Oeste, em relação ao observador terrestre; entretanto, em relação às estrelas, ambos os astros se deslocam no sentido inverso (de Oeste para Leste), seguindo um caminho inclinado.

A teoria de Eudoxo pode ter sido sugerida a partir do estudo dos movimentos do Sol e da Lua. Esses dois astros dão uma volta em torno da Terra em um dia, como as estrelas; e além disso possuem outros movimentos, diferentes deste. Pode-se descrever o movimento do Sol (ou da Lua) em relação às estrelas, em primeira aproximação, supondo-se que eles são movidos por esferas cujos eixos são inclinados em relação ao eixo da esfera das estrelas. Podia-se, assim, supor que esses astros eram movidos por esferas que, por sua vez, estavam presas em uma outra esfera (a das estrelas), para explicar os movimentos observados²²⁰.

Seja partindo do estudo do Sol e da Lua, ou por algum outro caminho desconhecido, Eudoxo percebeu que era possível, utilizando arranjos de esferas encaixadas em outras esferas, explicar os principais fenômenos dos movimentos dos planetas.

Os movimentos dos planetas são mais complicados. Em relação a um observador localizado na superfície terrestre, os planetas se deslocam diariamente de Leste para Oeste. Contudo, em relação às estrelas fixas, não só se movimentam de Oeste para Leste (como o Sol e a Lua), como em certos dias estacionam, invertendo seus movimentos para Oeste (em relação às estrelas) e, após um certo tempo, estacionam novamente, retomando seus movimentos para Leste. Nesse movimento complicado em relação às estrelas e não se afastando muito da eclíptica²²¹, algumas vezes se deslocam para o Norte e outras vezes para o Sul.²²²

²¹⁹ Eulalia Pérez Sedeño, *El Rumor de las Estrellas: Teoría y Experiencia en la Astronomía Grega* (Madrid: Siglo XXI de España Editores, 1986), 72.

²²⁰ Neugebauer, 153.

²²¹ A eclíptica representa a trajetória do Sol através do Zodíaco e, certamente, essa palavra se relacione com a região do céu onde ocorrem os eclipses.

Para Eudoxo, que seguia o ideal platônico, mesmo que um planeta apresente uma trajetória difícil de se explicar, em relação às estrelas fixas, ainda assim, seu movimento deveria ser uma combinação de movimentos circulares e uniformes. Então, representar o movimento dos planetas, do Sol e da Lua, por combinações de movimentos circulares e uniformes era outro princípio fundamental da teoria de Eudoxo. Assim, se a Terra se encontra no centro da esfera das estrelas fixas nada mais simples que fazê-la o centro de outras esferas que transportassem, também, os planetas.²²³ Eudoxo imaginou

[...] que todo corpo celeste era transportado em círculo por uma esfera que girava sobre dois pólos e que estava dotada de rotação uniforme; supôs, também, que o astro se encontrava em um ponto do equador desta esfera, de modo que descreverá, durante a rotação, um círculo máximo, posto em um plano perpendicular ao eixo de rotação da mesma.²²⁴

3.4 O CONJUNTO DE ESFERAS

A idéia básica utilizada por Eudoxo foi a de utilizar apenas movimentos circulares uniformes em torno do centro do universo (isto é, em torno da Terra) e através de sua combinação tentar explicar todas as irregularidades aparentes dos movimentos dos astros. As esferas eram de diferentes tamanhos, encaixadas umas nas outras. Seus eixos eram inclinados entre si, cada esfera tendo seus pólos fixados na esfera imediatamente superior. As esferas seriam invisíveis, e cada planeta estaria preso a um ponto do equador de uma certa esfera; algumas esferas não teriam nada visível preso às mesmas.

²²² Eulalia Pérez Sedeño, *El Rumor de las Estrellas: Teoría y Experiencia en la Astronomía Grega* (Madrid: Siglo XXI de España Editores, 1986), 71.

²²³ Ibid., 72.

²²⁴ Giovanni Schiaparelli, "Le Sfere Omocentriche di Eudosso, di Callipo e di Aristote," *Memorie del Reale Istituto Lombardo*, 1874; reinpresso em Giovanni Schiaparelli, *Scritti sulla Storia della Astronomia Antica*. Parte prima: scritti editi (Bologna: Nicola Zanichelli, 1926), 17. Ver também Sedeño, 73.

Com uma única esfera, homocêntrica à Terra, e girando em torno do eixo celeste em, aproximadamente, 24h, Eudoxo conseguia explicar somente o movimento das estrelas fixas. Os outros movimentos mais simples (do Sol e da Lua), que não possuem retrogradações, poderiam ser explicados por três esferas (para cada um deles). No caso dos planetas, seriam necessárias mais esferas, para poder explicar as paradas e retrocessos observados.

Eudoxo assumiu que o Sol e a Lua são movidos cada um por três esferas. A primeira delas é a da estrelas fixas, a segundo se move no círculo que passa pelo meio dos signos do zodíaco [isto é, a eclíptica], enquanto o terceiro se move em torno de um círculo inclinado em relação ao círculo do zodíaco. Desses círculos oblíquos, aquele em que a Lua se move tem uma inclinação maior do que aquele em que o Sol se move. Os planetas são movidos por quatro esferas em cada caso; a primeira e a segunda dessas são como as do Sol e da Lua, a primeira sendo a esfera das estrelas fixas que carrega todas as esferas consigo, e a segunda, depois dela, sendo a esfera em torno do círculo que fica no meio dos signos do zodíaco, que é comum a todos os planetas; a terceira é em todos os casos uma esfera com seus pólos sobre o círculo no meio dos signos; a quarta se move em torno de um círculo inclinado em relação ao círculo médio [o equador] da terceira esfera; os pólos da terceira esfera são diferentes para todos os planetas exceto Aphrodite e Hermes [Vênus e Mercúrio], mas para estes dois os pólos são os mesmos.²²⁵

Esse parece ter sido o primeiro modelo geométrico do movimento dos astros a tentar explicar os retrocessos e paradas dos planetas.

Eudoxo parece não ter discutido qual a causa dos movimentos de rotação das esferas, nem como uma esfera comunica seu movimento às outras, nem a matéria de que são constituídas. Pode ser que Eudoxo estivesse propondo seu sistema como um modelo matemático abstrato, e por isso não se preocupasse

²²⁵ Aristóteles, *Metafísica*, livro XII, cap. 8, 1073b17-32; Heath, *Aristarchus*, 194.

muito com esses aspectos físicos da teoria. É possível que ele tenha discutido os tamanhos relativos das esferas²²⁶, mas a única indicação que restou foi uma informação transmitida por Arquimedes, de que o Sol seria 9 vezes maior do que a Lua e que, portanto, estaria a uma distância 9 vezes maior²²⁷.

No caso do Sol e da Lua, a esfera mais externa (a primeira), que gira como a esfera das estrelas fixas, faz com que esses astros dêem uma volta por dia em torno da Terra. A segunda esfera produz seus movimentos médios em relação à esfera das estrelas fixas, ou seja, faz com que o Sol se mova ao longo do zodíaco (uma volta em um ano) e que a Lua se mova em relação ao Sol e às estrelas (uma volta = um mês lunar). Tanto no caso do Sol quando no caso da Lua, esse tipo de modelo produziria um movimento angular uniforme em relação às estrelas, em torno do centro do universo. O terceiro círculo, no caso da Lua, faz com que ela esteja às vezes ao norte da eclíptica, e às vezes ao sul deste círculo, produzindo assim seu movimento em latitude. No caso do Sol, não compreendemos exatamente que efeito seu terceiro círculo produziria, pois o Sol se move exatamente sobre a linha da eclíptica, não tendo nenhum desvio para o norte ou para o sul²²⁸. Pode ser que esse terceiro círculo já tivesse o objetivo de explicar a variação de velocidade angular do Sol em relação à Terra ao longo do ano, pois já se sabia, na época, que os intervalos de tempo entre os solstícios e os equinócios eram diferentes uns dos outros (isso era conhecido desde os estudos de Euctêmon e Méton, já descritos), mas muitos autores supõem que a teoria de Eudoxo não tentou explicar essa variação de velocidade angular²²⁹.

Para os planetas, com seus movimentos mais complicados, em relação às estrelas fixas, houve a necessidade de quatro esferas homocêntricas à Terra. Essa quarta esfera adicional era ajustada, para cada planeta, de tal maneira a reproduzir o seu movimento retrógrado. O resultado final, do modelo de Eudoxo, era constituído por um sistema formado por vinte e sete esferas homocêntricas à Terra.²³⁰

²²⁶ Schiaparelli, *Scritti sulla Storia della Astronomia Antica*, vol. 2, 18.

²²⁷ Heath, 196.

²²⁸ Heath, *Aristarchus*, 196-200.

²²⁹ *Ibid.*, 200.

²³⁰ Crowe, 25.

Tabela 3.1: Número de esferas do universo de Eudoxo.²³¹

Para o movimento de:	Número de esferas
Estrelas	1
Saturno	4
Júpiter	4
Marte	4
Mercúrio	4
Vênus	4
Sol	3
Lua	3
Total	27

3.5 O MODELO LUNAR EUDOXIANO

Os textos clássicos nos quais aparecem descrições da Teoria de Eudoxo são: a *Metafísica* e *Sobre o Céu*, ambos de Aristóteles. Com relação à Lua, Aristóteles disse que:

[...] move-se graças a três esferas; a primeira era a esfera das estrelas fixas, a segunda se move sobre o círculo que atravessa os signos do zodíaco, enquanto a terceira se move sobre um círculo latitudinal inclinado em relação ao círculo zodiacal.²³²

Segundo Simplicio, em relação à Lua, Eudoxo afirmara que:

[...] seria movida por três esferas, porque tem três movimentos aparentes. A primeira se move como a esfera das estrelas fixas. A segunda roda em direção contrária ao redor de um eixo perpendicular

²³¹ Ibid., 25; Sambursky, 83 (Sambursky se refere a 26 esferas sem levar em conta a esfera das estrelas fixas.)

²³² *Metafísica*, livro XII (ou Λ), cap. 8, 1073^b. Ver Sedeño, 74; Crowe, 23-25.

ao plano da eclíptica, como o Sol. A terceira, já não segue o mesmo sistema que o Sol; tem a mesma posição que a terceira esfera desse sistema, mas não o mesmo movimento, sendo transportada por um movimento lento na direção contrária da segunda e na mesma direção que a primeira, ao redor de um eixo perpendicular ao plano do círculo que parece descrever o centro da Lua. Este círculo está inclinado em relação à eclíptica de um ângulo que corresponde ao maior desvio latitudinal da Lua²³³.

O modelo de Eudoxo deveria dar conta dos movimentos observados da Lua. Eudoxo, como todos os astrônomos contemporâneos e anteriores a sua época, preocupado com os problemas complicados que oferecia a confecção de um preciso calendário que não se defiasse, ao longo do tempo, em relação aos períodos das Estações, conhecia muito bem os movimentos da Lua e do Sol.

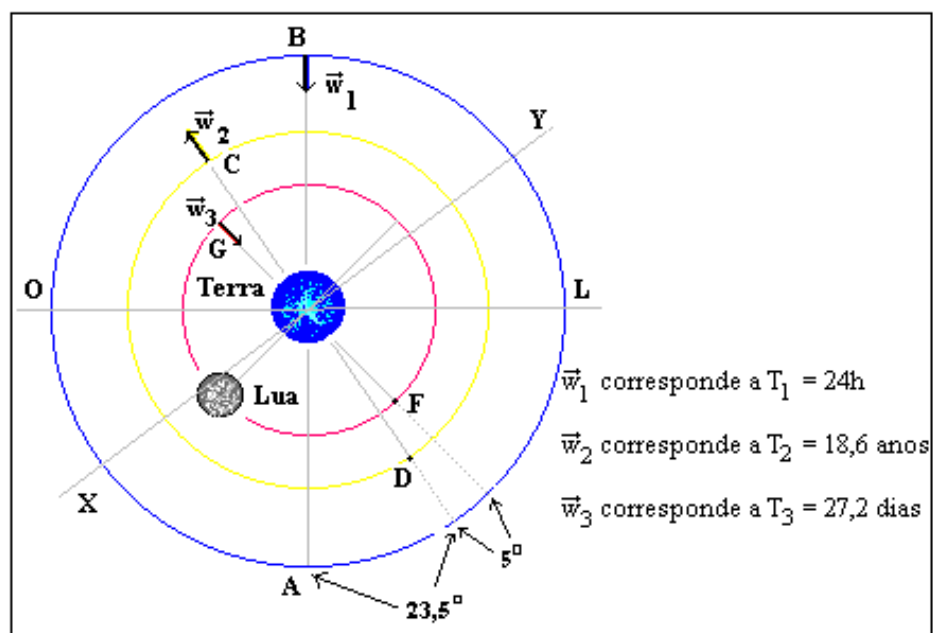


Figura 3.1: A Lua é conduzida por três esferas: a esfera mais interna, com período $T_3 = 27,2$ dias; a esfera central, com período $T_2 = 18,6$ anos, que representa o período de saros, e a

²³³ Simplicio, *In Aristotelis de Caelo Comentariorum*, editado por J. L. Heiberg (Berlín: G. Reiner, 1894), H493. Ver Sedeño, 74.

**esfera externa , com período de, aproximadamente, $T_1 = 24h$,
que produz a rotação diária.²³⁴**

Assim, através desse conhecimento, ajustaria o seu modelo aos movimentos lunares observados: a esfera mais interna, que conduz a Lua presa ao seu equador, gira, em torno do eixo FG, com velocidade angular w_3 , correspondente ao período sideral $T_3 = 27,2$ dias²³⁵; a esfera intermediária, gira, em torno do eixo CD (CD é perpendicular ao plano da eclíptica, representado na Figura 3.1 pelo segmento de reta XY), com a velocidade angular w_2 , correspondente ao período $T_2 = 18,6$ anos²³⁶; e a esfera externa, que representa a esfera das estrelas fixas, gira em torno do eixo AB, de Leste para Oeste com velocidade angular w_1 , correspondente ao período aproximado $T_1 = 24$ h.²³⁷

3.6 O MODELO SOLAR

Eudoxo também explicava o movimento do Sol conduzido por três esferas: a primeira, a mais externa, era a das estrelas fixas dando uma volta em, aproximadamente, 24 horas; a segunda se move sobre o círculo que atravessa o zodíaco, com período de 365,25 dias; e a terceira que leva o Sol em seu equador, apresenta uma pequena inclinação em relação ao círculo do zodíaco,

²³⁴ Crowe, 24; .

²³⁵ Uma melhor aproximação desse período sideral seria 27,3 dias.

²³⁶ Os pontos de interseção da órbita lunar com a eclíptica, que faz com que a Lua não alcance o mesmo ponto do zodíaco, mas retrocede em sentido contrário a esses signos, voltando a alcançar esse ponto, transcorridos 18,6 anos; é o famoso ciclo comentado no Capítulo 1. Transcorrido o ciclo, os eclipses lunares se repetem praticamente nos intervalos de tempos, pois os nodos lunares voltam a ocupar os mesmos pontos. Somente quando a Lua, o Sol e a Terra se encontram no plano da eclíptica haverá a possibilidade de se produzir um eclipse. Observe que w_3 e w_2 formam um ângulo de, aproximadamente, 5° que representa a inclinação da órbita lunar em relação ao plano da eclíptica.

²³⁷ Observe que na Figura 3.3, w_1 forma com w_2 o ângulo de $23,5^\circ$. Sedeño, 76-77; Hoskin, 35; Crowe, 23-24.

completando uma volta, também, em 365,25 dias.²³⁸ Com relação ao movimento solar, Simplicio afirma:

Eudoxo e outros autores antes que ele reconheceram que o Sol teria outros movimentos. Primeiro é levado pela esfera das estrelas não errantes de orto a ocaso. Em segundo lugar, se move por si mesmo segundo uma direção contrária ao largo dos doze signos do zodíaco. Em terceiro lugar, se desvia lateralmente do círculo que passa no meio desses signos.²³⁹

3.7 A HIPOPÉDIA E O MOVIMENTO RETRÓGRADO DE UM PLANETA

No caso dos planetas, a terceira e a quarta esferas possuem movimentos que se combinam para produzir um efeito muito especial. Essas duas esferas possuem inclinações diferentes e giram em sentidos opostos, porém com idênticas velocidades angulares. Segundo Simplicio:

A terceira esfera, que tem seus pólos no círculo maior da segunda esfera, passando pelo meio dos signos do zodíaco, e que gira do sul para o norte e do norte para o sul, carregará com ela a quarta esfera que também tem o planeta preso a ela, e produzirá o movimento do planeta em latitude. Mas não apenas a terceira esfera; pois se estivesse sobre a terceira esfera, o planeta chegaria perto dos pólos do universo; mas, como as coisas ocorrem, a quarta esfera, que se move em torno dos pólos do círculo inclinado carregando o planeta e gira em sentido oposto à terceira, isto é, de leste para oeste, mas no mesmo período, evitará qualquer divergência considerável [do planeta] em relação ao círculo do zodíaco, e fará o planeta descrever em torno desse mesmo círculo do zodíaco a curva chamada *hippopede* por Eudoxo, de modo que a espessura dessa curva será o

²³⁸ Norwood Russel Hanson, *Constelaciones y Conjecturas* (Madrid: Alianza Editorial, 1985), 65.

²³⁹ Simplicio, H492. Ver Sedeño, 84.

desvio aparente [máximo] do planeta em latitude – uma posição pela qual Eudoxo foi atacado²⁴⁰.

Schiaparelli investigou qual seria a trajetória de um planeta sujeito apenas aos movimentos da terceira e da quarta esferas, deixando de lado inicialmente os movimentos produzidos pelas outras duas. Utilizando apenas métodos geométricos da época de Eudoxo (ou seja, sem utilizar geometria analítica e trigonometria esférica) Schiaparelli mostrou que os movimentos das duas esferas internas produziram um movimento do planeta quase em forma de 8 – uma lemniscata esférica. Essa curva é a interseção de uma superfície esférica com uma superfície cilíndrica que tangencia a esfera internamente²⁴¹. O termo grego “*hippopede*” utilizado para indicar essa figura significa “caminho do cavalo”, e era uma trajetória em forma de 8 que era empregada como exercício para os cavalos²⁴². Vejamos como essa trajetória é produzida.

Eudoxo considerou um planeta P fixo no equador de uma esfera E_2 que gira em torno de seu eixo CD com velocidade angular constante w_2 , no sentido horário (ver Figura 3.2). O eixo CD dessa esfera está preso a uma segunda esfera E_1 que gira com velocidade angular w_1 , em torno de seu eixo AB e no sentido anti-horário. Sendo as velocidades angulares iguais, $w_1 = w_2$, o movimento do planeta P tem como resultado essa trajetória que se aproxima de um oito, a hipopédia.

A Figura 3.2 mostra a hipopédia produzida por um par de esferas eudoxianas. O planeta está localizado no equador da esfera E_2 , cujo eixo está inclinado em relação ao eixo da esfera E_1 . A esfera E_2 gira no sentido horário e a esfera E_1 gira no sentido anti-horário, mas essas velocidades angulares têm o mesmo módulo, $w_1 = w_2$, resultando para o movimento do planeta, uma trajetória em forma de oito. Essa trajetória do planeta pode ser interpretada como sendo interseção de uma superfície cilíndrica com as superfícies esféricas de mesmo raio.²⁴³

²⁴⁰ Heath, *Aristarchus*, 201-202.

²⁴¹ *Ibid.*, 202-203.

²⁴² Esse nome da trajetória se relaciona aos esportes de equitação, onde cavalos e cavaleiros se exibiam ao público percorrendo essas pistas em forma de oito. Sedeño, 98-107; Hoskin, 34-35; Pedersen, 66-68.

²⁴³ Sedeño, 98-107; Hoskin, 34-35; Pedersen, 66-68.

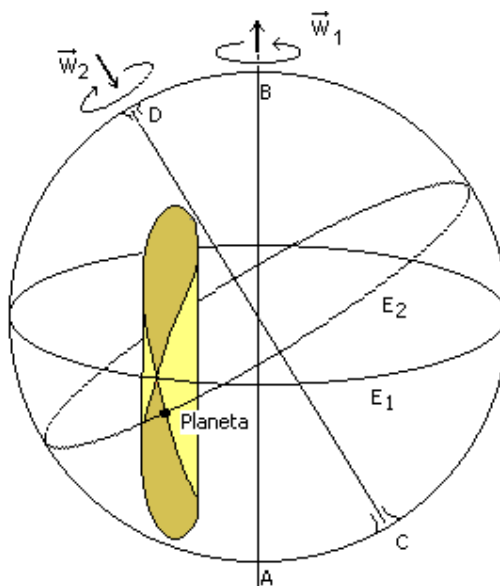


Figura 3.2: A hipopédia gerada por duas esferas eudoxianas.

As figuras 3.3 a) e 3.3 b), mostram, de uma maneira moderna, o sentido do vetor velocidade do planeta, no ponto de encontro das linhas equatoriais das esferas giratórias E_1 e E_2 , descrevendo a hipopédia da Figura 3.2.

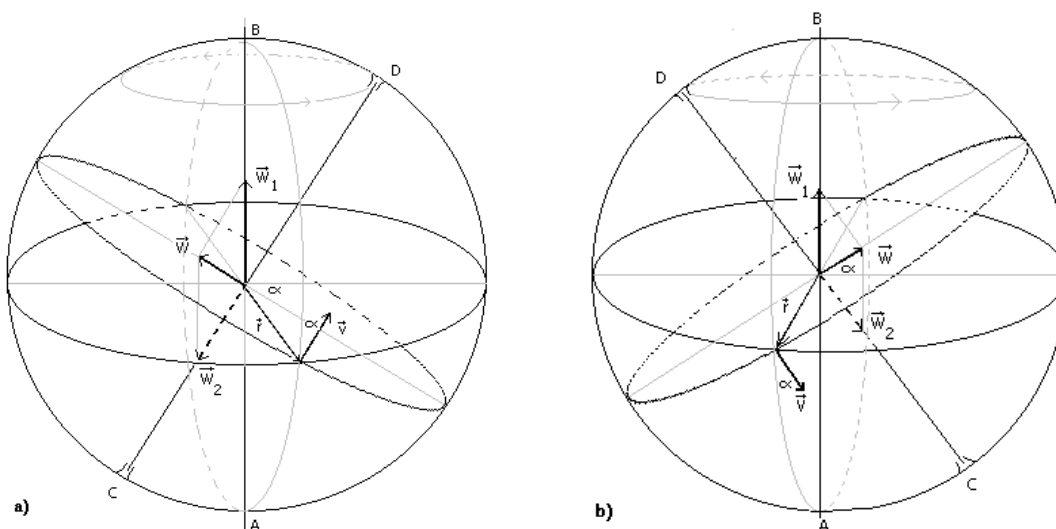


Figura 3.3: As figuras mostram a direção e sentido do vetor velocidade do planeta.

Quando o movimento do planeta ao longo da *hippopede* é combinado com o movimento da segunda esfera (que produz o deslocamento ao longo da faixa do

zodíaco), o movimento resultante apresenta idas e vindas, além de variações angulares em relação à eclíptica, reproduzindo assim de forma bastante aproximada as “laçadas”, paradas e retrocessos observados²⁴⁴. A velocidade máxima do planeta, no seu movimento direto, ocorreria quando ele passasse pelo ponto central do 8, e a velocidade máxima de retrogração ocorreria quando passasse pelo mesmo ponto, no sentido inverso.

De acordo com Simplicio, Eudoxo havia determinado os valores dos períodos dos movimentos dos vários planetas, conforme mostrado na tabela abaixo²⁴⁵:

Planeta:	Período sinódico (retrocessos)		Período sideral (zodíaco)	
	Eudoxo	Moderno	Eudoxo	Moderno
Saturno	13 meses	378 dias	30 anos	29 a 166 d
Júpiter	13 meses	399 dias	12 anos	11 a 315 d
Marte	8 m 20 d	780 dias	2 anos	1 a 322 d
Mercúrio	110 dias	116 dias	1 ano	1 ano
Vênus	19 meses	584 dias	1 ano	1 ano

Sabendo-se esses períodos e a inclinação entre os eixos da 3^a. e da 4^a. esferas, seria possível reconstituir o modelo de Eudoxo. Não se sabe o valor da inclinação que ele utilizava. Schiaparelli utilizou valores de 6° para Saturno e de 13° para Júpiter, mostrando que com esses parâmetros era possível dar conta muito bem dos movimentos de retrogradação desses planetas, pelo modelo de Eudoxo²⁴⁶.

No caso de Marte, além de haver problemas com o período sinódico utilizado por Eudoxo, Schiaparelli mostrou que o modelo não produz resultados satisfatório qualquer que seja a inclinação escolhida²⁴⁷.

No caso de Vênus e Mercúrio, como a posição média de cada um deles é igual à posição do Sol, o centro da *hippopede* coincide com o Sol. O comprimento

²⁴⁴ Heath, *Aristarchus*, 207-208.

²⁴⁵ *Ibid.*, 208.

²⁴⁶ Heath, *Aristarchus*, 208-209.

²⁴⁷ *Ibid.*, 209-210.

máximo da *hippopede* pode ser determinada sabendo-se as distâncias angulares máximas entre esses planetas e o Sol. No caso de Mercúrio, o modelo funciona bastante bem. No caso de Vênus, o modelo não produziria movimentos retrógrados, mas apenas variações da velocidade angular; além disso, haveria outros pontos problemáticos, e por isso a teoria falha, como no caso de Marte²⁴⁸.

Resumindo, a análise de Schiaparelli mostrou que para o Sol e a Lua as hipóteses de Eudoxo são razoáveis, exceto por não explicarem as variações de velocidade angular. Para Júpiter, Saturno e Mercúrio, o modelo produz uma boa explicação dos movimentos retrógrados. No caso de Vênus e Marte, o modelo não era adequado²⁴⁹.

Apesar das imperfeições do modelo de Eudoxo, deve-se enfatizar que este foi o primeiro modelo geométrico conhecido que tentou explicar alguns detalhes dos movimentos dos planetas, e que ele dá conta muito bem de alguns desses movimentos.

3.8 CÁLIPO

Eudoxo parece ter tido vários seguidores, como Menaechmos, Polemarchos e Cálipo²⁵⁰. Este último parece ter sido o principal responsável pelo aperfeiçoamento do sistema de Eudoxo.

Cálipo de Cnido (c. 370 – c.300 a.C.), trabalhando com o sistema das esferas homocêntricas à Terra, com a finalidade de melhorar a sua precisão, quanto a previsão da posição dos astros, adicionaria um número maior de esferas concêntricas ao sistema eudoxiano. Somou duas esferas ao Sol, duas à Lua e uma a cada um dos planetas Mercúrio, Vênus e Marte²⁵¹. Seu trabalho é assim descrito por Aristóteles:

²⁴⁸ *Ibid.*, 210.

²⁴⁹ Heath, *Aristarchus*, 211.

²⁵⁰ *Ibid.*, 212.

²⁵¹ Crowe, 25-26.

Cálipo concordou com Eudoxo sobre a posição atribuída às esferas, ou seja, em seu arranjo com relação às distâncias, e ele também utilizou o mesmo número de esferas que Eudoxo com relação a Zeus [Júpiter] e Kronos [Saturno] respectivamente, mas julgou ser necessário adicionar duas outras esferas no caso do Sol e da Lua, para poder explicar os fenômenos, e uma a mais a cada um dos outros planetas²⁵².

Tabela 3.2: Número de esferas do universo de Cálipo.²⁵³

Para o movimento de:	Número de esferas
Estrelas	1
Saturno	4
Júpiter	4
Marte	5
Mercúrio	5
Vênus	5
Sol	5
Lua	5
Total	34

Segundo Crowe²⁵⁴, as duas esferas adicionadas ao Sol por Cálipo davam conta da sua anomalia em longitude, descobertas cem anos antes por Méton e por Euctemon.²⁵⁵ Essa anomalia era representada pelas desigualdades dos intervalos de tempo em que os solstícios e os equinócios dividiam o ano. A duração das estações (começando com o equinócio de primavera) seria de 93, 90, 90 e 92 dias, de acordo com Euctemon. Porém, cem anos depois (aproximadamente em 330 a.C.) Cálipo corrigiu esses valores para 94, 92, 89 e

²⁵² Aristóteles, *Metafísica*, livro 12, cap. 8, 1073b32-38. Heath, *Aristarchus*, 212.

²⁵³ Ibid., 49; Crowe, 25.

²⁵⁴ Crowe, 25-26.

90 dias – resultados que concordam com cálculos atuais, com erros inferiores a $\frac{1}{2}$ dia²⁵⁶.

De acordo com Geminos, antes de Cálipo se aceitava que o ciclo de 19 anos continha 6940 dias e 235 meses lunares. No entanto, de acordo com isso, cada ano teria $6940 \text{ dias} \div 19 = 365 \text{ dias} + 5/19$. No entanto, comparando observações antigas com as de seu tempo, Cálipo concluiu que a duração do ano era de 365 dias + $\frac{1}{4}$, e por isso alterou o ciclo de 19 anos, substituindo-o por outro de 76 anos, contendo 27.759 dias e 940 meses lunares²⁵⁷.

Com as duas esferas adicionadas ao Sol, Cálipo parece ter procurado explicar essa irregularidade do movimento solar. A introdução de duas novas esferas para o Sol, de forma semelhante às duas esferas internas dos planetas do modelo original de Eudoxo, produziria uma *hippopede*. Escolhendo adequadamente os parâmetros dessas duas esferas, este movimento, combinado com o das outras esferas, produz um movimento do Sol sempre direto (sem retrogradação), mas com pequenas variações de velocidade angular, de acordo com o que se observa²⁵⁸. Não se conhecem os parâmetros utilizados por Cálipo em seu modelo, mas análises modernas indicam que ele conseguiria que os períodos obtidos teoricamente, apresentassem um erro que não superavam a metade de um dia quando comparados com os períodos observacionais²⁵⁹.

As modificações de Cálipo, adicionando duas esferas para a Lua, representavam também o seu movimento com uma precisão maior que o obtido por Meton. Para a Lua, Cálipo se utilizava de um período, que pode ser designado como "período de Cálipo", de 27,759 dias, obtido de 940 períodos sinódicos (cuja razão fornece para o período da Lua 29,53 dias). Esse resultado fornece para o período de luação, o valor de 10 segundos maior que o valor atual²⁶⁰.

²⁵⁵ Meton e Euctmon, em 432 a. C., estabeleceram a duração do ano trópico em $365 \frac{5}{19}$ dias. Ver Pedersen, 369.

²⁵⁶ Heath, *Aristarchus*, 215-216.

²⁵⁷ Ver Heath, *Greek Astronomy*, 141.

²⁵⁸ Heath, *Aristarchus*, 215-216.

²⁵⁹ Abetti, 50.

²⁶⁰ *Ibid.*, 50.

Sabe-se que as duas esferas adicionais do Sol e da Lua possuíam a finalidade de explicar as variações de velocidade angular dos mesmos, mas não há informações sobre o motivo pelo qual ele adicionou uma esfera para Vênus, Mercúrio e Marte²⁶¹. No entanto, Schiaparelli sugeriu que Cálipo havia notado que o modelo de Eudoxo não satisfazia as observações, pois nem sequer produzia movimentos retrógrados nos casos de Vênus e Marte, e que por isso ele teria notado que precisaria introduzir novas esferas. De acordo com o mesmo Schiaparelli, utilizando uma esfera adicional a principal falha desses modelos pode ser superada²⁶².

Tudo indica, portanto, que o trabalho de Cálipo tinha o objetivo central de melhorar a concordância entre a teoria e os fenômenos observados (ou seja, “salvar os fenômenos”).

3.9 ARISTÓTELES

Aristóteles (384-322 a.C.) nasceu em Estagira, na Trácia. Seu pai herdara o lugar de médico da família do rei da Macedônia. Quando tinha cerca de dezoito anos de idade, Aristóteles chegou a Atenas. Lá, passou a frequentar a Academia de Platão durante muitos anos²⁶³. Inicialmente, Aristóteles adotou as idéias do mestre, mas depois foi se distanciando de Platão em muitos aspectos.

Aristóteles não parece ter tido um conhecimento profundo de matemática ou de astronomia. Sua principal preocupação, ao estudar o mundo físico, era encontrar as causas dos fenômenos, sem a preocupação de fazer uma descrição quantitativa da natureza.

3.10 OS PRINCÍPIOS FÍSICOS

Os gregos edificaram uma Física coerente com o sistema geocêntrico: a Lua, o Sol e os planetas descrevem seus movimentos circulares em redor da Terra que

²⁶¹ Heath, 213.

²⁶² *Ibid.*, 213.

²⁶³ Pedersen, 310-311.

tem a forma esférica e está imóvel no centro do universo. Aristóteles afirmava, seguindo as idéias de Empédocles (c. 484 – c. 424 a. C.)²⁶⁴ e Platão, que todas as substâncias, encontradas na Terra, eram constituídas de terra, água, ar e fogo²⁶⁵. Esses elementos estariam associados a certos movimentos naturais simples.

De acordo com Aristóteles, os únicos movimentos simples são retilíneo e circular²⁶⁶. Os movimentos retilíneos básicos seriam os que se aproximam radialmente do centro do universo e os que se afastam radialmente do centro do universo. Comparando essas possibilidades teóricas com os movimentos espontâneos observados na natureza, Aristóteles indicou que existem movimentos retilíneos naturais, como o das pedras (para baixo) e do fogo (para cima), e identificou esses movimentos como sendo deslocamentos radiais para o centro do universo (para baixo) ou para longe do centro do universo (para cima). Cada elemento (ou corpo simples) deveria ter um desses movimentos naturais simples.

A terra é naturalmente pesada e o fogo naturalmente leve; a água e o ar são substâncias intermediárias das duas primeiras. Os movimentos naturais dos corpos formados por essas substâncias são:

- a) se um corpo é pesado, formado de terra ou água ou combinações dessas duas substâncias, ele se movimenta verticalmente para baixo;
- b) se um corpo é leve, formado por ar ou fogo, seu movimento se realiza verticalmente para cima.

Segundo Aristóteles, o movimento de um corpo pesado ou leve é retilíneo e de direção passando pelo centro da Terra e perpendicular à sua superfície²⁶⁷.

Por outro lado, Aristóteles observou que as estrelas e planetas não caem em direção à Terra e nem se afastam, nem tão pouco descrevem movimentos retilíneos. Esses corpos descrevem movimentos circulares em relação a um observador terrestre. Portanto, não poderiam ser formados nem por substâncias

²⁶⁴ Gerd, 67.

²⁶⁵ A respeito das teorias antigas sobre os elementos, ver Rosemary Wright, *Cosmology in Antiquity* (London: Routledge, 1995), capítulo 7 e Pedersen, capítulo 11.

²⁶⁶ Aristóteles, *Sobre o Céu* 268b; *Física* 261b. Wright, 152.

²⁶⁷ I. Bernard Cohen, *El Nacimiento de la Nueva Física* (Madrid: Alianza Editorial, 1989), 27.

pesadas, terra e água, e nem por substâncias leves, ar e fogo. Assim, Aristóteles concluiu que todos os astros seriam formados por um quinto elemento: o éter. O movimento natural desses corpos, formados por essa nova substância, seria circular. O universo aristotélico seria, então, constituído de duas partes: a celeste, incorruptível, formada de éter e que se estende da Lua até as estrelas, e a sublunar, corruptível, constituída de terra, água, ar e fogo²⁶⁸.

Aristóteles assume assim, como princípios físicos, os movimentos: retilíneo para as substâncias corruptíveis, terra, água, ar e fogo, e o movimento circular para a substância incorruptível e eterna, o éter²⁶⁹. Esses princípios físicos eram coerentes com uma Terra, imóvel e esférica, ocupando o centro do Universo.

Uma parte da argumentação apresentada por Aristóteles é puramente filosófica (ou metafísica), e outra parte se baseia nos conhecimentos astronômicos e físicos da época. Como exemplos de argumentos filosóficos, podemos citar sua justificativa de que o universo é esférico porque esta é a figura sólida mais perfeita²⁷⁰. Um exemplo intermediário (em que aparecem premissas filosóficas e fatos observáveis) é sua defesa de que o universo não poderia ter um tamanho infinito, pois dá uma volta em torno da Terra em um dia, e se seu tamanho fosse infinito, seria necessário que as estrelas percorressem uma distância infinita em um tempo finito, o que é impossível²⁷¹. Um argumento puramente empírico é utilizado por Aristóteles para criticar a idéia de rotação dos astros. Platão acreditava que todos os corpos celestes giravam em torno de seu próprio eixo. Aristóteles vai negar essa idéia, utilizando a evidência da Lua, que tem sempre a mesma face voltada para a Terra²⁷².

Segundo Kuhn²⁷³, uma vez que as estrelas parecem ser as coisas mais distantes que conseguimos ver e como se deslocam todas ao mesmo tempo, não variando suas "distâncias angulares" relativas, seria razoável que todas estivessem presas a uma enorme esfera que gira em torno de um eixo de

²⁶⁸ *Ibid.*, 28.

²⁶⁹ Aristóteles, livro I, cap. III, 270^b20; Heath, 227.

²⁷⁰ Dreyer, 109.

²⁷¹ Dreyer, 109.

²⁷² Aristóteles, *Sobre o Céu* liv. II, cap. 8. Dreyer, 111; Heath, 235.

²⁷³ Kuhn, 37.

rotação, que passa pelos pólos celestes e pelo centro da Terra, com período sideral de 23h56min.²⁷⁴

A fonte de todos os movimentos celestes, segundo Aristóteles, seria algo eterno, diferente dos próprios corpos celestes – o primeiro motor imóvel²⁷⁵.

Como sempre deve haver um movimento ininterrupto, é necessária a existência de um primeiro instigador do movimento (seja ele um único ou vários) e que esse primeiro motor seja imóvel²⁷⁶.

Aristóteles explica esse conceito principalmente na *Metafísica*, livro XII (ou Λ), onde esclarece que esse primeiro motor é imaterial e divino²⁷⁷.

3.11 EVIDÊNCIAS DE UMA TERRA ESFÉRICA, IMÓVEL E CENTRAL

Na época de Pitágoras já se pensava que a Terra era esférica. Na Academia de Platão já não se tinha mais dúvidas sobre o formato da Terra, e Aristóteles apresentou diversos argumentos observacionais e teóricos em favor de uma Terra esférica, imóvel e central²⁷⁸. Esses argumentos foram repetidos posteriormente, durante séculos, como sendo decisivos.

3.11.1 Terra esférica

Admitir-se uma Terra esférica e não em forma de disco, trazia algumas conseqüências interessantes e quase absurdas naquela época. Seria possível navegar sempre numa direção e se chegar ao mesmo lugar de partida, dando-se uma volta na Terra. Admitindo-se, também, que toda a Terra fosse habitada,

²⁷⁴ É importante, do ponto de vista de simetria, que a Terra tenha forma esférica. A Lua e o Sol são esféricos. Quando se olha para o céu, numa noite estrelada, tem-se a nítida sensação de que ele é esférico, isto é, que as estrelas estão todas à mesma distância da Terra.

²⁷⁵ Heath, *Aristarchus of Samos*, 225-226.

²⁷⁶ Aristóteles, *Física* 258b10-12. Wright, 178.

²⁷⁷ Wright, 179.

²⁷⁸ Heath, 235-240.

poderiam existir pessoas que estivessem de cabeça para baixo, em relação à outras e que, no entanto, não caíam em direção ao céu. A própria Terra não está apoiada em nada e não cai em nenhuma direção²⁷⁹.

Os argumentos de Aristóteles são:

- a) Quando um navio se afasta do porto, uma pessoa em terra vê, inicialmente, o navio todo, que lhe parece cada vez menor. À medida que o navio vai aumentando sua distância ao porto, a esfericidade da Terra vai ocultando as partes mais baixas do navio, até o seu total desaparecimento. Esse fato ocorre por ser a Terra esférica e não plana²⁸⁰ em forma de um disco.
- b) Outra prova apresentada é que quando se viaja para o Sul, são vistas outras estrelas, na mesma época do ano, que não eram vistas da Grécia. Esse fato também acontece devido à esfericidade da Terra²⁸¹. Para uma Terra em forma de disco esse fato não ocorreria.

Além disso, nossas observações das estrelas tornam evidente não apenas que a Terra é circular, mas também que é um círculo de tamanho pequeno. Pois uma pequena mudança da posição de sul para norte causa uma manifesta alteração do horizonte. Digo que há muita mudança nas estrelas que estão sobre nossas cabeças e as estrelas vistas mudam conforme alguém se move em direção ao norte ou ao sul. De fato, há algumas estrelas vistas no Egito e nas vizinhanças de Chipre que não são vistas nas regiões ao norte e estrelas que no norte nunca estão além do limite de observação, mas que nestas regiões nascem e se põem. O que vai mostrar que não apenas a Terra é circular em forma, mas também que é uma esfera de pequeno tamanho: pois de outro modo o efeito de tão leve mudança de lugar não poderia aparecer tão rapidamente²⁸².

²⁷⁹ Roberto de Andrade Martins, *O Universo: Teorias Sobre Sua Origem e Evolução*. 5ª ed. (São Paulo: Editora Moderna, 1997), 76.

²⁸⁰ Ibid., 74.

²⁸¹ Ibid., 74.

²⁸² Aristóteles, *Sobre o Céu*, livro II, cap. 14, 297b-298a.

c) Em relação aos eclipses da Lua, argumentava que se a sombra projetada pela Terra na superfície da Lua era arredondada, isto significa que a Terra é esférica. Se a Terra fosse um disco, a sombra projetada sobre a superfície da Lua nem sempre seria de forma circular²⁸³.

As evidências dos sentidos também corroboram isto. Como então podem os eclipses da Lua mostrar segmentos com a forma que vemos? As formas com que a Lua se mostra a cada mês são de todos os tipos – reta, convexa ou côncava – mas nos eclipses a linha é sempre curva. Como é a interposição da Terra que faz os eclipses, a forma desta linha será causada pela forma da superfície da Terra que é portanto esférica²⁸⁴.

Além de utilizar argumentos observacionais Aristóteles defendia também a forma esférica da Terra a partir da teoria dos movimentos naturais²⁸⁵: como a Terra é constituída de terra e água, e esses corpos tendem ao centro do universo, eles pressionam de todos os lados, em direção ao centro, e por isso produzem uma forma esférica²⁸⁶.

Aristóteles adiciona um argumento “biológico” para a forma redonda da Terra: há elefantes tanto na Índia (extremo oriental conhecido da Terra, na época) e na costa oeste da África (extremo ocidental conhecido, na época), por isso talvez essas regiões não estejam muito distantes entre si (o que só pode ocorrer se a Terra for redonda). Aristóteles e seus contemporâneos estimavam o comprimento do meridiano terrestre em 40 miríadas de estádios:

Portanto não se deve estar tão certo da incredibilidade da visão daqueles que concebem que há uma continuidade entre as partes sobre os pilares de Hércules e as partes sobre a Índia e neste caminho o oceano é uno. Como evidência disto eles citam o caso dos

²⁸³ Martins, 75.

²⁸⁴ Aristóteles, *Sobre o Céu*, livro II, cap. 14, 297b.

²⁸⁵ Ibid., 75.

²⁸⁶ Aristóteles, *Sobre o Céu*, livro II, cap. 14, 297a-b.

elefantes, uma espécie que ocorre em cada uma das extremas regiões, sugerindo que as características comuns destes extremos é explicada pela sua continuidade. Os matemáticos que tentaram calcular o tamanho da circunferência [da Terra] chegaram ao número de 40 miríadas de estádios. Isto não apenas indica que a massa da Terra tem a forma esférica mas também que, comparada com as estrelas, não é de grande tamanho²⁸⁷.

Sendo $1,0 \text{ miríada} = 1,0 \times 10^4 \text{ estádios}^{288}$, chega-se à conclusão de que o comprimento do meridiano e o raio da Terra, na época de Aristóteles, eram conhecidos, respectivamente, como: $40 \text{ miríades} = 4,0 \times 10^5 \text{ estádios}^{289}$ e $6,4 \text{ miríades} = 6,4 \times 10^4 \text{ estádios}$.

Aristóteles, antes de se referir ao tamanho da Terra, comentou que um deslocamento para o norte ou para o sul faz com que certas estrelas se tornem visíveis ou invisíveis²⁹⁰. Ele não se refere a variações de sombra do Sol. Por isso, pode ser que o método mais antigo de medida do tamanho da Terra tenha se baseado em observações de estrelas, e não na observação de sombras como foi feito posteriormente²⁹¹.

Aristóteles afirmou que a Terra é menor do que algumas das estrelas²⁹². Há também indicações indiretas de que ele teria afirmado que a Lua é menor do que

²⁸⁷ Aristóteles, *Sobre o Céu*, livro II, cap. 14, 296b

²⁸⁸ Ibid., 298^a15.

²⁸⁹ Ver Aristóteles, 298^a15. Em unidades atuais, segundo Miguel Candel: $1,0 \text{ estádio} \approx 177 \text{ m}$. Transformando-se os valores do comprimento do meridiano e do raio da Terra, conhecidos na época de Aristóteles, em valores atuais, chega-se, respectivamente, a: $7,1 \times 10^7 \text{ m}$ e $1,1 \times 10^7 \text{ m}$. Esses valores são quase o dobro dos atuais: cerca de $4,0 \times 10^7 \text{ m}$ para o meridiano e, aproximadamente, $6,4 \times 10^6 \text{ m}$ para o raio terrestre.

²⁹⁰ Aristóteles, *De caelo*, livro II, cap. 14, 297b30-298a20. Heath, *Aristarchus*, 147.

²⁹¹ Dreyer conjecturou que essa medida do tamanho da Terra poderia ser devida a Eudoxo, e que ele poderia ter se baseado em observações feitas durante sua viagem ao Egito.

²⁹² Aristóteles, *Sobre o Céu*, livro II, cap. 14, 296^b15; Aristóteles, *Meteorologia*, livro I, cap. 3, 339b. Dreyer, 119.

a Terra²⁹³. No entanto, não se sabe que tipo de base essas afirmações poderiam ter, na época.

3.11.2 Terra imóvel

Em relação à imobilidade terrestre, pode-se levantar os seguintes argumentos:

a) A Terra não poderia descrever um movimento de rotação uniforme, em torno de um eixo, e nem descrever um movimento circular de translação e uniforme em redor do Sol. Se descrevesse um movimento de rotação uniforme em torno de um eixo, todas as partes da Terra, formadas por substâncias corruptíveis, estariam descrevendo movimentos circulares e uniformes em torno desse eixo, que seriam os movimentos naturais de substâncias incorruptíveis, observados somente no céu. A Terra, também, não poderia se transladar em redor do Sol, descrevendo um movimento circular de translação e uniforme, pelo mesmo motivo.

Vamos decidir primeiro a questão do movimento ou repouso da Terra. Pois, como dissemos, há quem a toma como uma das estrelas e outros que, colocando-a no centro supõem que ela está rolando e em movimento ao redor do eixo dos pólos. Que ambas as visões são insustentáveis ficará claro se tomarmos como nosso ponto de partida o fato de que o movimento da Terra, esteja ela no centro ou fora dele, deve ser um movimento forçado. Não pode ser o movimento [natural] da própria Terra. Se fosse, qualquer parte sua deveria ter este movimento; mas de fato cada parte se move em linha reta para o centro. Sendo, então, forçado e não natural o movimento não poderia ser eterno. Mas a ordem do universo é eterna²⁹⁴.

b) Se a Terra girasse em torno de um eixo com direção Norte – Sul, para Leste, de tal maneira que tivéssemos a impressão de um movimento aparente das estrelas para Oeste, como se observa durante as noites estreladas, uma pedra, abandonada de certa altura, em relação à superfície da Terra, não cairia

²⁹³ Dreyer, 119; Heath, 236.

²⁹⁴ Aristóteles, *Sobre o Céu*, livro II, cap. 14, 296a.

verticalmente. Seria, sim, deslocada violentamente para Oeste. Podemos calcular que, para um período de rotação de 23h 56min, tem-se uma velocidade de cerca de 1,7 miríadas/hora = $1,7 \times 10^5$ estádios/hora, na superfície terrestre e ao longo da linha equatorial²⁹⁵. Seria um absurdo, do ponto de vista da Física aristotélica, admitir-se uma velocidade dessa ordem de grandeza para o movimento da superfície terrestre, sem que a mesma afetasse o movimento dos corpos que se movimentassem na sua superfície.

Que o centro da terra é o objetivo de seus movimentos [dos corpos pesados] é indicado pelo fato de os corpos pesados se moverem em direção da Terra em ângulos iguais (e não paralelamente) para um único centro, que é o da Terra. Está claro então que a Terra deve estar no centro e imóvel, não apenas pelas razões já dadas, mas também porque corpos pesados lançados violentamente para cima na vertical retornam para o ponto do qual partiram, mesmo que arremessados a uma distância infinita. Destas considerações fica claro então que a Terra não se move e não repousa em qualquer outro lugar senão o centro²⁹⁶.

3.11.3 Terra central

Se a Terra se movesse em redor do Sol, acreditava-se naquela época, que em diferentes épocas do ano estariam vendo o orbe das estrelas fixas de diferentes posições e, em consequência da paralaxe, as constelações deveriam sofrer uma distorção periódica provocada pelo movimento da Terra. As constelações, na direção Leste – Oeste, deveriam ter aparências dilatadas quando estivessem mais próximas da Terra e se apresentarem contraídas quando estivessem mais distantes. Por outro lado, as estrelas deveriam aumentar ou diminuir seus brilhos, dependendo se a Terra estivesse mais próxima ou mais afastada delas²⁹⁷.

²⁹⁵ Em unidades atuais, essa velocidade é, aproximadamente, igual a $8,4 \times 10^3$ m/s.

²⁹⁶ Aristóteles, *Sobre o Céu*, livro II, cap. 14, 296b.

²⁹⁷ Hanson, 56.

Por outro lado, se a Terra fosse um planeta, deveria apresentar períodos de retrogradação, como os demais planetas, e esse efeito deveria se fazer presente no ordenado movimento das estrelas fixas.

Não se observando nenhuma distorção nas imagens formadas pelas estrelas e nem o aumento ou diminuição em seus brilhos, concluía-se que a Terra deveria ocupar o centro do universo. Talvez esse fosse o argumento científico mais poderoso em favor de um universo geocêntrico (ver a Figura 3.4).

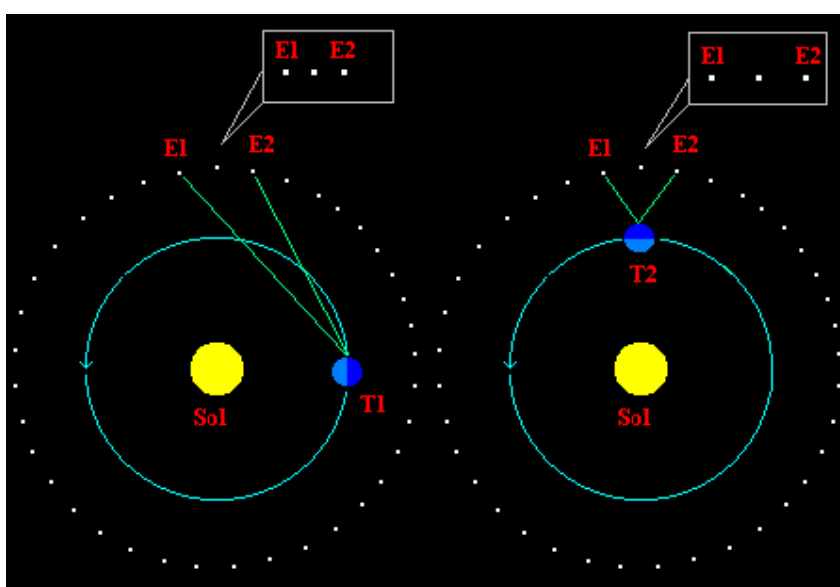


Figura 3.4: Com a Terra na posição T1, a distância angular entre as estrelas E1 e E2 é menor do que a distância angular quando a Terra alcança a posição T2. Por outro lado, com a Terra na posição T2 as estrelas E1 e E2 deveriam aumentar seus brilhos.

3.12 O MODELO DE ESFERAS DE ARISTÓTELES

Aristóteles, como a grande maioria dos filósofos antigos, não aceitava espaços totalmente vazios de matéria²⁹⁸. Por esse motivo, imaginou que a atmosfera

²⁹⁸ Roberto de Andrade Martins, "O vácuo e a pressão atmosférica, da Antigüidade a Pascal," *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* [série 2] 1 (1989): 9-48; Roberto de Andrade Martins,

terrestre só pudesse se estender até perto da Lua e que, a partir daí, como outros filósofos gregos já haviam pensado, haveria uma série de esferas transparentes e homocêntricas à Terra, girando em torno desta, arrastando os planetas. Essas esferas transparentes seriam constituídas de éter (como toda a região acima da Lua) e não haveria espaços vazios entre elas. Essas esferas eram chamadas de orbes²⁹⁹.

Não admitindo espaços vazios e observando-se que as estrelas não podem se encontrar a uma distância infinita da Terra, já que giram com um período de 23h56min; não se observando, também, nenhuma mudança de brilho nas estrelas, assegurando-se que a Terra nem se aproxima ou se afasta delas, o universo de Aristóteles, portanto, é finito e o seu limite era o orbe das estrelas fixas³⁰⁰, localizado um pouco além do planeta Saturno³⁰¹.

Esses pensamentos de Aristóteles se constituiriam, ao longo de centenas de anos, em poderosos argumentos contra qualquer sistema que não fosse geocêntrico.

Aristóteles aceitou, em linhas gerais, a teoria de Eudoxo aperfeiçoada por Callippos, mas propôs a introdução de novas esferas. Atribuiu real existência às esferas transparentes de Eudoxo-Cálipo, tornando-as componentes de um sistema físico. Sugeriu que essas esferas seriam movimentadas por um *motor principal*. Esse *motor* deveria agir pelo lado de fora da esfera das estrelas fixas, com período de um dia. Admitindo-se o princípio do *motor principal*, Aristóteles percebera a necessidade de supor a existência de outras esferas ao sistema de

“Em busca do nada: considerações sobre os argumentos a favor e contra o vácuo,” *Trans/Form/Ação* **16** (1993): 7-27.

²⁹⁹ Martins, *Universo*, 77.

³⁰⁰ As estrelas se movimentam de Leste para Oeste e não se observavam quaisquer mudanças em suas posições relativas. Daí receberem, na Antigüidade, o nome de estrelas fixas (Ver Sedeño, 13). Hoje sabemos que as estrelas têm um movimento próprio. Mas, para medi-lo, foi preciso uma tecnologia muito sofisticada, que não estava disponível naquela época: o telescópio associado a uma mecânica de precisão capaz de medir, durante um certo intervalo de tempo, frações de segundo de arco.

³⁰¹ Hanson, 58.

Eudoxo-Cálipo. Essas esferas compensadoras deveriam ser interiores às esferas de Eudoxo-Cálipo e girarem em sentidos contrários³⁰².

A modificação introduzida por Aristóteles não tinha o objetivo de melhorar a concordância entre teoria e fenômenos, e sim resolver uma dificuldade puramente teórica. Se Júpiter está abaixo de Saturno (mais próximo da Terra), dever-se-ia pensar que os movimentos das esferas de Saturno influenciariam os movimentos de Júpiter, pois cada esfera estaria presa à esfera imediatamente superior. No entanto, a teoria de Eudoxo e Callippos supunha que as esferas de cada planeta estariam presas à esfera das estrelas fixas – o que não parecia possível. Assim, Aristóteles imaginou que existiriam, entre Saturno e Júpiter, outras duas esferas invisíveis, que anulariam os movimentos das esferas internas de Saturno, de tal forma que existiria a esfera inferior tivesse o mesmo movimento que a esfera das estrelas. A esfera mais externa de Júpiter estaria presa a esta. Da mesma forma, existiriam esferas adicionais entre os outros pares de planetas, contrabalançando os movimentos das esferas de cada um deles e produzindo, abaixo, uma esfera que se move como a das estrelas fixas.

Suponhamos, por exemplo, que as esferas que movem Saturno são chamadas de A, B, C, D. A primeira (mais externa) é a própria esfera das estrelas fixas. As outras três, através de seus movimentos, produzem o deslocamento de Saturno em relação à esfera de estrelas, com suas retrogradações. Para que os efeitos dessas esferas não afetem o movimento de Júpiter, poderíamos ter abaixo de Saturno uma esfera D' com eixo paralelo a D, que gira no sentido oposto, com mesmo período. Abaixo, uma esfera C', com eixo paralelo a C, girando no sentido oposto, com mesmo período; e mais abaixo uma esfera B', com eixo paralelo a B, girando no sentido oposto, com mesmo período. Assim, cada uma dessas três inferiores anula ou contrabalança os movimentos das outras três superiores, e abaixo de B' teríamos um movimento idêntico ao da esfera de estrelas. Essa seria a primeira esfera do sistema de Júpiter³⁰³. Segundo Thomas Heath, Aristóteles poderia ter eliminado, portanto, duas esferas de cada planeta (em vez de uma

³⁰² Crowe, 26.

³⁰³ Heath, *Aristarchus*, 218.

só), reduzindo um pouco o número total de esferas necessárias para o sistema planetário³⁰⁴.

Se os fenômenos devem ser produzidos por todas as esferas agindo em combinação, é necessário supor que no caso de cada um dos planetas há outras esferas, em um número menor por uma unidade. Essas últimas esferas são as que eliminam a rotação ou reagem em relação às outras de tal modo a substituir a primeira esfera no planeta imediatamente inferior na mesma posição, pois apenas desse modo é possível produzir o movimento dos planetas por um sistema combinado. Ora, as esferas transportadoras são, primeiramente, oito [para Saturno e Júpiter] e depois mais 25 [para o Sol, a Lua e os outros 3 planetas]; e desses últimos o último conjunto que carrega o planeta colocado mais abaixo [a Lua] não exige esferas reagentes. Assim as esferas reagentes para os dois primeiros corpos serão 6; e para os quatro seguintes serão 16; e o número total das esferas, incluindo as esferas transportadoras e as que reagem sobre elas, será de 55.³⁰⁵

Tabela 3.3: Número de esferas do universo de Aristóteles.³⁰⁶

Para o movimento de:	Número de esferas
Estrelas	1
Saturno	4 + 3 (compensadoras)
Júpiter	4 + 3 (compensadoras)
Marte	5 + 4 (compensadoras)
Vênus	5 + 4 (compensadoras)
Mercúrio	5 + 4 (compensadoras)
Sol	5 + 4 (compensadoras)
Lua	5

³⁰⁴ Heath, *Aristarchus*, 219.

³⁰⁵ Aristóteles, *Metafísica* livro XII, cap. 8, 1073b38-1074a15; Heath, *Aristarchus*, 217.

³⁰⁶ Crowe, 26;

Total	56
--------------	-----------

Na Figura 3.5, as esferas d e D giram em torno do mesmo eixo, com a mesma velocidade angular, mas em sentidos contrários; a finalidade da esfera d é neutralizar o movimento de D. Da mesma maneira c e C giram em torno do mesmo eixo, com velocidades angulares iguais e em sentidos contrários, ou seja, o movimento de C é neutralizado por c. O mesmo fato acontece com as esferas b e B. Assim, a ultima esfera do Sistema de Eudoxo-Cálipo, a esfera A, que representa a esfera das estrelas fixas, somente esta que gira em, aproximadamente, 24 horas, iria transmitir, novamente, movimento ao próximo conjunto de esferas, mais interno, do sistema de Eudoxo-Cálipo.

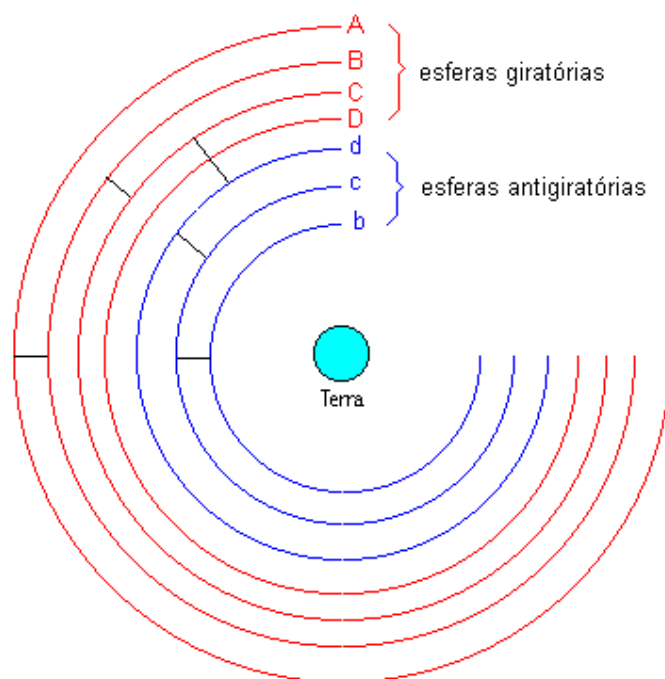


Figura 3.5: As esfera A, B, C e D são as esferas giratórias de Eudoxo-Cálipo; as esferas b, c e d são as esferas antigiratórias de Aristóteles.³⁰⁷

Vemos, assim, que o sistema das esferas homocêntricas se tornou gradualmente mais complexo, por dois motivos: tentativa de obter melhor

³⁰⁷ Hanson, 81-83.

concordância com as observações (Cálipo) e preocupação com a possibilidade física dos movimentos descritos (Aristóteles). A Tabela 3.4 compara os três modelos.

Tabela 3.4: Número de esferas dos planetas, nos modelos de Eudoxo, Cálipo e Aristóteles.

			Aristóteles	
	Eudoxo	Callippos	Deferentes	Reagentes
Estrelas	1	1	1	
Saturno	4	4	4	3
Júpiter	4	4	4	3
Marte	4	5	5	4
Mercúrio	4	5	5	4
Vênus	4	5	5	4
Sol	3	5	5	4
Lua	3	5	5	0
Total:	27	34	56	

Pode-se interpretar os modelos de Eudoxo e Cálipo como puramente matemáticos e teóricos (instrumentalistas, na nomenclatura atual), enquanto o modelo de Aristóteles é físico, mecânico (realista), procurando entender as causas dos movimentos celestes.

Pode ser que o próprio Aristóteles não confiasse muito nessa teoria, pois logo depois de apresentá-la, ele afirmou:

Devemos presentemente nos contentar em repetir o que alguns dos matemáticos dizem, para que possamos formar uma noção e nossa mente possa ter um certo número definido para captar; mas quanto ao restante devemos investigar algumas questões por nós mesmos, e aprender outras de outros investigadores, e se aqueles que estudam essas questões chegarem a conclusões diferentes das

opiniões que apresentamos agora, devemos, embora respeitando ambas, dar nossa adesão àquelas que são mais corretas³⁰⁸.

O próprio Aristóteles e seu discípulo Teofrasto indicaram algumas dificuldades dessa concepção³⁰⁹. Se existe um único motor principal do universo, porque todos os corpos celestes não se movem da mesma forma? Se cada corpo celeste tem seu próprio motor, a harmonia do universo já não fica tão clara. Também não havia nenhuma explicação filosófica para o número de esferas associadas a cada corpo celeste. Assim, sob o ponto de vista filosófico, o modelo não era totalmente satisfatório.

3.13 AS DIFICULDADES DO MODELO DE EUDOXO

A teoria de esferas concêntricas foi aceita por outros autores após Aristóteles e talvez tenha sido adotada por Arquimedes³¹⁰. No entanto, ela entrava em conflito com observações que pareciam indicar variações de distância entre os planetas e a Terra. Os fatos eram as grandes variações de brilho de Vênus e Marte ao longo do tempo, que pareciam indicar que às vezes eles estão mais próximos e às vezes mais distantes de nós; e as variações dos tamanhos aparentes do Sol e da Lua. Um discípulo de Eudoxo, Polemarchos de Cyzicos (c. 340 a.C.) percebeu que os diâmetros aparentes do Sol e da Lua são variáveis, e esse fato era incompatível com teorias de esferas concêntricas à Terra³¹¹. Como Eudoxo supõe que as estrelas e os planetas se encontram à distâncias constantes da Terra, seus tamanhos aparentes e seus brilhos deveriam ser constantes.³¹²

³⁰⁸ Aristóteles, *Metafísica* livro XII, cap. 8, 1073b10-17; Heath, *Aristarchus*, 223.

³⁰⁹ Wright, 180.

³¹⁰ Heath, *Aristarchus of Samos*, 221.

³¹¹ Pedersen, 69.

³¹² O fato de Eudoxo apresentar um modelo para explicar os movimentos da Lua, do Sol e dos planetas, incluindo-se a retrogradação do movimento dos planetas, é ciência da melhor qualidade. O modelo de Eudoxo somente declinaria em relação a outro modelo de Universo mais preciso: o de Ptolomeu.

Simplicio se refere a esses fatos e comenta que Autolycus de Pitane teria tentado explicar mantendo a teoria das esferas homocêntricas, sem muito sucesso.

No entanto, as teorias de Eudoxo e seus seguidores falham em salvar os fenômenos, e não apenas aqueles que apenas foram descobertos posteriormente, mas também os que já eram conhecidos antes e aceitos pelos próprios autores. Que necessidade tenho de mencioná-los, depois que Eudoxo falhou em explicar alguns deles, e Cálio tentou salvá-los [...] Vou me restringir a um fato que é evidente aos olhos. Este fato ninguém antes de Autólico de Pitane sequer tentou explicar por meio de hipóteses, e nem mesmo Autólico foi capaz de fazê-lo, como se percebe claramente por sua controvérsia com Aristotherus. Eu me refiro ao fato de que os planetas parecem em certos momentos estar próximos de nós e em outros momentos parecem se afastar. Pois a estrela de Afrodite [Vênus] e também a estrela de Ares [Marte] parecem, no meio de suas retrogradações, ser muitas vezes maiores, tanto é assim que a estrela de Afrodite produz sombras dos objetos em noites sem Lua. A Lua também, como percebemos com nossos olhos, não está sempre à mesma distância de nós, porque ela não parece ser sempre do mesmo tamanho nas mesmas condições quanto ao meio [através do qual ela é observada]. O mesmo fato, além disso, é confirmado se observarmos a Lua por meio de um instrumento; pois algumas vezes é um disco de 11 dedos de largura, e em outros momentos um disco de 12 dedos de largura que, quando colocados à mesma distância do observador, esconde a Lua de modo que seu olho não pode vê-la³¹³. Além disso, há uma outra evidência para a verdade daquilo que afirmei nos fatos observados com relação aos eclipses totais do Sol. Pois quando o centro do Sol, da Lua e nosso olho estão em linha reta,

³¹³ O texto se refere a discos com os tamanhos referidos, colocados a distâncias de aproximadamente 3 metros do observador.

o que se vê não é sempre igual. Algumas vezes o cone que compreende a Lua e que tem seu vértice em nosso olho compreende o próprio Sol ao mesmo tempo, e o Sol até mesmo permanece invisível para nós um certo tempo, enquanto em outros casos isso não ocorre, e fica uma borda [do Sol] visível em torno [da Lua] no momento central do eclipse. Portanto devemos concluir que a diferença aparente dos dois corpos observados sob as mesmas condições atmosféricas é devida à desigualdade de suas distâncias.³¹⁴

³¹⁴ Simpício, *Comentário sobre o De Caelo de Aristóteles*, traduzido em Heath, *Greek Astronomy*, 68-69.

4 – Algumas distâncias astronômicas

4.1 INTRODUÇÃO

Como foi mostrado no capítulo anterior, o modelo das esferas homocêntricas, proposto por Eudoxo e aperfeiçoado por Cálipo e Aristóteles, não explicava as variações de brilho dos planetas no intervalo de tempo das retrogradações, principalmente dos planetas Vênus e Marte. O aumento de brilho era interpretado como sendo uma aproximação do planeta à Terra. Esse fato levaria os astrônomos, para "salvar os fenômenos", a se interessarem em medir distâncias no universo e novos modelos seriam propostos.

4.2 POSSÍVEL MOVIMENTO DE ROTAÇÃO TERRESTRE

Os primeiros astrônomos a admitirem um movimento para a Terra parecem ter sido os pitagóricos. Segundo Filolau, da Terra nunca se avistava o Fogo Central porque a mesma era dotada de um movimento de translação, de aproximadamente 24h em torno do Fogo Central, e um movimento de rotação, com o mesmo período de translação, em torno de seu próprio eixo; somente assim não se conseguiria ver, da parte habitada da Terra, o Fogo Central (ver o Capítulo 1).

Outros pensadores posteriores abandonariam o modelo do Fogo Central e colocariam a Terra ocupando a posição central no universo e girando em torno de seu próprio eixo³¹⁵. Atribui-se essa idéia a Hicetas e Ecfanto, que teriam vivido em Siracusa no século V a.C. e que pertenceriam à escola pitagórica.

Hicetas de Siracusa, de acordo com o que Teofrasto nos conta, mantém que os céus, o Sol, a Lua e todos os corpos celestes estão em repouso, e que nada no universo se move exceto a Terra, e que à medida que a Terra roda em torno de seu eixo com uma grande

³¹⁵ Dreyer, 50-51.

velocidade, o efeito é exatamente o mesmo que se os céus estivessem rodando e a Terra em repouso. E existem alguns que pensam que isso é o que Platão diz no *Timeu*, mas de forma mais obscura.³¹⁶

Ecfanto, de Siracusa, disse que a Terra, o centro do universo, se move em torno de seu próprio centro para leste.³¹⁷

Há fortes dúvidas, no entanto, de que Hicetas e Ecfanto tenham existido. Paul Tannery, baseando-se na documentação existente, sugeriu que eles seriam meros personagens de um diálogo escrito por Heráclides de Ponto, e Thomas Heath também defendeu essa interpretação³¹⁸.

4.3 HERÁCLIDES DE PONTO

Enquanto Platão e Aristóteles, como foi visto nos capítulos 2 e 3, nunca abandonaram a idéia de uma Terra estacionária e o céu movimentando-se de Leste para Oeste, em 24h, Heráclides de Ponto ensinava, por volta da mesma época, que a Terra girava em torno de seu eixo, em aproximadamente 24h, de Oeste para Leste³¹⁹.

Sabe-se pouco da vida de Heráclides de Ponto (c. 390 – c. 310 a.C.). Segundo Dreyer³²⁰, a maior parte de sua vida teria acontecido por volta do quarto século a.C., depois da fundação da cidade de Alexandria. Ele descreveu a destruição da cidade de Helike, em Achaia, por um terremoto que teria acontecido durante a sua própria vida, em 373 a.C.. Nessa ocasião, Heráclides estava em Heraclea³²¹, em

³¹⁶ Cícero, *Academica*, II.39.123, traduzido em M. R. Cohen; I. E. Drabkin, *A Source Book in Greek Science* (New York: McGraw Hill, 1948), 106.

³¹⁷ Hipólito, *Refutação de Todas as Heresias*, traduzido em M. R. Cohen; I. E. Drabkin, *A Source Book in Greek Science* (New York: McGraw Hill, 1948), 106.

³¹⁸ Heath, *Aristarchus of Samos*, 187-189; 251-253.

³¹⁹ Dreyer, 123.

³²⁰ *Ibid.*, 123-124.

³²¹ Antiga cidade da Ásia Menor.

Ponto. Após ter emigrado para Atenas, tornou-se discípulo de Speusippus que seguia as doutrinas platônicas³²². Foi discípulo de Platão e, talvez, de Aristóteles. A tradição lhe atribui trabalhos sobre ética, física, astronomia, música, retórica e outros assuntos.

Lamentavelmente, todos os trabalhos de Heráclides foram perdidos. As informações que temos sobre suas doutrinas astronômicas são provenientes de escritores mais recentes como, por exemplo, Aécio e Simplicio:

Heráclides de Pontos e Ecfanto, o pitagórico, supunham que a Terra se movia, porém não mudando de posição, mas sim rodando de oeste para leste em torno de seu próprio centro, fixo em sua haste como uma roda.³²³

Houve alguns, entre eles Heráclides de Pontos e Aristarco, que pensaram que os fenômenos poderiam ser explicados supondo-se que o céu e as estrelas estão em repouso, e que a Terra está em movimento em torno dos pólos do equador, do oeste [para leste], fazendo uma volta completa em aproximadamente um dia. A palavra “aproximadamente” é adicionada porque o movimento do Sol corresponde a um grau.³²⁴

Introduzindo-se esse movimento de rotação, era possível considerar que a esfera das estrelas está em repouso, e reduzir o número de movimentos dos planetas. Se alguém tentasse, por exemplo, introduzir essa hipótese no modelo de Eudoxo, seria possível reduzir uma esfera de cada planeta.

A interpretação usual da teoria de Heráclides é que ele mantinha a Terra no centro do universo, girando em torno do seu eixo. No entanto, B. L. van der

³²² Heath, 252.

³²³ Aetius, traduzido em M. R. Cohen; I. E. Drabkin, *A Source Book in Greek Science* (New York: McGraw Hill, 1948), 107.

³²⁴ Simplicio, *Comentário Sobre o De Caelo de Aristóteles*, traduzido em M. R. Cohen; I. E. Drabkin, *A Source Book in Greek Science* (New York: McGraw Hill, 1948), 106-107.

Waerden defendeu uma outra interpretação,³²⁵ segundo a qual Heráclides supunha que a Terra também se movia em um círculo, em torno do centro do universo (como Filolau e Aristarco).

Supor que a Terra estivesse em rotação trazia problemas filosóficos e científicos, já que Aristóteles havia proporcionado bons argumentos para supor que ela estava parada. Não se sabe se Heráclides dispunha de respostas aos argumentos de Aristóteles.

4.4 O MODELO DE UNIVERSO DE HERÁCLIDES

Para Heráclides, a Terra realizava um movimento de rotação, em torno de seu eixo, de Oeste para Leste, fazendo com que a esfera das estrelas fixas, aparentemente, realizasse um movimento de Leste para Oeste. Essa impressão provinha do fato de as estrelas fixas não apresentarem nenhuma anomalia: jamais mudavam suas posições relativas, umas em relação às outras, e não mudavam de brilho³²⁶, não causando a impressão de se aproximarem ou se afastarem da Terra. Constituíam uma garantia permanente da lei, da ordem e da regularidade existente no universo. Contudo, os planetas conhecidos moviam-se, com extrema irregularidade, numa faixa estreita do céu: o zodíaco. Esse fato era uma garantia de que suas órbitas jaziam todas, aproximadamente, no mesmo plano, embora suas distâncias, à Terra, fossem diferentes, de acordo com seus períodos siderais.³²⁷

Também na época de Heráclides, as irregularidades observadas no movimento dos planetas continuava sendo um dos principais motivos das pesquisas astronômicas.³²⁸ Somente a Lua e o Sol pareciam movimentar-se de forma mais ou menos regular através dos signos do Zodíaco; mesmo assim,

³²⁵ B. L. van der Waerden, "On the Motion of the Planets According to Heraclides of Pontus," *Archives Internationales d'Histoire des Sciences* **28** (1978):167-182.

³²⁶ Existem estrelas que mudam periodicamente de brilho, como por exemplo as Cefeidas, os sistemas de estrelas binários, etc. Contudo, essas variações de brilho não eram percebidas a uma vista desarmada

³²⁷ Arthur Koestler, *O Homem e o Universo* (São Paulo: IBRASA, 1989), 22.

³²⁸ Ver o Capítulo 2, sobre o modelo das esferas homocêntricas proposto por Eudoxo

apresentavam variações em seus diâmetros angulares, revelando uma variação de suas distâncias à Terra.

Diante dessa situação, Heráclides rejeitou a teoria das esferas homocêntricas, adotando uma outra em que as distâncias dos astros à Terra era variável. Não se conhecem os detalhes de sua teoria, mas sabe-se um aspecto importante: ele supunha que Mercúrio e Vênus giravam em torno do Sol, e não em torno da Terra.

Por fim, Heráclides de Pontos, ao descrever os círculos de Lúçifer [Vênus] e do Sol, dá aos dois círculos um centro e um meio, mostrando como Vênus algumas vezes está acima e algumas vezes abaixo do Sol.³²⁹

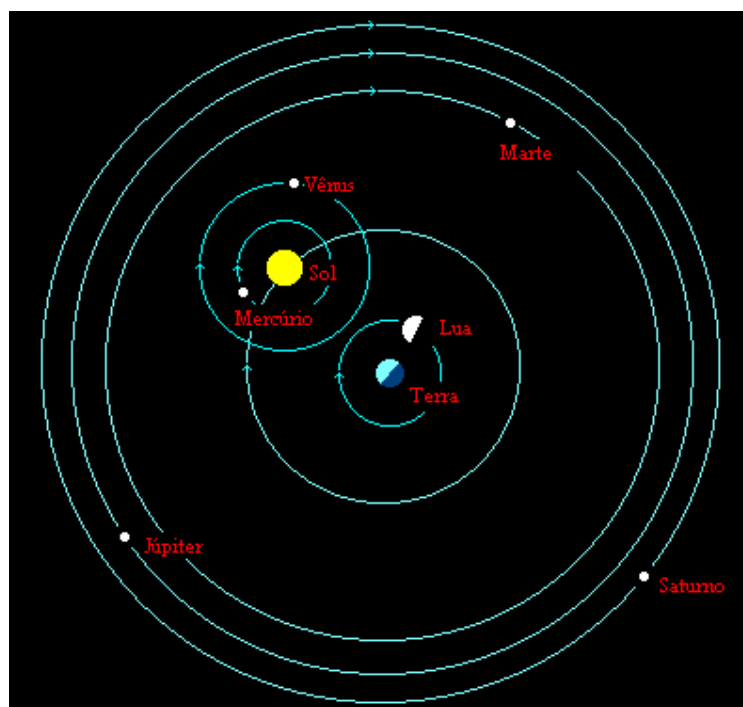


Figura 4.1: O modelo de universo de Heráclides, explica o porquê de Mercúrio e Vênus (principalmente Vênus) mudarem

³²⁹ Calcídius, *Comentário sobre o Timeu de Platão*, traduzido em M. R. Cohen; I. E. Drabkin, A *Source Book in Greek Science* (New York: McGraw Hill, 1948), 107.

seus brilhos, mudando as suas distâncias à Terra, e serem visíveis no nascer do Sol ou no pôr-do-Sol.

Calcidius foi o único autor antigo que descreveu essa teoria de Heráclides indicando o nome de seu autor. Em muitas outras obras, a teoria é descrita sem ser atribuída a nenhum astrônomo em particular³³⁰.

A mais antiga descrição desse tipo de teoria aparece na obra de Vitruvius, que assim relata:

As estrelas de Mercúrio e de Vênus fazem seus avanços, paradas e retrogradações em torno dos raios do Sol que lhes serve de centro e que eles coroam com seus deslocamentos³³¹.

Vitruvius explicou que essa hipótese permitia compreender por qual motivo Mercúrio e Vênus são sempre observados próximos ao Sol (nunca a grandes distâncias angulares dele)³³². Supunha-se, portanto, que o Sol descrevia seu movimento circular em torno da Terra, e Mercúrio e Vênus seus movimentos circulares em redor do Sol³³³. Os demais planetas não têm seus movimentos limitados pela posição do Sol, podendo estar opostos a ele (em relação à Terra), e por isso podia-se supor que realizavam seus movimentos circulares em redor da Terra.

Com esse sistema, era possível explicar:

- a) o movimento aparente da esfera das estrelas fixas de Leste para Oeste;
- b) a falta do ângulo de paralaxe das estrelas fixas;
- c) o porquê dos planetas Mercúrio e Vênus não se afastarem das proximidades do Sol;

³³⁰ Dreyer, 126-127.

³³¹ Vitruvius, *De l'Architecture* (Paris: Belles Lettres, 1969), livro X, cap. I.6.

³³² Plínio, o Velho, indicou que Mercúrio nunca se afasta mais de 20° do Sol, e Vênus nunca se afasta mais de 46°. Gaius Plinius Secundus, *Histoire Naturelle* (Paris: Belles Lettres, 1950), livro II, cap. XIV, 31. Os valores modernos são 28° e 48°, respectivamente.

³³³ Ibid., 22-23; Corral, 59; Crowe, p. 27; Sambursky, 86-87.

- d) os movimentos retrógrados de Mercúrio e Vênus;
- e) a intensa variação de brilho observada nesses planetas, principalmente de Vênus, ao se aproximarem ou se afastarem da Terra.

Não existe, no entanto, nenhum documento antigo que indique se Heraclides utilizou sua teoria para explicar as variações de brilho dos planetas.

4.5 A DESCRIÇÃO DE MARTIANUS CAPELLA

A descrição antiga mais detalhada do sistema de Heráclides foi apresentada por Martianus Capella, no século V d.C., em sua obra *O Casamento de Filologia e Mercúrio*. Essa descrição é considerada muito importante, porque tornou conhecida essa teoria durante a Idade Média.

Existe um movimento que é comum a todos os sete planetas – na direção leste. Outro ponto a ser notado é que todos eles diferem quanto aos tempos e circunstâncias de seus períodos. Pois cinco dos planetas sofrem paradas e retrogradações, mas o Sol e a Lua são impelidos em cursos estáveis. Além disso, esses dois corpos luminosos se eclipsam um ao outro alternadamente; mas os outros cinco nunca são eclipsados. Três deles, juntamente com o Sol e a Lua, possuem suas órbitas em torno da Terra, mas Vênus e Mercúrio não giram em torno da Terra³³⁴.

Vênus e Mercúrio, embora nasçam e se ponham todos os dias, não caminham em torno da Terra; pelo contrário, eles circundam o Sol em giros mais amplos. O centro de suas órbitas está colocado no Sol. Daí resulta que eles algumas vezes estão sobre o Sol; é mais comum que eles estejam abaixo dele, mais próximos à Terra. A maior distância de Mercúrio e Vênus do Sol é de um signo e meio [ou seja,

³³⁴ Martianus Capella, *The Marriage of Philology and Mercury* (New York: Columbia University Press, 1977), 332.

45°]. Quando ambos planetas possuem uma posição acima do Sol, Mercúrio está mais próximo da Terra; quando estão abaixo do Sol, Vênus está mais próximo, pois tem uma órbita mais ampla e que faz uma maior varredura³³⁵.

Capella descreve detalhadamente os movimentos de Mercúrio:

Stilbon [Mercúrio], que completa sua órbita em aproximadamente um ano, tem um movimento em latitude de 8 graus e é impelido em direções opostas. Os círculos deste planeta e Vênus, como eu já disse, são epiciclos, ou seja, eles não envolvem o globo terrestre com suas órbitas, mas descrevem uma órbita lateral, de certa forma. [...]

Este mesmo Stilbon, embora acompanhe o Sol em seus epiciclos variados, nunca será capaz de se afastar do Sol mais do que 22 graus; nunca será capaz de ficar a dois signos de distância, pois algumas vezes ele passa pelo Sol, então pára, e depois volta atrás³³⁶.

Há também uma descrição detalhada sobre Vênus:

Vênus, que é chamada algumas vezes de Phosphoros, foi investigada completamente por Pitágoras de Samos e seus discípulos. Mostrou-se que ela completa sua órbita em um período de cerca de um ano. Pois em 300 e alguns dias ela atravessa, como a Lua, todos os 12 graus de latitude do Zodíaco, atingindo 50 graus de distância do Sol, embora nunca possa ter uma elongação de mais de 46 graus³³⁷. Localizada no seu próprio epiciclo, ela gira em torno do

³³⁵ *Ibid.*, 333.

³³⁶ *Ibid.*, 341.

³³⁷ Aqui, a frase de Capella é confusa, mas ele está se referindo aos dois movimentos de Vênus: em latitude e em longitude. A latitude máxima de Vênus seria de 12 graus (distância máxima à eclíptica), e a longitude máxima (em relação ao Sol) seria de 46 graus. Quando Vênus atingisse ao mesmo tempo a máxima latitude e máxima longitude em relação ao Sol, sua distância angular

Sol, variando seu movimento; algumas vezes passa à frente do Sol, algumas vezes vai atrás dele, e não o alcança; e algumas vezes é carregada acima do Sol e às vezes abaixo dele. E não completa sempre sua órbita em um ano. Pois nos momentos em que tem movimento retrógrado, leva mais do que um ano para atravessar sua órbita; mas quando está com movimento direto, pode completar seu caminho em 11 meses³³⁸.

Durante o período medieval, o sistema de Heráclides era conhecido como a “teoria egípcia”, porque Macróbio, no seu comentário ao “Sonho de Cipião” de Cícero, afirmou:

A proximidade entre Vênus, Mercúrio e o Sol foi a causa da confusão sobre a ordem que lhes foi assinalada pelos astrônomos, com exceção dos sagazes egípcios, que compreenderam a razão, aqui esboçada.

A esfera na qual o Sol se move é circundada pela esfera de Mercúrio, e pela esfera mais elevada de Vênus também. Como resultado, quando essas duas estrelas se movem na parte superior de seus círculos, estão acima do Sol, mas quando estão na parte inferior dos seus círculos, estão abaixo dele³³⁹.

Não existe nenhum documento antigo, no entanto, que indique que os astrônomos do antigo Egito pensaram que Vênus e Mercúrio se moviam em torno do Sol.

O sistema de Heráclides se constituía numa solução alternativa entre o sistema geocêntrico e o sistema heliocêntrico. Não se sabe se o astrônomo teria se contentado em fazer somente Mercúrio e Vênus girarem em torno do Sol, ou teria

seria a resultante desses dois ângulos, e corresponderia a $(12^2 + 46^2)^{1/2} = 47,5$ graus (e não 50 graus, como Capella afirma).

³³⁸ Capella, 342-343.

³³⁹ Macrobius, *Commentary on the Dream of Scipio* (New York: Columbia University Press, 1952), livro I, cap. 19, 163.

colocado também Marte, Júpiter e Saturno girando em torno do Sol, e este último, com os seus cinco "satélites", girando em torno da Terra (como no sistema de Tycho Brahe)³⁴⁰. Acreditam alguns historiadores da Ciência que Heráclides teria chegado a este último sistema ou, até mesmo, teria colocado também a Terra girando em torno do Sol, mas seu sucessor e contemporâneo, trinta anos mais jovem, o faria³⁴¹.

4.6 ARISTARCO

Aristarco de Samos (c. 310 – c. 230 a.C.), foi contemporâneo de Arquimedes (c. 287 – 212 a. C.), que era cerca de 23 anos mais jovem, e de Eratostenes; viveu poucas décadas depois de Euclides e cem anos, mais ou menos, antes de Hiparco³⁴² e Posidonio (c. 135 – c. 50 a.C.).³⁴³

O único trabalho de Aristarco que chegou até nós faz referência às distâncias entre Terra–Lua e Terra–Sol. O trabalho é escrito no estilo axiomático que mostra, claramente, que os astrônomos seguiam a mesma metodologia encontrada na Geometria, como aquela encontrada nos *Elementos* de Euclides. Os trabalhos se iniciam com um conjunto de hipóteses e terminam com as proposições.

Aristarco não só assumiu que a Terra estava girando em torno de seu eixo de rotação em aproximadamente 24h, como também propôs um novo sistema, no qual o Sol estava estacionado no centro do universo e a Terra, como qualquer planeta, descrevia um movimento de translação em redor do Sol, em um ano. O movimento de rotação da Terra em torno de seu eixo, segundo Abetti, era inclinado em relação ao plano da órbita da Terra em redor do Sol, com a finalidade de explicar os períodos das estações.³⁴⁴

A fonte mais antiga conhecida sobre essa teoria de Aristarco é um livro de Arquimedes, o *Arenário*, que descreve:

³⁴⁰ Heath, 260.

³⁴¹ Koestler, 23.

³⁴² Faremos referências a Hiparco no Capítulo 5.

³⁴³ Sambursky, 93.

³⁴⁴ Abetti, 52.

Você [rei Gelon] sabe que, de acordo com muitos astrônomos, o cosmos é a esfera cujo centro é o centro da Terra e cujo raio é uma linha que vai do centro da Terra até o centro do Sol³⁴⁵. Mas Aristarco de Samos produziu um livro contendo algumas hipóteses, das quais se segue que o universo é muitas vezes maior do que se acredita agora. Suas hipóteses são de que as estrelas fixas e o Sol permanecem imóveis, que a Terra gira em torno do Sol na circunferência de um círculo, estando o Sol no meio dessa órbita, e que as esferas das estrelas fixas, situada em torno do mesmo centro que o Sol, é tão grande que o círculo no qual ele supõe que a Terra gira tem uma proporção para com a distância das estrelas fixas como o centro de uma esfera para com sua superfície³⁴⁶. Ora, é fácil ver que isso é impossível; pois, como o centro da esfera não tem tamanho, não podemos conceber que exista alguma razão entre ele e a superfície de uma esfera. Devemos no entanto considerar que Aristarco quer dizer isso: que assim como concebermos que a Terra é, por assim dizer, o centro do cosmos, a razão que a Terra mantém para com o que descrevemos como o cosmos é a mesma razão que a esfera contendo o círculo no qual ele supõe que a Terra gira mantém para com a esfera das estrelas fixas. Pois ele adapta as provas de seus resultados a uma hipótese desse tipo, e em particular ele parece supor que a grandeza da esfera na qual ele supõe que a Terra se move é igual àquilo que nós chamamos de cosmos.³⁴⁷

Outro testemunho antigo é proporcionado por um texto de Plutarco:

³⁴⁵ Os pitagóricos dividiam o universo em três regiões, o Olimpo, o Cosmos e o Céu (Urano), sendo o Cosmos a região onde há apenas movimentos regulares (como o do Sol). Dreyer, 137.

³⁴⁶ Isto é, o movimento da Terra é desprezível comparado com a distância às estrelas, de modo a evitar o surgimento de paralaxe ou deformação das constelações.

³⁴⁷ Arquimedes, *Arenário*, traduzido em M. R. Cohen; I. E. Drabkin, *A Source Book in Greek Science* (New York: McGraw Hill, 1948), 108.

[...] Cleantes alegou que Aristarco de Samos deveria ser acusado de ímpio por colocar em movimento o altar do mundo, como consequência de que, para salvar os fenômenos, supôs que o céu está parado e que a Terra se move em um círculo oblíquo ao mesmo tempo em que gira em torno de seu eixo³⁴⁸.

Plutarco comentou que Aristarco apenas apresentou essa proposta como uma hipótese, mas que o astrônomo babilônio Seleukus afirmou que corresponderia à realidade³⁴⁹.

Essa hipótese de Aristarco não foi muito comentada na Antigüidade, o que parece indicar que poucas pessoas a aceitaram.

Levando o Sol para o centro do universo e transformando a Terra num simples planeta, deveria surgir o problema da falta de observação da paralaxe das estrelas fixas (da maneira como foi comentado no Capítulo 3). Se Aristarco não leva em conta a paralaxe, tudo leva a crer que imaginava a distância Sol – Terra muito menor do que a distância entre o Sol e o orbe das estrelas fixas. Quase 1800 anos após Aristarco, Copérnico faria a suposição de que o raio da órbita terrestre, de seu movimento circular em torno do Sol, deveria ser desprezível em relação ao raio da esfera das estrelas fixas. Outro fato interessante que se observa no modelo de Aristarco, é que a Lua, é transformada num "satélite" da Terra, de acordo com a segunda hipótese formulada abaixo³⁵⁰.

Sabe-se que no seu livro *Sobre as Revoluções dos Orbes Celestes* Copérnico atribuiu a idéia do sistema heliocêntrico a Aristarco, mas depois suprimiu a frase em que fazia essa menção³⁵¹.

³⁴⁸ Plutarco, *apud* Dreyer, 138; cf. Heath, 304.

³⁴⁹ Dreyer, 140; Pedersen, 56.

³⁵⁰ Pedersen, 47.

³⁵¹ Heath, 301.

4.7 AS DISTÂNCIAS DA LUA E DO SOL

O único texto de Aristarco que foi conservado é um pequeno tratado “Sobre os tamanhos e as distâncias do Sol e da Lua”.³⁵² Nessa obra não existe nenhuma menção à idéia de que o Sol esteja parado. Pelo contrário, toda a exposição pressupõe que o Sol gira em círculos em torno da Terra, como a Lua³⁵³. Poder-se-ia imaginar que esse tratado foi escrito antes que Aristarco formulasse sua teoria; ou então, que ele tenha preferido apresentar esse trabalho de forma independente de sua teoria sobre os movimentos celestes, assumindo a Terra parada por ser a hipótese mais aceita.

No entanto, existe uma possível relação entre a teoria heliocêntrica e este trabalho sobre as distâncias e tamanhos do Sol e da Lua. Aristarco precisaria ter algum argumento especial para centralizar o Sol e transformar a Terra num simples planeta. Talvez uma maneira de se justificar a centralização do Sol no universo conhecido, e não a Terra, seria por comparação entre seus tamanhos. Se o tamanho do Sol fosse bem maior que o tamanho da Terra, o primeiro deveria ocupar a posição central. E neste tratado Aristarco provou que o volume do Sol seria cerca de 300 vezes maior do que o da Terra³⁵⁴.

Para se determinar as distâncias Terra–Lua e Terra–Sol, bem como as dimensões da Lua e do Sol, Aristarco admitiria as seguintes hipóteses:³⁵⁵

- 1) A Lua obtém sua luz do Sol
- 2) A Terra se assemelha a um ponto e é o centro da esfera na qual a Lua se move.
- 3) Quando observamos a meia Lua, [o plano que contém] o grande círculo, que divide a escuridão e a parte luminosa, passa diretamente pelos nossos olhos.
- 4) A meia Lua tem uma distância angular do Sol igual a um quadrante menos $1/30$ de um quadrante.³⁵⁶

³⁵² O texto grego e sua tradução para o inglês são apresentados em Heath, 352-411.

³⁵³ Heath, 310.

³⁵⁴ Heath, 310.

³⁵⁵ Heath, 353; Pedersen, 47; Sambursky, 47-48.

³⁵⁶ Isto é: $90^\circ - 90^\circ/30 = 87^\circ$. Atualmente o valor aceito é $89^\circ 50''$.

5) A largura da sombra da Terra [durante um eclipse total da Lua] é duas vezes o diâmetro da Lua.

6) A Lua ocupa $1/15$ de um signo do zodíaco³⁵⁷.

Com relação às hipóteses acima, gostaríamos de incluir a sétima hipótese que, certamente, Aristarco conhecia: durante os eclipses solares, pode-se verificar que os diâmetros angulares do Sol e da Lua são aproximadamente iguais.³⁵⁸

Com as hipóteses acima, Aristarco pôde provar (entre outros resultados) as três seguintes proposições ou teoremas.³⁵⁹

1) O Sol está a uma distância da Terra maior que 18, mas menor do que 20 vezes a distância da Lua à Terra.

2) Os verdadeiros diâmetros do Sol e da Lua estão na mesma relação (isto é, apresentam a relação entre 18 e 20).

3) A relação entre os diâmetros do Sol e da Terra é maior que $19/3$ e menor que $43/6$.

O tratado de Aristarco é importante por ser, talvez, a primeira tentativa em medir distâncias astronômicas no sistema solar, e por ser um método geometricamente correto. Antes dele, sabe-se que Eudoxo havia afirmado que o diâmetro do Sol era 9 vezes maior do que o da Lua, e Phidias (pai de Arquimedes) havia obtido o número 12 para essa relação³⁶⁰, mas não se sabe se eles se basearam em medidas ou alguma suposição teórica.

Devido à má qualidade dos instrumentos existentes para medir distâncias angulares, não é surpreendente que os resultados de Aristarco fossem bem diferentes dos valores atuais. Várias determinações são listadas na Tabela 4.1, pelas quais se pode ver que os melhores astrônomos da Antigüidade chegaram muito próximo do valor da distância Terra–Lua, aceito atualmente; contudo, a distância da Terra ao Sol foi por eles subestimada:

³⁵⁷ Isto é 2° . O valor aceito atualmente é, aproximadamente, meio grau. Ver Heath, 311.

³⁵⁸ Crowe, 28; Heath, 337.

³⁵⁹ Pedersen, 48; Heath, 377, 383, 403.

³⁶⁰ Heath, 337.

Tabela 4.1: Distâncias médias entre Terra – Lua e Terra – Sol, em função do diâmetro da Terra³⁶¹.

	<i>TERRA-LUA</i>	<i>TERRA-SOL</i>
<i>ARISTARCO</i>	9 1/2	180
<i>HIPARCO</i>	33 2/3	1245
<i>POSIDONIO</i>	26 1/2	6550
<i>PTOLOMEU</i>	29 1/2	605
<i>MODERNO</i>	30	11740

4.8 O MÉTODO DE ARISTARCO: DISTÂNCIAS

Para estabelecer-se as relações das distâncias Terra – Lua e Terra – Sol, pode-se proceder como se segue: considera-se o instante em que os raios solares iluminam exatamente a metade do disco aparente lunar. Nesse instante, a configuração que tem o sistema Terra–Lua–Sol é a de um triângulo retângulo (ver a Figura 4.2). Nesse triângulo o ângulo θ é igual a 90° . Medindo-se o ângulo α , pode-se determinar a relação entre as distâncias Terra – Sol e Terra – Lua (Aristarco afirmara que a distância Terra – Sol deveria ser maior que 18 e menor que 20 vezes a distância Terra – Lua.)

Aristarco mediu o ângulo α , encontrando o valor de 87° . Sendo $\alpha + \beta + \theta = 180^\circ$ e $\theta = 90^\circ$, chegou a conclusão que $\beta = 3,0^\circ$. Com os ângulos calculados, aplica-se a leis dos senos, isto é:

$$TS / \sin \theta = TL / \sin \beta \quad (4.1)$$

³⁶¹ Pedersen, 48-49; Heath, 350.

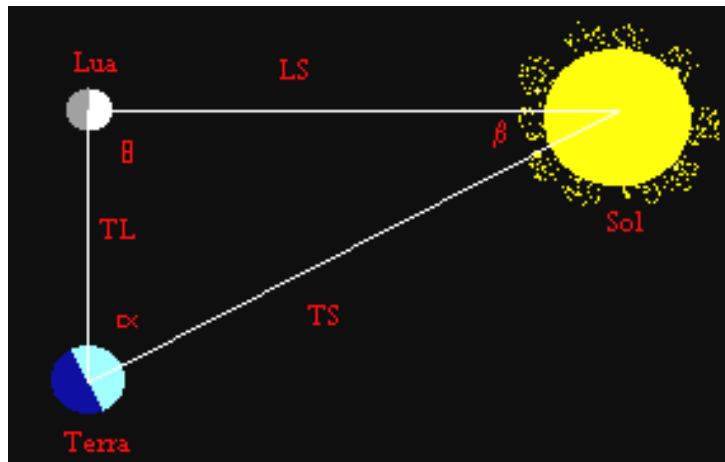


Figura 4.2: O sistema Terra-Lua-Sol formando um triângulo retângulo, quando a Lua encontra-se no quarto minguante ou quarto crescente.³⁶²

ou ainda,

$$TS / TL = 1 / \sin \beta \quad (4.2)$$

Assumindo-se $\beta = 3,0^\circ$, a equação (4.2) fornece $TS / TL \approx 19$. Isto é, a distância Terra – Sol é dezenove vezes maior que a distância Terra – Lua.³⁶³

Atualmente, chega-se a conclusão que $\alpha = 89,85^\circ$, e portanto: $\beta = 0,15^\circ$. Esse valor faz com que $TS/TL = 382$.

Pela segunda e terceira proposições de Aristarco, chega-se à conclusão que: $R_S / R_T = 19$, onde R_S é o raio do Sol e R_T o da Terra.³⁶⁴

³⁶² Crowe, 28; Corral, 61-63.

³⁶³ Para que $TS/TL \approx 20$ deveria ser $\beta \approx 2,8^\circ$, por outro lado, se $TS/TL \approx 18$ deveria ser $\beta \approx 3,2^\circ$. Esses valores concordam com a primeira proposição de Aristarco. Será que o erro cometido pelo astrônomo era de $\pm 0,2^\circ$? Por outro lado, segundo Médiç, o observador terrestre ao observar o Sol, que está nascendo do lado Leste ou se pondo do lado Oeste, comete um erro devido a refração atmosférica que, segundo Bessel, é da ordem de $36' = 0,6^\circ$. A existência da atmosfera terrestre faz com que o nascer de um astro ocorra antes e o ocaso depois das horas previstas do nascer e do ocaso supondo a inexistência da atmosfera terrestre. Ver Roberto Nogueira Médiç, *Astronomia de Posição* (Rio de Janeiro: Forence Universitária, 1989), 115.

4.9 COMPARAÇÃO ENTRE O RAIOS DA TERRA COM OS RAIOS DA LUA E DO SOL

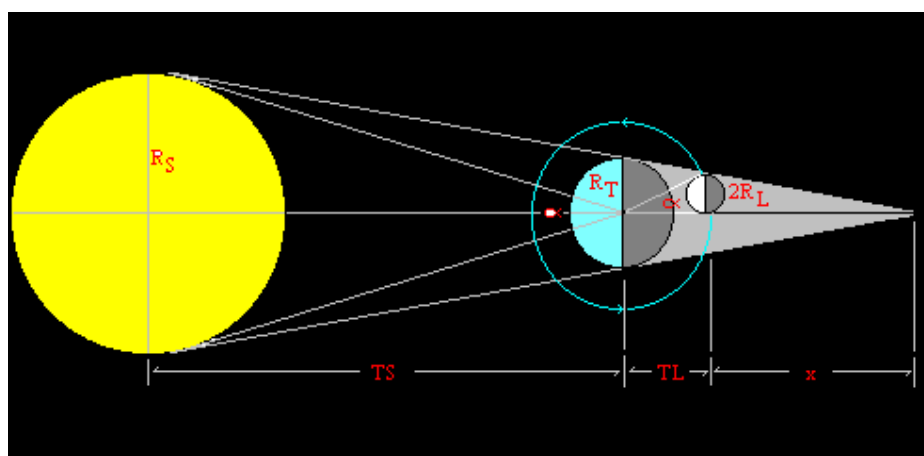
Pela segunda hipótese de Aristarco, a Terra é muito menor que a distância Terra –Lua, assemelhando-se a um ponto. Portanto, pode-se considerar, na Figura 4.2, o observador terrestre localizado no centro da Terra. Por outro lado, nos eclipses do Sol, pode-se observar que os diâmetros angulares do Sol e da Lua são, praticamente, iguais (na Figura 4.3, esses ângulos estão indicados por α).

Assim, os dois triângulos, com vértices no centro da Terra e suas bases formadas pelos diâmetros do Sol e da Lua, são, sensivelmente semelhantes, podendo-se escrever a proporcionalidade:

$$\frac{2.R_S}{TS} \approx \frac{2.R_L}{TL} \quad (4.3)$$

Ou então:

$$\frac{R_S}{R_L} \approx N \quad (4.4)$$



³⁶⁴ Através do conhecimento da razão entre os raios do Sol e da Terra, Aristarco estimava a razão entre os volumes dos dois astros, a saber: $V_S / V_T = (R_S / R_T)^3 \approx 6,9 \times 10^3$. Se o tamanho do Sol é muito maior que o tamanho da Terra, para Aristarco não é razoável que o Sol continue a girar em torno da Terra.

Figura 4.3: A Lua se encontra no cone de sombra da Terra e à distância TL do centro da Terra. Nessa posição o diâmetro da secção reta do cone de sombra é duas vezes o diâmetro da Lua.

onde $N = TS/TL$.

Sendo a razão $TS/TL = 19$, resulta para a razão entre o raio do Sol e da Lua: $R_S / R_L \approx 19$. Isto é, o raio do Sol é dezenove vezes o raio da Lua.³⁶⁵

Na Figura 4.3, os triângulos menor e maior são semelhantes, portanto existe uma proporcionalidade entre seus lados:

$$\frac{x}{4R_L} = \frac{TS + TL + x}{2R_S} \quad (4.5)$$

Assumindo-se na equação (4.5) $TS = N.TL$ e resolvendo a equação em x , tem-se:

$$x = \frac{2(N+1).R_L.TL}{R_S - 2R_L} \quad (4.6)$$

Levando-se, ainda em consideração que $R_S = N.R_L$, obtém-se:

$$x = \frac{2(N+1).TL}{N-2} \quad (4.7)$$

Ainda na figura 4.4, os triângulos menor e médio, igualmente, são semelhantes, portanto:

$$\frac{x}{4R_L} = \frac{TL + x}{2R_T} \quad (4.8)$$

Resolvendo-se a equação (4.10) no raio da Lua, vem:

$$R_L = \frac{R_T}{2} \frac{x}{TL + x} \quad (4.9)$$

Finalmente, substituindo-se a equação (4.7) em (4.9), chega-se às equações:

$$R_L = \frac{(N+1).R_T}{3N} \quad (4.10)$$

e

³⁶⁵ Verifica-se que se $TS/TL = 18$ ou $TS/TL = 20$, a razão entre os raios do Sol e da Lua assumem, respectivamente, os valores 18 e 20, obedecendo a segunda proposição de Aristarco.

$$R_S = N.R_L = \frac{N(N+1).R_T}{3N} \quad (4.11)$$

Sendo $N = 18$, as equações (4.10) e (4.11) fornecem, respectivamente: $R_L/R_T = 19/54$ e $R_S/R_T = 19/3$. Com $N = 20$, as mesmas equações fornecem, respectivamente: $R_L/R_T = 21/60$ e $R_S/R_T = 7$. Estes valores estão de acordo com a terceira proposição de Aristarco.

Após Aristarco, os vários astrônomos que procuraram medir as distâncias da Lua e do Sol até a Terra (e seus tamanhos) utilizaram o mesmo método. Empregaram, no entanto, valores diferentes para as medidas angulares, obtendo resultados bem diferentes dos de Aristarco³⁶⁶.

4.10 ERATÓSTENES E A MEDIDA DO TAMANHO DA TERRA

Aristarco determinou a razão entre o raio (ou diâmetro) da Terra e as distâncias à Lua e ao Sol, mas não procurou medir o próprio tamanho da Terra. Arquimedes se referiu, no *Arenário*, a uma estimativa de que a circunferência da Terra teria 300.000 estádios (um valor mais próximo do atual do que a estimativa de Aristóteles)³⁶⁷. Esse valor parece ter sido obtido por Dicaerchus, aproximadamente 300 a.C. Mas a medida antiga da Terra mais utilizada pelos antigos foi a realizada posteriormente, por Eratóstenes.

Eratóstenes (c. 275 – c. 194 a.C.), quarenta e cinco anos mais jovem que Aristarco, nasceu em Siene, antiga cidade grega estava localizada no país conhecido hoje por Líbia. Depois de estudar em Atenas, passaria o resto de sua vida em Alexandria, onde era responsável pela parte do Museu da famosa biblioteca. Conhecedor profundo de Matemática e da Geografia de sua região, calcularia de maneira simples, porém genial, o raio terrestre³⁶⁸.

Uma descrição a respeito do método empregado por Eratóstenes, na determinação do comprimento do meridiano terrestre, chegou até a presente data

³⁶⁶ Heath, 312-314, 337-350.

³⁶⁷ Heath, 337.

³⁶⁸ Corral, 66.

no trabalho *Teoria das Revoluções dos Corpos Celestes*, de Cleomedes, um estóico que viveu no início de nossa era.³⁶⁹

Eratóstenes determinou o comprimento do meridiano através das seguintes hipóteses:³⁷⁰

- 1) A cidade de Siene se encontra ao Sul de Alexandria (portanto Siene e Alexandria encontram-se no mesmo meridiano);
- 2) A distância entre as duas cidades é de 5000 estádios;
- 3) Siene fica sob o Trópico de Câncer (portanto, ao meio dia do solstício de verão o gnômon não projeta nenhuma sombra);
- 4) A sombra do gnômon na cidade de Alexandria, ao meio-dia do solstício de verão, forma um ângulo com a vertical de $1/50$ de um círculo completo ($360^0/50 = 7,2^0$).

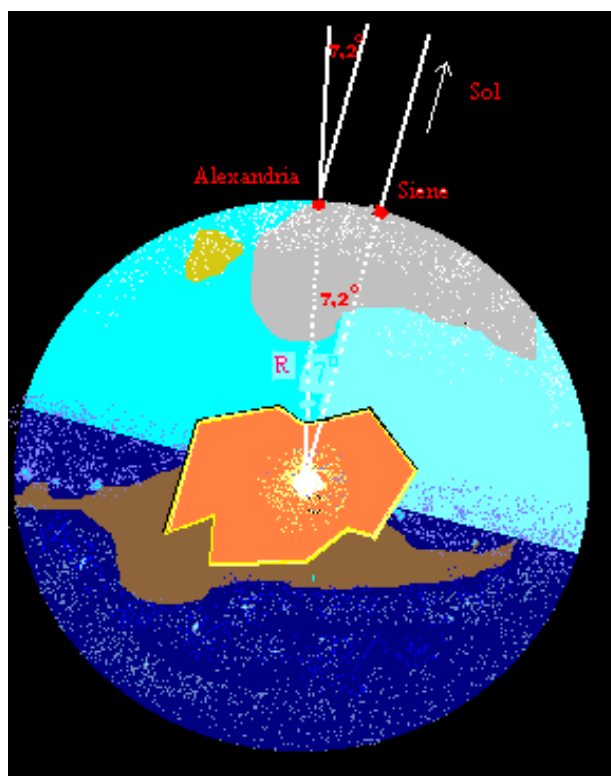


Figura 4.2: A cidade de Siene está localizada a 5000 estádios ao Sul da cidade de Alexandria.

³⁶⁹ Sambursky, 98.

³⁷⁰ Pedersen, 45.

Com essas hipóteses, Eratóstenes calculou o comprimento do meridiano da Terra, suposta esférica, em: $C = 50.500 \times 10^3 = 2,5 \times 10^5$ estádios. O exato comprimento de um estádio não é conhecido mas, assumindo-se que 1 estádio = 157,7 metros, chega-se ao valor de 39,370 quilômetros para o comprimento do meridiano terrestre.³⁷¹ Outros autores citam que o valor obtido por Eratóstenes teria sido de 252.000 estádios.

A partir do trabalho de Eratóstenes, pode-se calcular o raio terrestre, $R_T = C/(2\pi) \approx 4,0 \times 10^4$ estádios, podendo-se avaliar os raios da Lua e do Sol, respectivamente, em $R_L = (N+1)R_T/(3N) = 1,4 \times 10^4$ estádios e $R_S = 19.R_L \approx 2,7 \times 10^5$ estádios.

³⁷¹ Ibid., 45; Crowe, 31; Corral, 66-68.

5 – A Astronomia dos excêntricos, epiciclos e deferentes

5.1 INTRODUÇÃO

Os filósofos gregos, até a época de Aristóteles, não parecem ter possuído ferramentas matemáticas ou conhecimentos detalhados dos fenômenos que lhes permitissem formular teorias astronômicas quantitativas³⁷². Com Eudoxo e Cálipo começa um período de estudos mais avançados dos movimentos celestes, mas os instrumentos geométricos utilizados e os dados a respeito dos movimentos observados ainda eram muito limitados. No século III a.C., após a fundação do Museu de Alexandria, os astrônomos passaram a construir teorias mais sofisticadas, baseadas em observações acumuladas durante várias gerações, utilizando vários tipos de recursos matemáticos sofisticados em suas teorias.

Teria esse desenvolvimento ocorrido por influência do contato entre os gregos e a astronomia de outros povos? Aparentemente não. Não parece ter existido influência egípcia nem babilônica no surgimento da teoria grega dos movimentos dos planetas. No entanto, no período grego e helenístico deve ter ocorrido o uso de *dados* babilônicos, pois os mesmos períodos utilizados na teoria babilônica aparecem nos modelos de Hiparco e Ptolomeu³⁷³.

Assim, os astrônomos gregos certamente utilizaram conhecimentos de seus predecessores do Egito e da Mesopotâmia, mas houve uma mudança importante: ao contrário daqueles astrônomos, os gregos insistiram sobre a necessidade de desenvolver um modelo geométrico para prever os movimentos dos astros³⁷⁴.

De acordo com Otto Neugebauer, a principal diferença entre as teorias dos movimentos dos astros desenvolvidas na Babilônia e as teorias gregas é que estes últimos procuravam teorias que permitissem, em princípio, determinar a posição dos planetas em qualquer instante, a partir de modelos geométricos. Os babilônios procuravam apenas métodos numéricos que permitissem prever o

³⁷² Dreyer, 151.

³⁷³ Neugebauer, *The Exact Sciences in Antiquity*, 157.

³⁷⁴ Bernard R. Goldstein, "Theory and Observation in Medieval Astronomy," *Isis* **63** (1972): 39-47.

momento (ou posição) em que ocorrem certos fenômenos especiais (como paradas e início de retrogressões)³⁷⁵.

A interpretação do aumento de brilho dos planetas (que era particularmente notável nos casos de Vênus e Marte durante os períodos de retrogradação), como uma aproximação à Terra que ocupava o centro do universo, encaminharia a Astronomia para novos modelos, levando ao abandono da teoria das esferas homocêntricas. A hipótese de Heráclides, de que Mercúrio e Vênus giravam em redor do Sol, é um exemplo dessa nova atitude. Pouco depois, surgem novas abordagens na astronomia, utilizando as técnicas matemáticas dos *círculos excêntricos* e dos *deferentes com epiciclos*.

No caso dos círculos excêntricos, supõe-se que o corpo celeste percorre uma circunferência com movimento uniforme, porém o centro dessa circunferência não coincide com o centro da Terra. Isso permite que as distâncias variem, compatibilizando assim a teoria com as observações de mudança de brilho.

No caso dos deferentes com epiciclos, supõe-se que o corpo celeste está preso a um pequeno círculo, chamado “epiciclo”, que gira com velocidade uniforme, e o centro desse epiciclo, por sua vez, é transportado em um círculo maior – o “deferente” – ao redor da Terra, também com velocidade constante.

A idéia de movimentos astronômicos em círculos excêntricos pode ter sido sugerida pelo estudo dos movimentos do Sol e da Lua, pois percebeu-se que suas velocidades angulares em relação à Terra são variáveis, e seus diâmetros aparentes também. A idéia de epiciclos pode ter sido sugerida a partir da teoria de Heráclides, ou pela simples observação de que os planetas possuem paradas e retrocessos, como se oscilassem em torno de um movimento médio uniforme³⁷⁶.

O sucesso alcançado por esses novos modelos astronômicos, mantendo a Terra em repouso no centro do universo, contornava o clássico problema da falta de paralaxe das estrelas fixas, explicava a retrogradação dos planetas e o aumento de seus brilhos quando, no intervalo de tempo da retrogradação, se aproximavam da Terra e, além disso, colocaria o sistema heliocêntrico de Aristarco no esquecimento por quase 1800 anos.

³⁷⁵ Neugebauer, 127.

³⁷⁶ Neugebauer, *A history of Ancient Mathematical Astronomy*, vol. 1, 263.

5.2 APOLÔNIO DE PERGA

Apolônio de Perga (c.262 – c.190 a. C.) foi um importante matemático da Antigüidade. Sabe-se que ele era natural de Perga e que viveu durante algum tempo em Alexandria. Ele foi considerado um matemático de nível equivalente ao de Arquimedes ou Euclides³⁷⁷. O principal trabalho de Apolônio que foi conservado foi seu estudo das seções cônicas (elipse, hipérbole e parábola). Além disso, estudou os poliedros regulares e calculou aproximadamente o número π .

Apolônio também contribuiria com as novas idéias que iam surgindo a respeito do movimento planetário. Ele teria estudado o uso de excêntricos, epiciclos e deferentes na explicação dos movimentos dos astros³⁷⁸. Sua obra iria influenciar as pesquisas de Hiparco, e os trabalhos desses dois astrônomos exerceriam enorme influência sobre os trabalhos de Ptolomeu.

Como ocorreu nos casos de Eudoxo, Heráclides e Aristarco, as informações sobre as contribuições de Apolônio à astronomia são indiretas. A maior parte das obras gregas sobre astronomia, de 400 a.C. até a época de Ptolomeu, foi completamente perdida³⁷⁹. Um dos motivos, segundo Otto Neugebauer, foi que o *Almagesto* continha todos os resultados importantes desenvolvidos anteriormente, tornando aparentemente supérfluo consultar e conservar os trabalhos mais antigos. Algo semelhante ocorreu em relação com os *Elementos* de Euclides, levando à perda da quase totalidade das obras matemáticas anteriores³⁸⁰.

Os comentários astronômicos de Theon e de Pappus, escritos no século IV da era cristã, foram parcialmente conservados, e fornecem muitas das informações disponíveis sobre esse período.

³⁷⁷ *Ibid.*, vol. 1, 262.

³⁷⁸ Crowe, 31; Sambirsky, 86.

³⁷⁹ Neugebauer, *The Exact Sciences in Antiquity*, 55.

³⁸⁰ *Ibid.*, 145.

De acordo com Neugebauer, o conceito de movimentos em círculos excêntricos já existia antes de Apolônio³⁸¹. Quanto aos epiciclos, não se sabe quando foram propostos. Talvez sejam uma proposta do próprio Apolônio. Por outro lado, pode-se também perceber que o modelo de Heráclides já continha, para Vênus e Mercúrio, a idéia básica dos epiciclos.

O estudo *comparativo* dos dois tipos de modelos foi obra de Apolônio, de acordo com Ptolomeu³⁸². Sabe-se, também por Ptolomeu, que Apolônio deduziu o modo de prever os pontos estacionários no movimento de um planeta, pelo modelo de deferente com epiciclo³⁸³.

Não se sabe se Apolônio teve apenas um interesse pelos métodos astronômicos gerais ou se utilizou os recursos dos excêntricos e deferentes com epiciclos para estabelecer teorias detalhadas dos planetas³⁸⁴.

5.3 CÍRCULO EXCÊNTRICO

Apolônio, aproximadamente em 200 a.C., empregou círculos cujo centro não coincidia com a Terra, mas estavam ligeiramente afastados dela – isto é, círculos excêntricos. Supondo que o astro se move uniformemente nesse círculo, seu movimento, visto da Terra, mostraria variações de brilho (porque sua distância varia) e de velocidade angular. A velocidade seria maior quando o astro estivesse mais próximo, e menor quando estivesse mais distante.

Vamos descrever o modelo geométrico do círculo excêntrico (ver a Figura. 5.1). Nesse modelo, o astro se move uniformemente sobre um círculo cujo centro D não coincide com o centro T da Terra (ou com o centro do universo). Suponha que um planeta P se movimenta com velocidade constante no seu próprio círculo, com sentido de Oeste para Leste, em relação às estrelas. Haverá, então, uma posição A (o apogeu) onde P está a distância máxima à Terra, $R + e$, e outra

³⁸¹ Neugebauer, *A history of Ancient Mathematical Astronomy*, vol. 1, 263.

³⁸² *Ibid.*

³⁸³ *Ibid.*, vol. 1, 267.

³⁸⁴ *Ibid.*, vol. 1, 271.

posição B (o perigeu) onde a distância tem um valor mínimo, $R - e$. Aqui, $e = TD$ é a excentricidade, e R é o raio do círculo excêntrico.³⁸⁵

Nesse modelo, supõe-se que o movimento de P é uniforme quando visto do centro D . Expressando-se em termos modernos, isto significa que P tem uma velocidade angular constante ω . Assim, visto de T este movimento será não uniforme, com uma velocidade aparente mínima no apogeu e máxima no perigeu. Este modelo de círculo excêntrico, onde a posição relativa do planeta à Terra é dado (em notação moderna) pelo vetor

$$\overrightarrow{TP} = \overrightarrow{TD} + \overrightarrow{DP}, \quad (5.1)$$

parece simular, pelo menos, duas características do movimento planetário: a variação da distância TP (que permitiria explicar mudanças de brilho e de tamanho aparente) e a variação da velocidade aparente do planeta.³⁸⁶

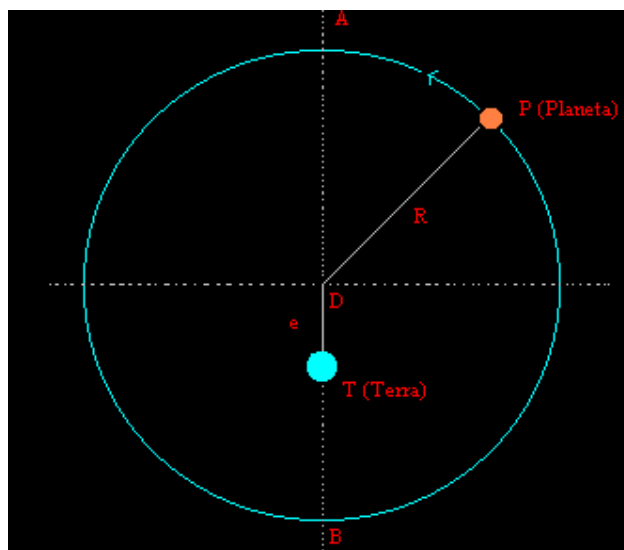


Figura 5.1: O modelo do círculo excêntrico

³⁸⁵ Pedersen, 70; Crowe, 32-33.

³⁸⁶ Pedersen, 70.

5.4 DEFERENTE E EPICICLO

Um outro modelo geométrico, bem diferente, também permite introduzir variações de velocidade angular e de distância, utilizando dois círculos em vez de um único.

Este segundo modelo emprega um círculo de raio R , concêntrico com a Terra, chamado *deferente* (que significa “transportador”) e outro círculo de raio menor r chamado *epiciclo* (ou “ciclo externo”) é mais versátil do que o modelo do excêntrico, permitindo simular o movimento retrógrado dos planetas (que não pode ser descrito com o uso de círculos excêntricos) além de introduzir variações de distância e de velocidade aparente.

O centro C do *epiciclo* se move sobre o deferente com velocidade angular ω_D constante (ver a Figura. 5.2). O planeta se movimenta juntamente com o epiciclo com velocidade angular ω_E , também, constante, onde a correspondente relação matemática (em notação moderna) é:³⁸⁷

$$\overrightarrow{TP} = \overrightarrow{TC} + \overrightarrow{CP}. \quad (5.2)$$

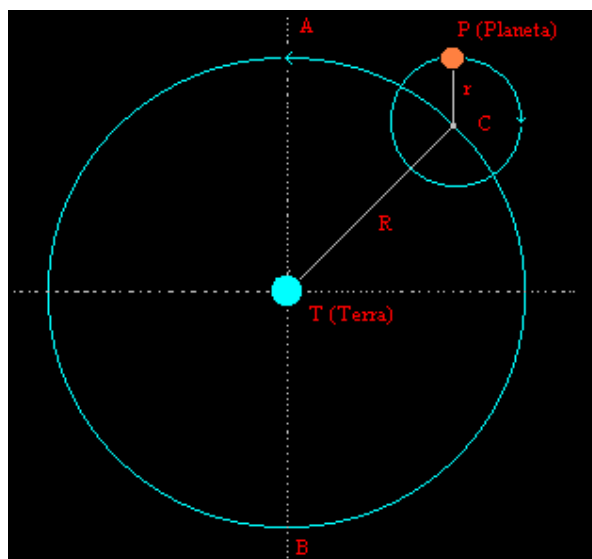


Figura 5.2: O modelo de deferente e epiciclo

³⁸⁷ Ibid., 70-71.

A rotação do epiciclo e a do deferente podem ter o mesmo sentido ou sentidos diferentes; suas velocidades angulares podem ser diferentes; e seus raios são diferentes um do outro. Mudando-se esses parâmetros pode-se obter muitos tipos de movimentos resultantes diferentes.

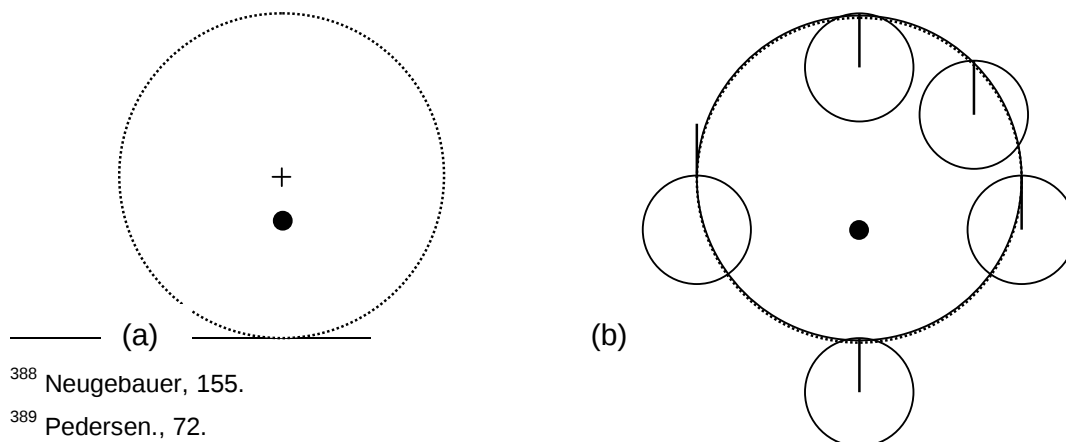
5.5 EQUIVALÊNCIA ENTRE EXCÊNTRICOS E DEFERENTES COM EPICICLOS

Apolônio demonstrou que é possível representar exatamente o mesmo movimento produzido por um círculo excêntrico, através de outro recurso completamente diferente: um epiciclo se movendo sobre um deferente. Isso ocorre no caso em que a rotação do epiciclo e a rotação do deferente são regulados de uma forma especial, com rotações iguais em módulo mas de sentidos opostos³⁸⁸.

Os deferentes com epiciclos, além de reproduzir os efeitos dos círculos excêntricos, podem produzir movimentos de um novo tipo: retrogradações, que não podem ser explicadas utilizando-se apenas excêntricos. Ou seja: o uso de deferente com epiciclo pode produzir efeitos exatamente iguais aos do modelo de círculo excêntrico, mas a recíproca não é verdadeira.

Em linguagem moderna, os dois modelos (da excêntrica e do deferente com epiciclo) serão equivalentes se forem mantidas as igualdades entre os vetores: $\overrightarrow{TD} = \overrightarrow{CP}$ e $\overrightarrow{DP} = \overrightarrow{TC}$.

Para que o deferente com epiciclo seja equivalente ao círculo excêntrico, a velocidade angular do epiciclo deve ser igual em módulo, mas de sentido oposto, à velocidade angular do deferente: $\omega_D = -\omega_E$ ³⁸⁹.



³⁸⁸ Neugebauer, 155.

³⁸⁹ Pedersen., 72.

Figura 5.3: Equivalência entre excêntrico (a) e deferente com epiciclo (b)

Devemos aqui fazer um esclarecimento. Quando examinamos o desenho de um sistema de deferente com epiciclo equivalente a um círculo excêntrico (Figura 5.3), nossa primeira impressão é de que deveríamos descrever o epiciclo como se ele não estivesse girando, pois a reta que une o centro do epiciclo à posição do planeta está sempre na mesma direção. Nesse sentido, de fato, o epiciclo não gira; mas os antigos gregos não pensavam sobre a rotação do epiciclo nesse mesmo sentido. Para os gregos, a rotação do epiciclo é descrita sob o ponto de vista de um observador no centro do círculo. A Lua, que está sempre com a mesma face voltada para a Terra, não tem movimento de rotação, no sentido dos antigos gregos; no nosso sentido atual, a Lua gira em torno do seu eixo com a mesma velocidade angular com que gira em torno da Terra.

A principal utilidade do deferente com epiciclo não era a de substituir o círculo excêntrico e sim permitir explicar outros efeitos. O modelo permitia simular o movimento retrógrado dos planetas, escolhendo uma determinada razão entre os raios do deferente e do epiciclo e tomando para período da rotação do epiciclo o período sinódico do planeta³⁹⁰ e tomando para o período de translação do epiciclo ao longo do deferente o período sideral³⁹¹ do planeta³⁹².

Para determinar a razão entre os raios do epiciclo e do deferente eram feitos cálculos a partir da medida da distância angular entre duas paradas sucessivas do planeta (no início e no final da retrogradação)³⁹³.

Todas as idéias básicas para o uso de excêntricos e epiciclos na astronomia já tinham sido desenvolvidas por Apolônio, aproximadamente 200 a.C.³⁹⁴ Apoiados

³⁹⁰ Período sinódico = tempo médio entre duas conjunções do planeta com o Sol.

³⁹¹ Período sideral = tempo médio necessário para que o planeta retorne à mesma posição em relação à esfera das estrelas.

³⁹² Abetti, 55-56.

³⁹³ Dreyer, 152-155.

nesses conceitos, Hiparco e, depois, Ptolomeu, completariam o desenvolvimento da Astronomia helenística dos excêntricos, deferentes e epiciclos.

5.6 HIPARCO

Hiparco de Nicéia (c.190 – c.120 a. C.) viveu e trabalhou em Alexandria e sobretudo em Rodas, onde construiu um observatório. É considerado um dos maiores astrônomos da Antiguidade e com importantes contribuições à trigonometria. Infelizmente, quase todos os seus trabalhos astronômicos se perderam, conservando-se apenas comentários realizados por outros astrônomos que o sucederam.

Não se sabe muito sobre a vida de Hiparco. A partir das informações de Ptolomeu, pode-se saber que Hiparco fez observações astronômicas entre 161 a.C. e 126 a.C.³⁹⁵ Não se pode ter certeza de que a observação de uma estrela nova, em 133 a.C., teria feito com que Hiparco compilasse seu catálogo de estrelas, como Ptolomeu afirmou no *Almagesto*³⁹⁶.

Das obras escritas por Hiparco, apenas seu *Comentário a Aratos* foi conservado. Esta é uma obra pouco importante, por não discutir os aspectos matemáticos da teoria astronômica. Por isso, a melhor fonte de informações sobre a astronomia de Hiparco é o *Almagesto* de Ptolomeu.

Seguindo as mesmas pegadas de Apolônio, Hiparco fez uso de sistemas excêntricos, deferentes e epiciclos.³⁹⁷ Sabe-se também que ele fez grande número de observações e construiu o mais antigo catálogo de estrelas que conhecemos.

Segundo Neugebauer, a influência babilônica é claramente sentida no trabalho de Hiparco, pois este começa a utilizar os dados astronômicos e a notação sexagesimal daqueles³⁹⁸. Os graus, minutos e segundos que utilizamos hoje em dia são herança desse período.

³⁹⁴ Neugebauer, *A history of Ancient Mathematical Astronomy*, vol. 1, 4.

³⁹⁵ *Ibid.*, vol. 1, 275.

³⁹⁶ *Ibid.*, vol. 1, 277.

³⁹⁷ Crowe, 31.

³⁹⁸ Neugebauer, vol. 1, 4.

5.7 O MOVIMENTO DO SOL

Conhecemos a teoria do Sol desenvolvida por Hiparco porque ela é apresentada por Ptolomeu no *Almagesto*. Ela se baseia no uso de um único círculo excêntrico. Conhecendo-se a duração do ano e os momentos dos equinócios e solstícios, é possível calcular a direção do apogeu e do perigeu, bem como a excentricidade do movimento solar (que era de $1/24$ do raio do círculo). Conhecendo-se esses parâmetros, torna-se possível calcular a posição do Sol em cada dia do ano, e determinar-se sua “anomalia”, que é a diferença entre sua posição verdadeira e a posição em que ele estaria se tivesse um movimento angular uniforme em relação à Terra. O valor máximo dessa anomalia era de $2^{\circ} 23'$.

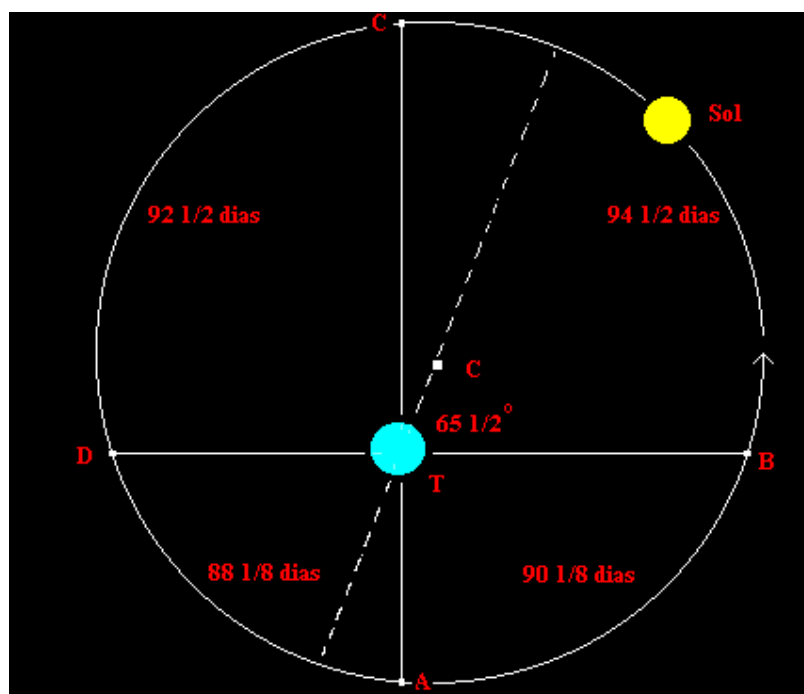


Figura 5.4: A Terra encontra-se deslocada do centro C do movimento circular do Sol. As posições A e C e B e D, da órbita do Sol, representam, respectivamente, os solstícios de inverno e verão e os equinócios de primavera e outono (no hemisfério Norte).

Na Figura 5.4, vê-se o Sol descrevendo um movimento circular e uniforme em torno de seu centro C, com período sideral de $365 \frac{1}{4}$ dias. Contudo, Hiparco sabendo que as quatro estações apresentavam intervalos de tempo diferentes entre si, percebeu que podia explicar essa variação aparente do movimento do Sol deslocando o centro da Terra de um segmento de reta $TC = R/24$, que representa a excentricidade, formando com o segmento de reta TB, do equinócio de primavera, um ângulo de $65 \frac{1}{2}^\circ$. Assim, o Sol percorre a distância AB em $90 \frac{1}{8}$ dias, BC em $94 \frac{1}{2}$ dias, CD em $92 \frac{1}{2}$ dias e DA em $88 \frac{1}{8}$ dias³⁹⁹.

Esse modelo simples e elegante para o Sol, chegou até nós através de Ptolomeu que o manteve inalterado, por proporcionar uma excelente descrição do movimento solar.

A partir do conhecimento moderno a respeito do movimento da Terra, podemos compreender por qual motivo o modelo de Hiparco proporcionou resultados tão bons. Aceitamos atualmente que a Terra se move em torno do Sol com um movimento elíptico. No entanto, a elipse descrita pela Terra não difere muito de um círculo, pois sua excentricidade é de apenas 0,0167 (de acordo com medidas recentes), e por isso a diferença entre o eixo maior e o eixo menor da órbita terrestre é de apenas 0,028%. A não ser por essa diferença minúscula, a órbita da Terra em torno do Sol é portanto uma circunferência. Se descrevermos o movimento do Sol a partir da Terra, teremos o inverso do movimento da Terra, e portanto a órbita do Sol (em uma teoria geocêntrica) deve ser bem descrita por um único círculo.

Na teoria astronômica atual, a velocidade orbital da Terra diminui quando ela se afasta do Sol, de acordo com a lei das áreas de Kepler: a velocidade angular da Terra em relação ao Sol é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles. Assim, uma excentricidade de 0,0167 faz com que, no afélio e no periélio, as velocidades angulares da Terra em relação ao Sol tenham uma diferença de aproximadamente 6,68%. No modelo de círculo excêntrico, a velocidade angular do Sol em relação à Terra, no apogeu e no perigeu, é inversamente proporcional à primeira potência das distâncias. Para reproduzir a variação de velocidade angular de 6,68% com o modelo do círculo excêntrico,

³⁹⁹ Hoskin, 41; Pedersen, 73-75.

seria necessário supor que a excentricidade fosse de $1/30$ – um pouco menor do que o valor de $1/24$ utilizado por Hiparco. De qualquer modo, esse tipo de recurso matemático oferece uma excelente aproximação para a descrição do movimento solar.

5.8 O MOVIMENTO DA LUA

No caso da Lua, a teoria de Hiparco era mais complicada, pois seu movimento não pode ser representado por um simples excêntrico. Hiparco afirmava que a Lua se deslocava sobre um círculo inclinado de 5° em relação ao plano da eclíptica. Servindo-se de uma série de dados alexandrinos e babilônicos sobre os eclipses, ele calculou o mês sinódico (período em que a Lua regressa à mesma posição com relação ao Sol), o mês sideral (período em que a Lua regressa à mesma posição em relação às estrelas), o mês dracônico (intervalo de tempo relativo aos nós, que são os pontos onde a Lua e o Sol são "engolidos" pelo dragão, durante os eclipses), o mês anomalístico (relativo ao apogeu e perigeu) e recorreu às excêntricas para representar este complicado conjunto de movimentos.

Era possível descrever o movimento da Lua por um epíciclo sobre um deferente, ou por um excêntrico cuja linha dos ápsides⁴⁰⁰ girasse⁴⁰¹. No caso do primeiro modelo, o raio do epíciclo era $7/80$ do raio do deferente.

Hiparco constatou que estes cálculos estavam de acordo com as posições da Lua Nova e da Lua Cheia, permitindo fazer boas previsões de eclipses, mas havia discordâncias para as outras posições (por exemplo, Lua Crescente) que ele não conseguia eliminar.⁴⁰²

⁴⁰⁰ A linha dos ápsides é a reta que une o apogeu ao perigeu.

⁴⁰¹ Neugebauer, *The Exact Sciences in Antiquity*, 193.

⁴⁰² Abetti, 57.

5.9 CÁLCULO DA DISTÂNCIA TERRA-LUA E TERRA-SOL

Através da análise de um eclipse lunar, utilizando o método de Aristarco, Hiparco conseguiu determinar que a distância da Terra à Lua era 67,4 vezes o raio terrestre, valor muito próximo daquele que se obtém na atualidade. Por outro lado, através de eclipses solares, chegaria à conclusão que o Sol distava de nós 2490 raios terrestres. Mesmo sendo esta determinação melhor que a obtida por Aristarco, na realidade, era da ordem de dez vezes menor que o valor aceito atualmente.

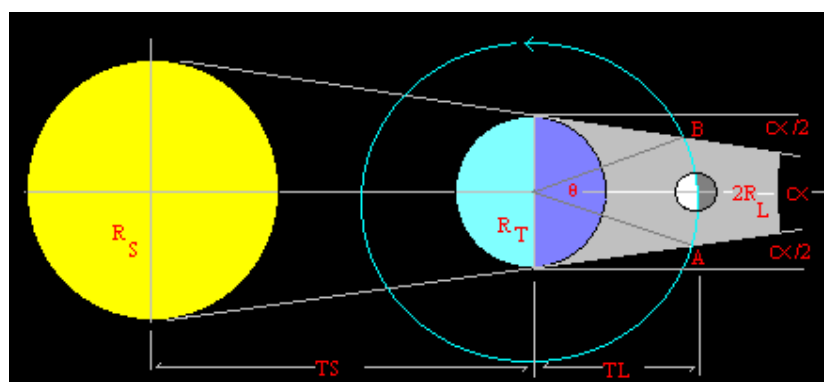


Figura 5.5: Quando a Lua percorre o trecho AB, de sua trajetória circular, de raio TL, encontra-se mergulhada no cone de sombra da Terra.

Os diâmetros angulares do Sol e da Lua são praticamente iguais.⁴⁰³ Esse ângulo que Aristarco havia assumido como sendo de 2° foi corrigido por Hiparco: $\alpha = 0,50^\circ$. Num dos eclipses da Lua, Hiparco mediu o intervalo de tempo empregado pela Lua em atravessar o cone de sombra da Terra, chegando à conclusão que o ângulo correspondente ao arco AB, era, aproximadamente: $\theta \approx 2,5 \alpha$. Posteriormente, Ptolomeu, assumiria para esse ângulo: $\theta \approx 2,6 \alpha$.⁴⁰⁴

Levando-se em conta que a distância Terra – Lua, TL, é muito maior que o raio da Terra, chega-se à conclusão, através da Figura 5.5, que⁴⁰⁵:

⁴⁰³ Crowe, 28; Heath, 337.

⁴⁰⁴ Heath, 337.

⁴⁰⁵ H. Moysés Nussenzveig, *Curso de Física Básica* (São Paulo: Edgard Blücher, 1981), 317-318.

$$2R_T \approx TL (\theta + 2\alpha / 2)$$

$$\approx 3,5 \alpha TL$$

Da igualdade acima, pode-se escrever:

$$TL / R_T \approx 2 / (3,5 \alpha)$$

Segundo Heath, Hiparco obteve o valor $\alpha \approx 0,5^0$ para o diâmetro angular da Lua⁴⁰⁶. Transformado esse ângulo em radianos e substituindo-se na equação acima, chega-se ao valor para a distância Terra – Lua: $TL \approx 65,5 R_T$ que é muito próximo do valor encontrado na Tabela 5.1. Por outro lado, essa mesma distância estimada por Ptolomeu deverá ser calculada pela seguinte equação:

$$TL / R_T = [2 / (3,6 \alpha)]$$

Para Ptolomeu⁴⁰⁷ o diâmetro angular da Lua é, aproximadamente, $\alpha = 0,31'20'' \approx 0,52^0$. Transformando-se esse ângulo em radianos e substituindo-se na equação (5.3), tem-se: $TL \approx 61,1 R_T$, que é muito próximo do valor encontrado na Tabela 5.1.

Usando-se o valor do raio terrestre encontrado por Eratóstenes, a distância Terra – Lua obtida por Hiparco e Ptolomeu são, respectivamente, $2,62 \times 10^6$ e $2,44 \times 10^6$ estádios.

Hiparco e Ptolomeu chegariam, respectivamente, aos seguintes valores para a distância Terra – Lua : $TL = 33,7 D_T$ e $TL = 29,5 D_T$, onde $D_T \approx 8,0 \times 10^4$ estádios é o valor do diâmetro terrestre calculado por Eratóstenes (ver o Capítulo 3, tópico 3.10). Com relação à distância Terra – Sol, Hiparco e Ptolomeu obtiveram, respectivamente, $1245 D_T$ e $605 D_T$.⁴⁰⁸

Tabela 5.1: Distâncias do sistema Terra-Lua-Sol⁴⁰⁹

	$TL \cdot D_T^{-1}$	$D_L \cdot D_T^{-1}$	$TS \cdot D_T^{-1}$	$D_S \cdot D_T^{-1}$
Aristarco	9,5	0,36	180	7,5

⁴⁰⁶ Heath, 337.

⁴⁰⁷ Claudius Ptolemy, *The Almagest* (Chicago: Encyclopaedia Britannica, 1952), Livro VI, 5, 195.

⁴⁰⁸ Heath, 343.

⁴⁰⁹ Ibid. 350.

Hiparco	33,7	0,33	1245	12,3
Posidonio	26,2	0,157	6545	39,3
Ptolomeu	29,5	0,29	605	5,5

Na Tabela 5.1, as quatro colunas fornecem, da esquerda para a direita, a distância Terra – Lua, o diâmetro da Lua, a distância Terra – Sol e o diâmetro do Sol. Todas as distâncias estão relacionadas com o diâmetro da Terra, $D_T \approx 8,0 \times 10^4$ estádios.⁴¹⁰

5.10 O CATÁLOGO DAS ESTRELAS

Outra contribuição de Hiparco foi a compilação de um catálogo contendo aproximadamente mil estrelas, com suas respectivas coordenadas de posição e a estimativa das suas respectivas luminosidades (“grandezas”), que teve uma enorme importância, tanto para os astrônomos contemporâneos como para os astrônomos de épocas posteriores a sua.

Teria Hiparco empreendido este trabalho após o aparecimento de uma *estrela nova*? Atualmente acredita-se que não, mas em relação a esse acontecimento, Plínio, em sua *História Natural*, fez a seguinte referência a Hiparco:

Hiparco, que nunca será venerado em demasia, descobriu uma nova estrela que apareceu em seu tempo. Devido às mudanças ocorridas no dia de sua aparição, começou a se perguntar se o mesmo não ocorria com frequência e se as estrelas que se consideram fixas não poderiam também se mover. Fez algo admirável, contou as estrelas e constelações para as futuras gerações e atribuiu a todas nomes. Com este fim, desenhou instrumentos mediante os quais assinalou a posição e *tamanho* de cada estrela e como resultado disso é fácil distinguir não só se as estrelas estão morrendo ou nascendo, como se movem de seus lugares e se sua luz

⁴¹⁰ Ibid. 350.

está aumentando ou diminuindo. Ele deixou o céu como herança a todos que quiserem tomar posição nele.⁴¹¹

Nesse catálogo, Hiparco dividiu as estrelas em seis classes, de acordo com seus brilhos. As mais brilhantes eram estrelas de primeira grandeza, as que brilhavam um pouco menos de segunda grandeza, até chegar às estrelas mais débeis, no limite visual da vista desarmada, que eram as de sexta grandeza. Esse catálogo, com os nomes, posições e brilhos das estrelas, se converteria numa referência obrigatória na Astronomia antiga. O método que Hiparco estabeleceu para o brilho das estrelas é usado, com algumas modificações, na atualidade⁴¹².

5.11 A PRECESSÃO DOS EQUINÓCIOS

Hiparco procurou estabelecer do modo mais exato possível a duração do ano, para descrever o movimento do Sol. O ano podia ser definido de dois modos

⁴¹¹ Plínio, vol. 2, 26, 95. Sambursky, 79-80.

⁴¹² O método de classificação das estrelas através do brilho, desorientaria, por alguns séculos, os estudantes de astronomia. Quando os astrônomos traduziram o catálogo para o latim, utilizaram a palavra *magnitude*, cujo significado é *tamanho*. Hiparco se referia ao brilho das estrelas e não as suas dimensões geométricas. Assim, a *escala de magnitudes*, é para os astrônomos a escala de brilhos. A segunda fonte de confusão, do catálogo de Hiparco, é que a estrela de maior magnitude é de primeira grandeza, 1; a de segunda grandeza, pouco menos luminosa que a de primeira, é expressa por um número maior, 2; até a menos brilhante, à vista desarmada, com magnitude 6. Ou seja, quanto mais brilhante é a estrela, menor é o número que expressa a sua magnitude. Em princípio isto pode ser pensado como um contra senso, mas pensando nas magnitudes das estrelas como Hiparco: as estrelas mais brilhantes eram as de primeira classe (em importância), a elas se seguiam as de segunda classe (em importância), e assim por diante. Os astrônomos modernos melhoraram o sistema de Hiparco, medindo o brilho das estrelas com aparelhos especiais. Por exemplo, Vega, que na escala de Hiparco é uma estrela de primeira grandeza, 1, na escala de magnitudes atual é muito próxima de zero (0,04). Na escala atual, Sírio, a estrela mais brilhante do céu, tem uma magnitude – 1,42. A Lua e o Sol têm, respectivamente, magnitudes –12,5 e –26,5. Por outro lado, o telescópio de 5,0 m de Monte Palomar pode detectar estrelas até a magnitude 24. Michael A. Seeds, *Fundamentos de Astronomía*. Barcelona: Edições Omega, 1989), 5-6.

diferentes. O ano sideral era o tempo que o Sol demorava para voltar ao mesmo ponto inicial, em relação às estrelas fixas (ou, mais especificamente, em relação ao zodíaco). Por outro lado, o ano trópico era o tempo que o Sol demorava entre dois equinócios ou dois solstícios do mesmo tipo (por exemplo, dois solstícios de verão). Ninguém, antes de Hiparco, parece ter suspeitado que esses dois tempos eram diferentes, mas ele percebeu uma pequena diferença, segundo Ptolomeu:

Como encontrar a duração do ano é a primeira de todas as coisas demonstradas sobre o Sol, aprenderemos primeiramente a partir dos tratados dos antigos as discordâncias e dificuldades sobre suas afirmações a respeito disso, e especialmente de Hiparco, um homem diligente e amante da verdade. Pois ele foi levado a uma dificuldade desse tipo especialmente pelo fato de que, para os retornos aparentes do Sol com respeito aos trópicos [solstícios] e aos equinócios, a duração do ano é encontrada como sendo um pouco menos do que 365 dias e $\frac{1}{4}$, mas para seu retorno com relação às estrelas fixas, encontra-se que é um pouco mais. E a partir daí ele conjecturou que a esfera das estrelas fixas também tem um movimento muito lento, que como o dos planetas ocorre em uma direção oposta à do primeiro movimento que gira o círculo que passa pelos pólos do equador, e a eclíptica⁴¹³.

Assim, quando o Sol retorna ao mesmo ponto de seu próprio círculo, a eclíptica (por exemplo, no solstício de verão), ele está em um ponto ligeiramente diferente do zodíaco. A diferença era muito pequena, e só foi detectada por Hiparco com o uso de observações antigas. Isso significa que a posição da eclíptica estaria mudando, em relação à esfera das estrelas, e que a eclíptica (ou a esfera das estrelas) possuía um movimento antes desconhecido. Esse deslocamento observado por Hiparco e denominado “precessão dos equinócios” era de aproximadamente 1° em 100 anos, ou $36''$ por ano.⁴¹⁴

⁴¹³ Ptolemy, livro III, cap. 1, 77.

⁴¹⁴ Pedersen, 81.

Ptolomeu se refere aos dizeres do próprio Hiparco a respeito da precessão dos equinócios:

[...], como disse Hiparco em sua obra *Sobre a Duração do Ano*:
 "Se por esta razão os solstícios e equinócios mudaram suas posições na ordem inversa dos signos do zodíaco em pelo menos de $1^\circ/100$ por ano, seu deslocamento em trezentos anos deveria ser de pelo menos de 3° ."⁴¹⁵

Percebe-se que Hiparco era extremamente meticuloso em suas medidas e cálculos, e que não hesitava em introduzir hipóteses totalmente novas. Para explicar a precessão dos equinócios Hiparco e Ptolomeu supuseram que o eixo da esfera das estrelas não tem uma posição fixa, mas move-se lentamente, preso em uma outra esfera superior. A idéia de que a esfera das estrelas possui um novo movimento, antes desconhecido, era revolucionária e – principalmente – incômoda, pois quebrava a simplicidade fundamental do movimento anteriormente atribuído a essa esfera.

5.12 CLÁUDIO PTOLOMEU

Depois de Hiparco, a Astronomia grega atingiria o seu maior desenvolvimento no século II da era cristã, com Cláudio Ptolomeu (c. 100 – c. 170). Da vida desse astrônomo sabe-se pouco, como dos seus predecessores. Sabe-se que viveu em Alexandria e realizou observações em Canopus. As observações descritas em suas obras cobrem o período do ano 127 ao ano 151 da era cristã.

Ptolomeu escreveu a *Megale Syntaxis* (ou *Grande Composição*) que seria conhecida no mundo inteiro, através dos árabes, pelo nome de *al-Majisti*, depois corrompida para *Almagesto*. O *Almagesto* foi o tratado de astronomia em que se apresentou uma teoria coerente, completa e com um melhor refinamento de previsão dos movimentos da Lua, do Sol e dos planetas. Uma outra obra atribuída a Ptolomeu, que os astrônomos árabes denominavam de *Kitāb al-Iqtisās*, é As

⁴¹⁵ Ptolemy, livro VII, cap. 2, 227.

Hipóteses dos Planetas, que trata da estrutura física do universo.⁴¹⁶ Acreditamos que não seria um exagero afirmar-se que *O Almagesto* e *As Hipóteses dos Planetas* seriam a síntese e o desfecho de toda a astronomia geocêntrica grega e helenística. Como complemento a esses tratados, Ptolomeu escreveu também alguns trabalhos astronômicos menores, sobre relógios de Sol e tabelas astronômicas⁴¹⁷.

Além dessas obras, Ptolomeu escreveu dois tratados astrológicos, o *Tetrabiblos* (o “livro quádruplo”, também conhecido como *Quadripartitum*) e o *Centiloquium*. Produziu um estudo matemático sobre as proporções musicais, a *Harmonica*, e também um tratado sobre óptica, onde estuda não apenas as reflexões mas também a refração da luz. Outro trabalho importante de Ptolomeu foi uma *Geografia*, que continha uma descrição de todo o mundo conhecido e indicava os processos de construção de mapas. Todas essas obras foram conservadas (totalmente ou em parte), e tiveram enorme influência durante muitos séculos⁴¹⁸.

5.13 O “ALMAGESTO”

O *Almagesto* é uma obra enorme, dividida em 13 livros, que aborda muitos assuntos. A teoria planetária do *Almagesto* contém métodos que permitem calcular a longitude e a latitude celestes dos astros em função do tempo, mas contém outras coisas além disso. O texto trata também dos pontos estacionários, discute a visibilidade dos astros, a paralaxe da Lua, o cálculo de eclipses e muitos outros tópicos⁴¹⁹.

No primeiro livro, Ptolomeu apresentou uma argumentação a favor do repouso da Terra e de sua posição central no universo. Nessa introdução, pode-se notar que Ptolomeu segue, em grande parte, as idéias de Aristóteles. Em seguida,

⁴¹⁶ Claudio Ptolomeo, *Las Hipotesis de los Planetas* (Madrid: Alianza Editorial, 1987), 10 e 15.

⁴¹⁷ Pedersen, 382-383.

⁴¹⁸ Pedersen, 76.

⁴¹⁹ Neugebauer, 191.

Ptolomeu discute os instrumentos matemáticos que vai utilizar, especialmente trigonometria plana e esférica (seguindo o trabalho de Menelau)⁴²⁰.

No segundo livro de sua obra, ele introduz os principais fenômenos do movimento solar durante o ano (equinócios e solstícios), explica os principais círculos celestes, a eclíptica, as mudanças das sombras, latitudes, etc.

O terceiro livro é dedicado ao movimento do Sol, a duração do ano, a explicação do movimento irregular do Sol pelo modelo do círculo excêntrico, tabelas do movimento do Sol, cálculos sobre a duração dos dias.

O quarto livro descreve a teoria da Lua, que é continuada no quinto livro. Neste, ele fornece tabelas do movimento da Lua. Calcula as distâncias e tamanhos da Lua e do Sol e trata também da paralaxe desses astros.

O livro sexto utiliza as teorias da Lua e do Sol para discutir conjunções e oposições desses astros e seus eclipses.

Os livros sétimo e oitavo tratam da esfera das estrelas fixas, descrevendo seu movimento, a precessão dos equinócios, fornecendo tabelas de constelações e discutindo o nascimento e o ocaso helíacos das estrelas e a sua visibilidade.

Os livros nono, décimo e décimo-primeiro descrevem a teoria dos vários planetas, começando pelos fenômenos gerais, os métodos matemáticos de análise, e depois estudando detalhadamente Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter, Saturno. São calculados os parâmetros e construídas tabelas para todos esses movimentos.

O livro décimo-segundo estuda as retrogradações e paradas dos planetas, indicando como calculá-las.

Até este ponto, a teoria dos planetas discute apenas seus movimentos em longitude (isto é, paralelamente à eclíptica). O último livro (décimo-terceiro) estuda seus movimentos em latitude (perpendicularmente à eclíptica).

É impossível descrever aqui toda essa obra. Vamos tratar apenas das idéias básicas da teoria dos movimentos dos astros apresentada por Ptolomeu.

⁴²⁰ Pedersen, 78.

5.14 DEFERENTES EXCÊNTRICOS, EPICICLOS E EQUANTES

Desde Eudoxo até Ptolomeu, os astrônomos estavam procurando uma representação geométrica, precisa, para "salvar as aparências" do movimento dos astros. "Salvar as aparências" no movimento planetário significa, encontrar um modelo matemático capaz de dar conta dos fenômenos astronômicos conhecidos e prever, no futuro, a posição de um determinado planeta, em relação às estrelas fixas⁴²¹. O objetivo dos astrônomos matemáticos era descrever e prever fenômenos, não explicá-los, no sentido de conhecer suas causas reais⁴²².

O modismo astronômico da época de Ptolomeu são: os deferentes excêntricos, os deferentes centrados na Terra e os epiciclos, introduzidos na astronomia por Apolônio e Hiparco, com os quais Ptolomeu se consagraria como um dos astrônomos mais influentes de todos os tempos.

Como a maioria de seus predecessores, Ptolomeu adota o sistema geocêntrico, ou mais precisamente, o sistema geostático, isto é: o centro da Terra, que é imóvel, não está localizado no centro dos orbes dos astros, mas um pouco deslocado desse centro.

No caso do movimento do Sol, Ptolomeu utilizou-se da proposta de Hiparco, descrevendo esse movimento com um círculo excêntrico (ver neste capítulo a seção 5.7).

O modelo desenvolvido por Hiparco para a Lua era adequado para descrever os eclipses lunares, mas Ptolomeu percebeu que ele não representava adequadamente o movimento da Lua nos quartos crescente e minguante. Analisando as diferenças entre os dados observacionais e a teoria, notou que poderia obter uma melhor concordância fazendo com que a Lua estivesse mais próxima da Terra nos quartos crescente e minguante, e mais distante na Lua nova e cheia. Adicionou por isso um círculo excêntrico cujo centro girava em torno da Terra de um modo especial.

O modelo conseguia explicar bem o movimento da Lua em longitude, mas produzia um problema: a distância da Lua nas quadraturas deveria ser aproximadamente a metade de sua distância na conjunção e oposição (Lua nova

⁴²¹ Hanson, 117.

⁴²² Neugebauer, 155.

e cheia), e seu diâmetro deveria portanto sofrer enormes variações durante cada ciclo lunar⁴²³. Ptolomeu não discutiu esse problema, e seus seguidores também o ignoraram, simplesmente porque a teoria era suficientemente boa para prever os movimentos em longitude – e esse era o objetivo da teoria.

Quanto ao movimento dos planetas, não se conhece exatamente a proposta de Hiparco, que não foi mencionada por Ptolomeu, e por isso não se sabe exatamente que modificações ele introduziu. O trabalho de criar os modelos de movimento era feito por aproximações sucessivas. Todos os planetas exibem paradas e retrogradações, por isso exigiam modelos com epiciclos.

Há três parâmetros mensuráveis que são suficientes para estabelecer o modelo de um planeta utilizando deferente com epiciclo: o período sideral do planeta (isto é, o tempo médio que ele demora para voltar ao mesmo ponto do zodíaco); o seu período sinódico (isto é, o tempo médio que ele demora para voltar à mesma posição em relação ao Sol); e a distância angular entre dois pontos estacionários do movimento do planeta. O período sideral fornece diretamente a velocidade do movimento do deferente. O período sinódico dá a velocidade do epiciclo. E a partir da distância angular entre os dois pontos estacionários se pode calcular a razão entre o raio do epiciclo e o raio do deferente⁴²⁴. Com poucas medidas, portanto, pode-se construir uma teoria simples para o movimento dos planetas, que reproduz seus principais fenômenos.

Pode-se compreender o motivo pelo qual o modelo de deferente com epiciclo é uma boa representação dos movimentos dos planetas, partindo-se da teoria que atualmente aceitamos e mostrando como, a partir dela, podemos descrever os movimentos dos planetas em relação à Terra⁴²⁵.

Aceitamos hoje em dia que a Terra e os planetas giram em torno do Sol (ou, mais exatamente, em torno do centro de massa do sistema solar). Vamos supor, por simplicidade, que suas órbitas são circulares e que estejam no mesmo plano. O movimento da Terra em relação ao Sol seria descrito por um vetor $\vec{R}_1$ que gira em torno do Sol, e o movimento de um planeta seria descrito por um outro vetor

⁴²³ *Ibid.*, 195.

⁴²⁴ Dreyer, 152-155.

⁴²⁵ Neugebauer, *The Exact Sciences in Antiquity*, 122-125.

$\vec{R}_2$ que também gira em torno do Sol, com velocidade diferente. A posição do planeta em relação à Terra é dada pelo vetor $\vec{R}_3 = \vec{R}_2 - \vec{R}_1$. Se representarmos por $\vec{R}'_1$ um vetor igual a $-\vec{R}_1$, teremos $\vec{R}_3 = \vec{R}_2 + \vec{R}'_1$. Assim, em relação à Terra a posição do planeta é a resultante de dois vetores que giram, e que representam respectivamente a posição do planeta em relação ao Sol e o inverso da posição da Terra em relação ao Sol. Um deles descreve o deferente, nas teorias gregas antigas, e o outro descreve o epiciclo daquelas teorias.

Na Figura 5.6 abaixo, tomou-se o raio da órbita do planeta como sendo maior do que o da Terra, e por isso o deferente corresponde à órbita do planeta, e o epiciclo corresponde à órbita da Terra. Se o raio da órbita do planeta fosse menor, teríamos o inverso.

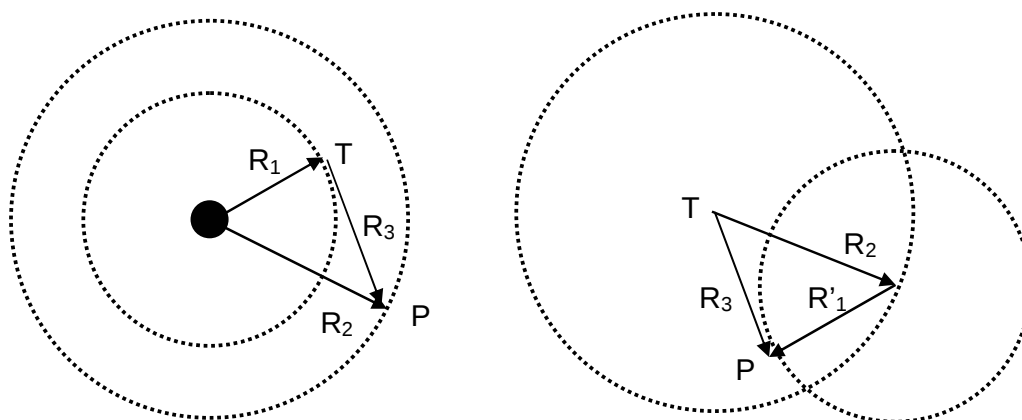


Figura 5.6: Equivalência entre um modelo heliocêntrico com movimentos circulares e um modelo geocêntrico com deferente e epiciclo.

Portanto, o modelo de deferente com epiciclo representaria perfeitamente o movimento dos planetas se eles (e a Terra) tivessem órbitas circulares em torno do Sol. Como os movimentos dos planetas é quase circular, o modelo é uma boa aproximação da realidade. Se fizemos deferentes elípticos com epiciclos elípticos de dimensões adequadas e ajustarmos a velocidade dos seus movimentos de acordo com a lei das áreas, o modelo fornecerá os movimentos dos planetas tão bem quanto a teoria de Kepler.

5.15 ALGUNS EXEMPLOS SIMPLES CONSIDERANDO-SE UM DEFERENTE E UM EPICICLO

Nos exemplos que se seguem, a razão entre os raios do deferente e do epiciclo tem o valor $R_D/R_E = 5/2$ e os movimentos do centro do epiciclo, em torno da Terra, e do planeta, no epiciclo, se realizam no mesmo sentido anti-horário⁴²⁶.

Na Figura 5.11, por exemplo, o planeta dá quatro voltas ($N = 4$) no epiciclo enquanto o seu centro dá apenas uma volta no círculo deferente, no mesmo sentido para Leste. Assim, tem-se a trajetória resultante do planeta com três "laçadas", isto é: o planeta retrograda por três vezes ao efetuar seu período sideral em redor da Terra. A razão entre os raios dos círculos, deferente e epiciclo, foi escolhida arbitrariamente como sendo 5/2 em todas as figuras. À medida que se vai aumentando a razão entre os raios, as "laçadas" se estreitam. Pode-se obter um determinado valor dessa razão, em que o planeta diminui o movimento para Leste, estaciona, em relação ao fundo estrelado, e depois, gradativamente, aumenta seu movimento para Leste, sem efetuar o laço, ao contrário do que é visto na Figura 5.11, em que o planeta completa as laçadas.

⁴²⁶ As trajetórias resultantes dos planetas, indicadas pelas Figuras 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10, foram obtidas com as equações $x = R_D \cos(A) + R_E \cos(B)$ e $y = R_D \sin(A) + R_E \sin(B)$, onde $B = N.A$. Se $N = 0$, o planeta não se movimenta no epiciclo e o deferente dá uma volta em redor da Terra; se $N = 1$, o planeta completa uma volta no epiciclo e o centro do deferente dá uma volta em torno da Terra; se $N = 2$, o planeta dá duas voltas no epiciclo e o centro do deferente dá uma volta em torno da Terra; e assim por diante.

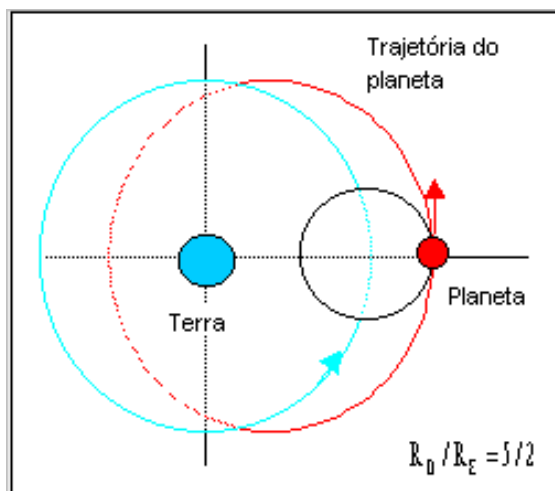


Figura 5.7: O centro do epiciclo descreve o deferente, em torno da Terra, e o planeta não se movimenta no epiciclo, isto é: $N = 0$.

Na Figura 5.7, com $N = 0$ (o planeta não se movimenta no epiciclo e o centro do epiciclo, percorrendo o deferente, dá uma volta em redor do centro da Terra)⁴²⁷, vê-se a trajetória excêntrica do planeta, em relação ao centro da Terra. A posição mais afastada do centro da Terra (do lado direito da figura) é o apogeu e a posição mais próxima (lado esquerdo da figura) é o perigeu.

Na Figura 5.8, $N = 1$ (o planeta dá uma volta no epiciclo, no mesmo sentido e com mesmo período em que o centro do epiciclo completa a volta em redor do centro da Terra). Neste caso, o centro da Terra é o centro do movimento circular e uniforme do planeta.

⁴²⁷ Aqui, não estamos descrevendo as rotações do modo como Ptolomeu e os gregos o fariam (medindo a partir da Terra), mas sim no sentido que, para nós, é mais “intuitivo”. De acordo com os gregos, a Figura 5.7 corresponderia a $N = 1$.

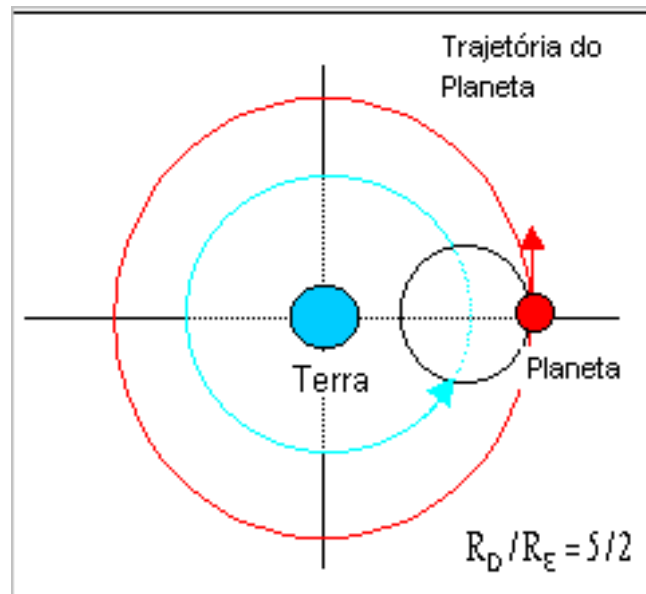


Figura 5.8: O centro do epícolo dá uma volta, em torno da Terra, e o planeta dá uma volta no epícolo, isto é: $N = 1$.

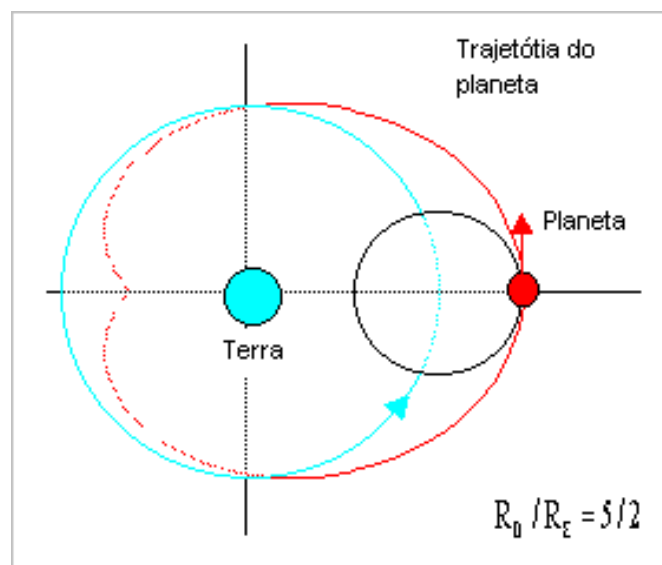


Figura 5.9: O centro do epícolo dá uma volta no deferente, em torno da Terra, e o planeta dá duas voltas no epícolo, isto é: $N = 2$.

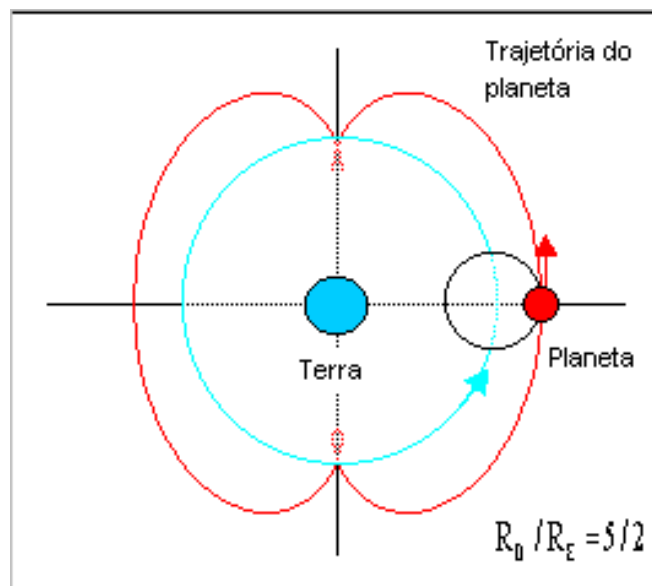


Figura 5.10: O centro do epiciclo dá uma volta, em torno da Terra, e o planeta dá três voltas no epiciclo, isto é: $N = 3$.

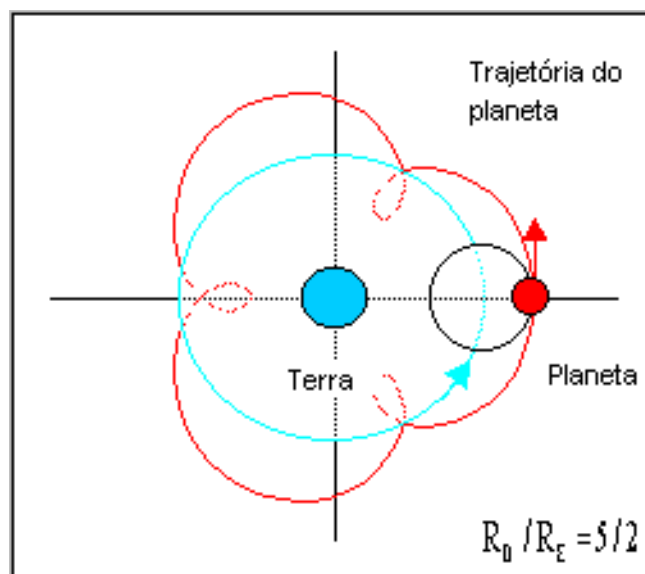


Figura 5.11: O centro do epiciclo dá uma volta, em torno da Terra, e o planeta dá quatro voltas no epiciclo, isto é: $N = 4$.

Aumentando-se o valor da razão dos raios e mantendo-se as mesmas condições iniciais, o trecho da trajetória do planeta em laço fica mais largo. Este fato, além de aproximar o planeta da Terra, poderia ser interpretado como sendo um movimento retrógrado mais longo e mais demorado do planeta para Oeste das estrelas.

Segundo Kuhn:

Se o planeta rodar precisamente três vezes [sic] sobre o seu centro móvel enquanto o deferente roda só uma, e se os dois círculos rodarem na mesma direção, então, o movimento do planeta no interior da esfera das estrelas produzido pelos movimentos combinados do epiciclo e do deferente é precisamente a volta curva mostrada na figura 19b. [...] ⁴²⁸

A figura 19b a que Kuhn se refere é semelhante à Figura 5.11 do presente trabalho. Portanto, a afirmação acima não está correta, se interpretarmos a rotação no sentido atual. O planeta deveria efetuar quatro voltas no epiciclo e o centro do epiciclo dar apenas uma volta no deferente, para se obter a figura proposta por Kuhn. Com apenas três voltas no epiciclo, Kuhn deveria apresentar uma figura semelhante à Figura 5.10. Pode-se aceitar a afirmação de Kuhn, no entanto, contando-se as rotações do mesmo modo que os antigos o faziam.

Nos exemplos que se seguem, a razão entre os raios do deferente e do epiciclo tem o mesmo valor anterior, $R_D/R_E = 5/2$; o movimento do centro do epiciclo, em torno da Terra, se realiza no sentido anti-horário e o movimento do planeta, no epiciclo, se realiza no sentido horário. ⁴²⁹

Assim, com $N = 0$, obtém-se a Figura 5.12, que não é diferente da Figura 5.5, e com $N = 1$, obtém-se um movimento elíptico, conforme a Figura 5.13.

⁴²⁸ Kuhn, 80-81.

⁴²⁹ As trajetórias resultantes dos planetas, indicadas pelas Figuras 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14, foram obtidas com as equações $x = R_1 \cos(A) + R_2 \cos(B)$ e $y = R_1 \sin(A) + R_2 \sin(B)$, onde $B = -N.A$. Se $N = 0$, o planeta não se movimenta no epiciclo; se $N = 1$, o planeta completa uma volta no epiciclo e o centro do deferente dá uma volta em torno da Terra; se $N = 2$, o planeta dá duas voltas no epiciclo e o centro do deferente dá uma volta em torno da Terra; e assim por diante

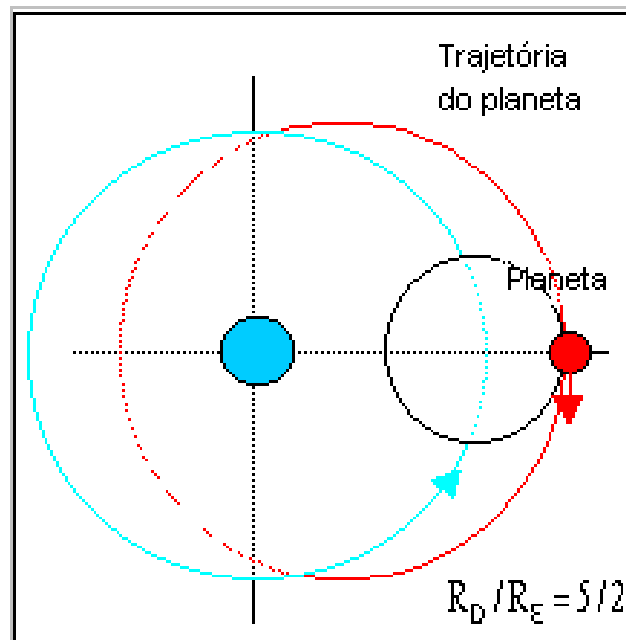


Figura 5.12: O centro do epiciclo dá uma volta, em torno da Terra, e o planeta não se movimenta no epiciclo, isto é: $N = 0$.

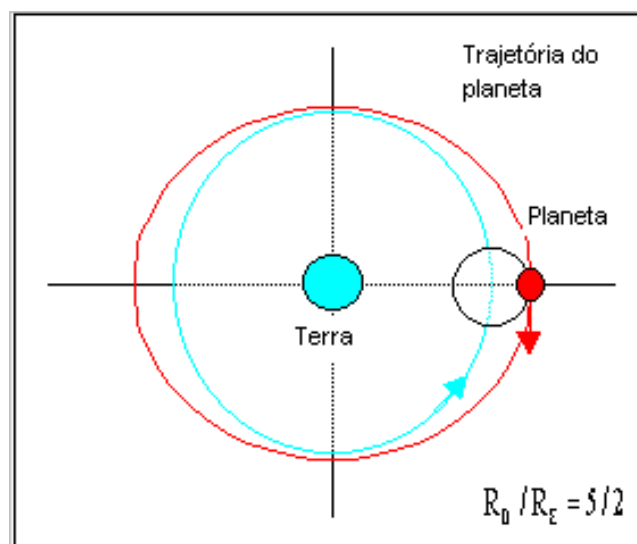


Figura 5.13: O centro do epiciclo dá uma volta, em torno da Terra, e o planeta dá uma volta no epiciclo, isto é: $N = 1$.

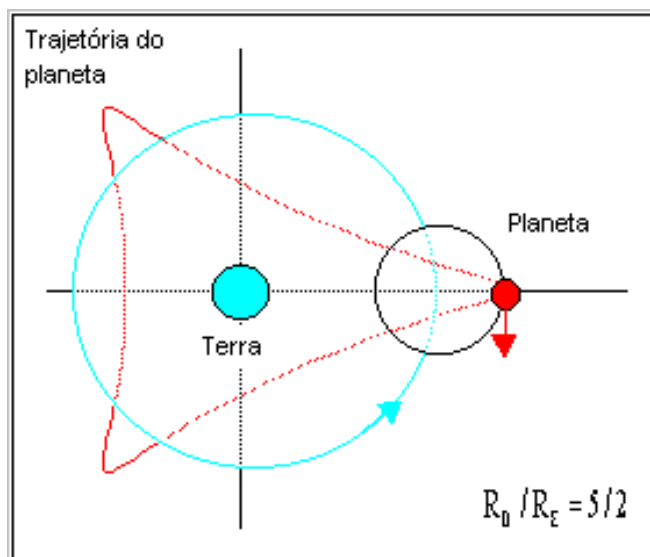


Figura 5.14: O centro do epiciclo dá uma volta, em torno da Terra, e o planeta dá duas voltas no epiciclo, isto é: $N = 2$.

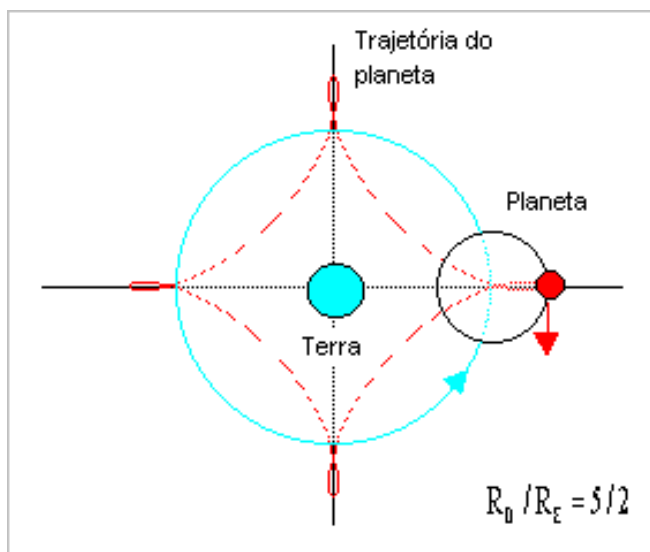


Figura 5.15: O centro do epiciclo dá uma volta, em torno da Terra, e o planeta dá três voltas no epiciclo, isto é: $N = 3$.

Com valores convenientes para as razões entre os raios dos deferentes e dos epiciclos, as figuras 5.14 e 5.15 poderão representar, respectivamente, figuras que se assemelham a um triângulo e a um quadrado. Segundo Hanson⁴³⁰, muitos historiadores e filósofos mostraram-se incrédulos diante destas órbitas de formas

⁴³⁰ Hanson, 124-125.

semelhantes a triângulos e quadrados. Nunca poderiam imaginar que tais órbitas pudessem ser construídas com deferentes e epiciclos.

5.16 OS MODELOS DE PTOLOMEU PARA OS PLANETAS

O modelo de deferente com epiciclo que utiliza círculos e movimentos uniformes não descreve de forma exata os movimentos celestes observados. Pode-se provar que empregando-se um modelo desse tipo, todas as paradas e retrogradações ocorrerão periodicamente, e que o tamanho das “laçadas” (a distância angular entre duas paradas) será sempre a mesma (como se vê nos exemplos que foram mostrados). No entanto, os movimentos dos planetas são muito mais complicados do que isso, não podendo ser descritos adequadamente por um modelo tão simples. As “laçadas” dos planetas variam de tamanho, o que exige supor que o epiciclo não está sempre à mesma distância da Terra – ou seja, que o deferente é excêntrico. Poder-se-ia introduzir sucessivas complicações no modelo, fazendo com que o centro do deferente se desloque, ou introduzindo epiciclos menores que se movem sobre os epiciclos, e isso permitiria melhorar a concordância com os fenômenos.

No entanto, em vez de seguir um método desse tipo, Ptolomeu introduziu uma inovação técnica, que permitiu manter um número relativamente pequeno de círculos e melhorar a teoria. Ou seja: para salvar as aparências observadas no céu, Ptolomeu não só utilizou toda a geometria já usada pelos seus predecessores, como também utilizou um novo princípio, de que a velocidade angular do epiciclo no deferente não é constante em relação ao próprio centro do deferente, mas sim em relação a um outro ponto, chamado *equante*⁴³¹. Esse ponto equante e o centro da Terra estão igualmente distanciados do centro do círculo deferente e, os três pontos, encontram-se alinhados (ver a Figura 5.16).

⁴³¹ Nicolau Copérnico, *Commentariolus*. Com. e Trad. Roberto de Andrade Martins (São Paulo: Nova Stella, 1990), 58.

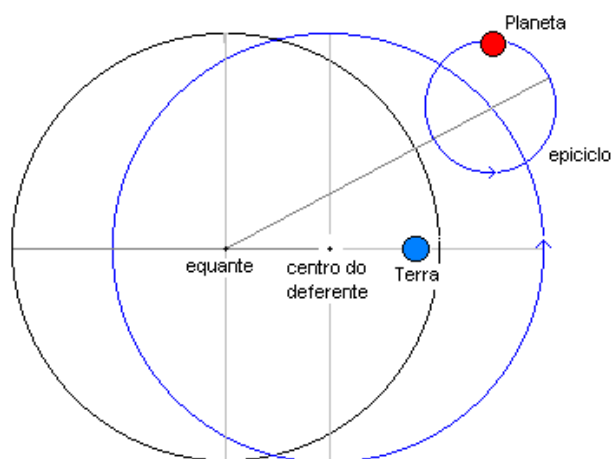


Figura 5.16: Para os planetas (exceto Mercúrio) Ptolomeu utilizou-se de um sistema formado por um deferente excêntrico com equante, associado com um epiciclo.

Note-se que a introdução dos equantes corresponde ao abandono da idéia platônica de que todos os movimentos celestes devem ser o resultado da composição de rotações *uniformes*.

Comparando a teoria astronômica moderna com a de Ptolomeu podemos compreender (de forma anacrônica) o motivo pelo qual o equante melhora a concordância entre teoria e observações. O efeito do equante sobre o movimento do centro do epiciclo é semelhante ao efeito da lei das áreas de Kepler, especialmente no apogeu e no perigeu, como será mostrado a seguir.

Considere um círculo excêntrico com equante, como mostrado na Figura 5.17, e consideremos os movimentos próximos ao perigeu e ao apogeu. A velocidade angular do centro do epiciclo ao longo desse círculo é constante em relação ao equante e não em relação ao centro do círculo, e portanto os arcos AB e CD (subentendidos por ângulos iguais, em relação ao equante) serão percorridos em tempos iguais. Vistos da Terra, os ângulos correspondentes a AB e CD são diferentes, mas as *áreas* correspondentes aos “triângulos” TAB e TCD serão iguais, desde que a excentricidade do círculo seja pequena. Perto do apogeu e do perigeu, o efeito do equante é semelhante ao efeito da lei das áreas de Kepler, e por isso podemos compreender (pela teoria atual) que o equante melhora a concordância entre a teoria e os fenômenos.

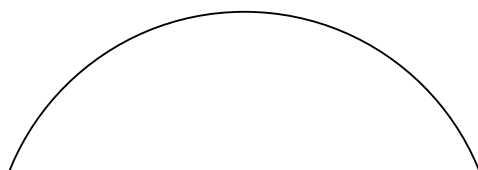


Figura 5.17: Semelhança entre efeitos angulares da lei das áreas e do equante

Ptolomeu indicou os parâmetros para os círculos dos planetas da seguinte forma: o raio do deferente era dividido em 60 partes; o raio do epiciclo e a excentricidade eram dados em função dessas partes, e de seus “minutos” (correspondendo a uma dessas partes dividida por 60). Por exemplo: um epiciclo de 6;30 indica que seu raio era $6/60 + 30/60^2$ do raio do deferente.

Os valores utilizados por Ptolomeu estão indicados na Tabela 5.2, abaixo⁴³².

Tabela 5.2: Raios dos epiciclos, e excentricidade

Planeta	Raio do epiciclo	Excentricidade
Saturno	6;30	3;25
Júpiter	11;30	2;45
Marte	39;30	6;0
Vênus	43;10	1;15
Mercúrio	22;30	3;0

Os períodos sideral e sinódico, que correspondiam aos períodos do movimento do centro do epiciclo no deferente e ao movimento de rotação do epiciclo, eram os indicados na Tabela 5.3.

⁴³² Neugebauer, 207.

Tabela 5.3: Períodos dos movimentos dos planetas (dias)

Planeta	Período sinódico	Período sidereal
Saturno	378,09 dias	10750 d = 29,43 anos
Júpiter	399,04 dias	4332 d = 11,86 anos
Marte	779,94 dias	687 d = 1,88 anos
Vênus	583,94 dias	365,25 d = 1 ano
Mercúrio	115,88 dias	365,25 d = 1 ano

Além do uso de deferentes excêntricos com equantes acompanhados por epiciclos, Ptolomeu utilizou outros recursos adicionais, que melhoravam a concordância com as observações. No caso de Mercúrio, por exemplo, o centro do deferente excêntrico era móvel, girando em torno da Terra⁴³³. Percebe-se, assim, que Ptolomeu estava disposto a utilizar qualquer recursos matemático que fosse necessário para “salvar os fenômenos” adequadamente.

5.17 MOVIMENTO DO PLANETA EM LATITUDE

Em todas as figuras apresentadas anteriormente, da Figura 5.7 à Figura 5.15, o círculo deferente e o epiciclo estão no mesmo plano, que contém também o centro do sistema (a Terra). Se os modelos planetários de Ptolomeu fossem exatamente assim, os planetas (vistos da Terra) se moveriam sempre em um dado plano, e a projeção de seus movimentos contra a esfera das estrelas fixas produziria um círculo máximo. Suas trajetórias, vistas da Terra, seriam linhas semelhantes à eclíptica. No entanto, seus movimentos são mais complicados, e não podem ser descritos por modelos em que o deferente e o epiciclo estão no mesmo plano. Modelos planos fornecem apenas um método simplificado para o cálculo dos movimentos planetários em longitude.

Para explicar o movimento em latitude, Ptolomeu inclinou o plano do deferente dos planetas superiores (Marte, Júpiter e Saturno) em relação ao plano do epiciclo. No caso desses três planetas, o plano do epiciclo permaneceria paralelo

⁴³³ Pedersen, 83.

ao plano da eclíptica e o plano do deferente sofreria uma pequena inclinação em relação a este último. Ptolomeu inclinou o deferente de Marte de 1° em relação ao plano da eclíptica; $1^{\circ} 30'$ o deferente de Júpiter; $2^{\circ} 30'$ o de Saturno.

Para os planetas inferiores (Mercúrio e Vênus) estabeleceu uma geometria um pouco diferente da anterior: seus deferentes estavam no plano da eclíptica e os planos dos epiciclos estavam obliquamente inclinados em relação ao plano do deferente.⁴³⁴

Assim, os modelos de Ptolomeu eram na verdade tridimensionais, e os cálculos das posições dos planetas exigiam o conhecimento de trigonometria esférica. Os desenhos que costumamos ver são apenas uma representação aproximada da verdadeira teoria, que era extremamente complexa.

5.18 DISTÂNCIAS DOS ASTROS À TERRA

O *Almagesto* apresenta a complicada teoria matemática desenvolvida por Ptolomeu, com todos os seus recursos e resultados. Na *Hipótese dos Planetas*, pelo contrário, Ptolomeu descreveu sua teoria de um modo mais simples, apresentando um modelo quase mecânico dos movimentos celestes e introduzindo um aspecto que não havia sido discutido no *Almagesto*: as distâncias dos vários planetas à Terra.

A idéia básica da *Hipótese dos Planetas* é que todos os movimentos celestes são produzidos pela rotação de cascas esféricas, encaixadas umas nas outras⁴³⁵. Não se trata, no entanto, de uma nova versão da teoria de Eudoxo. As esferas de Ptolomeu não possuem seus centros coincidentes com o centro da Terra (são excêntricas), e nessas cascas esféricas existem certos “tubos” por onde rodam esferas menores, correspondentes aos epiciclos. Esse modelo permite introduzir de forma mais concreta, mecânica, todos os recursos utilizados na teoria abstrata e matemática do *Almagesto*. Apenas os equantes ficam sem uma interpretação clara nesse modelo.

⁴³⁴ Ibid., 159-160.

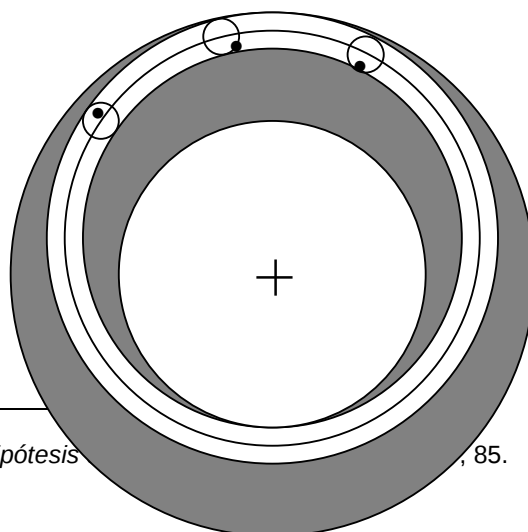
⁴³⁵ Pedersen, 87-88.

O modelo da *Hipótese dos Planetas* adota algumas concepções físicas de Aristóteles, como por exemplo a inexistência de espaços vazios. As várias cascas, tubos e esferas rolantes se encaixam perfeitamente umas nas outras, sem deixar lacunas.

Vejamos o que diz o próprio Ptolomeu a respeito desse assunto:

[...], não há espaços vazios entre as distâncias maiores e menores (de esferas adjacentes), e as superfícies que separam uma esfera da outra não diferem das quantidades (já mencionadas). Esta é a mais plausível das configurações, porque não se pode conceber que na natureza exista espaço vazio ou coisas sem sentido ou inúteis. [...] ⁴³⁶

Cada planeta, na teoria de Ptolomeu, tem uma distância variável em relação à Terra, por dois motivos: primeiramente, por causa dos deferentes excêntricos; em segundo lugar, por causa dos epiciclos. Há uma distância mínima da Terra que eles podem atingir em seus movimentos (perigeu) e uma distância máxima (apogeu), limitadas pela estrutura do deferente e do epiciclo. Na *Hipótese dos Planetas*, Ptolomeu considerou que a cada planeta corresponderia uma casca esférica (orbe) cujo raio mínimo seria a distância do planeta no perigeu, e cujo raio máximo seria a distância do planeta no apogeu (Fig. 5.18). Dentro dessa casca, de certa espessura, existia um tubo (que podemos comparar a uma câmara de ar de pneu), excêntrico, dentro do qual rolava a esfera que transportava o planeta.



⁴³⁶ Ptolomeo, *Las Hipótesis*, 85.

Figura 5.18: O modelo dos orbes na *Hipótese dos Planetas*

Logo após o orbe ocupado pelo mecanismo de um planeta viria o orbe do planeta seguinte. Ou seja: logo depois da casca esférica onde Júpiter se move, viria a casca esférica correspondente a Saturno, sem nenhum espaço vazio ou inútil. Dessa forma, o apogeu de Júpiter corresponde ao perigeu de Saturno, e assim por diante. A ordem dos planetas, segundo Ptolomeu, é: Lua, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno.⁴³⁷

A teoria do *Almagesto* permitia calcular apenas as *razões* entre as diversas dimensões dos círculos envolvidos no movimento de cada planeta (como vimos, Ptolomeu calculou a excentricidade (como uma fração do raio do deferente) e o raio do epiciclo (como outra fração do raio do deferente). Podia-se também calcular a razão entre a distância máxima do planeta à Terra (no apogeu) e a distância mínima (no perigeu). Mas o próprio valor desses raios não tem nenhuma função na teoria matemática, que tem apenas o objetivo de prever ângulos mensuráveis.

Com a hipótese adicional da *Hipótese dos Planetas* de que o apogeu de um planeta corresponde ao perigeu do planeta seguinte, no entanto, torna-se possível relacionar os parâmetros dos vários astros entre si. Ainda mais: como as distâncias da Lua e do Sol à Terra tinham sido medidas, esses valores podiam ser utilizados para determinar as distâncias dos outros planetas à Terra. Por exemplo: a distância média da Lua à Terra havia sido medida, e o modelo matemático de Ptolomeu estabelecia uma razão entre suas distâncias máxima e mínima. Podia assim calcular o valor dessas distâncias. A partir desses dados, ele calculou que a distância mínima da Lua à Terra era de 33 raios terrestres, e a máxima de 64 raios terrestres (Tabela 5.4).

⁴³⁷ *Ibid.*, 36.

Tabela 5.4: Distâncias máxima $d_{\max}$ e mínima $d_{\min}$ dos planetas⁴³⁸

Esfera	$d_{\min}$	$d_{\max}$	$d_{\max}/d_{\min}$
Fogo e ar	1	33	
Lua	33	64	
Mercúrio	64	166	88/34
Vênus	166	1079	104/16
Sol	1160	1260	
Marte	1260	8820	7/1
Júpiter	8820	14187	37/23
Saturno	14187	19865	7/5
Estrelas fixas	19865		

Portanto, o planeta seguinte (Mercúrio) deveria ter uma distância mínima à Terra correspondente também a 64 raios terrestres⁴³⁹. Sabendo a razão entre as distâncias máxima e mínima de Mercúrio, Ptolomeu calculou sua distância máxima à Terra: 166 raios terrestres. Essa deveria ser também a distância mínima de Vênus. E assim por diante.

A distância máxima de Saturno deveria coincidir com a distância mínima da esfera das estrelas. Ptolomeu não dá nenhuma indicação sobre a espessura dessa esfera.

Deve-se notar um resultado extremamente interessante: esse método, partindo do conhecimento da distância da Lua, permite determinar a distância do Sol à Terra, por um processo completamente independente do método de Aristarco. Há uma razoável concordância entre os resultados que Ptolomeu obteve pelo método da *Hipótese dos Planetas* e as medidas de Hiparco para a distância do Sol à Terra, o que deve ter sido considerado na época um grande sucesso e uma importante confirmação da validade da teoria. Note-se que, se Ptolomeu colocasse Mercúrio e Vênus acima do Sol, não poderia ter obtido esse tipo de concordância. Assim, pode ser que Ptolomeu tenha considerado que esses

⁴³⁸ *Ibid.*, 37.

⁴³⁹ Pedersen, 88.

cálculos “provavam” que Mercúrio e Vênus estavam entre a Lua e o Sol, pois ele assim se exprime:

Pelo que foi citado anteriormente, é necessário que Mercúrio e Vênus estejam situados entre o Sol e a Lua, e não acima do Sol, para que este grande espaço [entre a Lua e o Sol] não fique vazio, como se poderia deduzir das distâncias, pois se assemelharia a algo que a natureza tivesse deixado, recusado e não utilizasse [...]⁴⁴⁰

5.19 O UNIVERSO DE PTOLOMEU

A estrutura completa do sistema astronômico de Ptolomeu é bastante complexa. Cada planeta tem um movimento principal, que acompanha o movimento da esfera das estrelas fixas, e muitos outros movimentos secundários. A própria esfera das estrelas fixas teria dois movimentos (o de rotação diária e o da precessão dos equinócios).

Computando-se todos os movimentos, a Lua precisaria de 5 esferas para descrever todos os seus movimentos; 8 esferas para o movimento complicado de Mercúrio; 4 para o movimento do Sol; e 6 esferas para cada um dos planetas Vênus, Marte, Júpiter e Saturno⁴⁴¹. O resultado está resumido na tabela abaixo. Ao todo, o universo de Ptolomeu seria constituído por 43 esferas (ou movimentos circulares).

Tabela 5.5: Número de esferas no universo de Ptolomeu

Para o movimento de:	Número de esferas
Estrelas	2
Lua	5
Mercúrio	8
Vênus	6

⁴⁴⁰ Ptolomeo, 97.

⁴⁴¹ *Ibid.*, 43.

Sol	4
Marte	6
Júpiter	6
Saturno	6
Total	43

A teoria de Ptolomeu era, assim, muito complexa. Mas essa complexidade não era gratuita ou fruto de especulações, e sim o resultado de uma tentativa sistemática de explicar quantitativamente todos os detalhes conhecidos dos movimentos celestes.

6 – A Astronomia na Idade Média

6.1 INTRODUÇÃO

Como foi descrito no capítulo anterior, a astronomia grega teve sua continuação no Egito helenístico. Foi lá, em torno da escola de Alexandria, que foram formuladas as mais importantes teorias astronômicas da Antigüidade. Paralelamente a esse desenvolvimento, os romanos começaram a sua expansão, dominando grande parte do mundo conhecido.

No mundo romano, não parecem ter surgido teorias astronômicas originais, nem estudos observacionais importantes. As idéias encontradas são de origem grega. Encontramos autores como Marcus Manilius (séc. I a.C.) cuja *Astronomica* apresenta uma boa descrição dos aspectos mais gerais da astronomia, mas cujo interesse principal era a astrologia; ou Vitruvius (séc. I a.C.), que descreve as idéias astronômicas básicas em sua obra sobre a arquitetura, para depois se referir a relógios de Sol e às sombras. Plínio, o Velho (c. 23 – 79 d.C.), também incluiu um livro sobre astronomia na sua enciclopédica *História Natural*, mas não fornece nenhum detalhe sobre as teorias astronômicas quantitativas.

Em Alexandria, após a época de Ptolomeu, parece não ter surgido também nenhum outro trabalho astronômico importante. No século III d.C. o principal interesse no mundo helenístico tinha se transferido do mundo natural para o mundo do espírito, com o desenvolvimento do neo-platonismo⁴⁴². A partir de então, encontram-se apenas alguns comentadores de obras clássicas, como Proclo, Filoponos e Simplicio, que apresentam algumas idéias originais, mas não produzem nenhum trabalho astronômico sistemático.

Segundo Kuhn⁴⁴³, o declínio ocidental da ciência antiga ocorrera em duas fases: na primeira, um lento declínio da qualidade e da quantidade de atividades científicas; na segunda, um desaparecimento lento e constante do saber tradicional. Após o século II, a.C., a civilização grega que habitava a região do mediterrâneo foi dominada pela expansão romana e decairia, posteriormente,

⁴⁴² Pedersen, 151.

⁴⁴³ Kuhn, 124

com o declínio da hegemonia romana durante os primeiros séculos da Era Cristã. Após Aristóteles, que fora um dos últimos grandes cosmólogos da Grécia antiga, e Ptolomeu, que após cinco séculos, aproximadamente, seria um dos últimos de seus grandes astrônomos, a maioria dos trabalhos científicos do Ocidente, sobre a Astronomia, se resumia a comentários e enciclopédias sobre a Astronomia grega.

É preciso reconhecer que esses escritos, embora não contenham idéias originais, possuem certa importância. No início do século V, por exemplo, Ambrosius Theodosius Macrobius escreveu um famoso comentário ao “Sonho de Cípião” de Cícero onde apresentou muitos detalhes da astronomia antiga, e seu relato permitiu que pensadores posteriores se familiarizassem com a teoria geoheliocêntrica atribuída a Heracleides⁴⁴⁴. No mesmo século, Martianus Capella, que viveu em Cartago, no norte da África, escreveu “As Nupcias de Filologia com Mercúrio”, onde apresentava um resumo das sete artes liberais (gramática, dialética, retórica, geometria, aritmética, astronomia, harmonia – isto é, música). Sua obra foi muito usada na Idade Média (principalmente a partir do século IX), servindo posteriormente com base para a estruturação dos estudos liberais nas universidades. Na parte astronômica de sua obra, Capella também descreve a teoria de que Vênus e Mercúrio giram em torno do Sol. O trabalho de Proclo, também dessa mesma época, será descrito mais adiante (seção 6.2).

No final do século IV os hunos iniciaram a invasão da Europa, e em 476 d.C. o último imperador do Império Romano foi deposto pelos “bárbaros”. Antes disso, no entanto, os cristãos haviam obtido aceitação e depois reconhecimento oficial no Império Romano, e os estudos sobre a natureza haviam começado a ser criticados ou, pelo menos, desprezados⁴⁴⁵.

Santo Agostinho (354 – 430), nascido na África romana, que fora neoplatonista, maniqueísta⁴⁴⁶ e cristão, exerceria uma grande influência sobre o pensamento cristão. Essa combinação, em Agostinho, do pensamento *platônico* e das *Epístolas de São Paulo*, geraria um pensamento religioso, popular,

⁴⁴⁴ Pedersen, 366.

⁴⁴⁵ Dreyer, 207-213.

⁴⁴⁶ Doutrina fundada por Mani ou Maniqueu (século III), na Pérsia, que se fundamenta em princípios opostos: por exemplo, do bem e do mal.

preocupado com a vida que se levava e as possíveis penas que se deveria pagar após a morte. Santo Ambrósio, bispo da cidade de Milão, em suas pregações dizia:

Discutir a natureza e a posição da Terra não nos auxilia em nossa esperança de vida futura.⁴⁴⁷

E dos seguidores de Artemon disse que:

[...] perderam de vista o céu enquanto tentavam medir a Terra.⁴⁴⁸

Com essa diretriz, parte do mundo cristão passaria a odiar o ensinamento pagão, com lamentáveis conseqüências: aproximadamente no ano 390, uma parte da Biblioteca de Alexandria foi queimada por ordem do Bispo Teófilo; em 415, Hipácio, um dos maiores matemáticos dessa época, em Alexandria, foi assassinado por uma multidão, com extrema crueldade, instigada, provavelmente, pelo Patriarca Cirilo.⁴⁴⁹

Independentemente da queda do Império Romano, os estudos científicos (incluindo a astronomia) estavam já decadentes na Europa, no século IV. No ano de 529 foi fechada a Academia de Platão.⁴⁵⁰ O pensamento antigo foi sendo esquecido ou criticado, e aproximadamente em 550, Kosmas Indicopleustes escreveu uma obra em que defendia a idéia de que a Terra era plana, negava a possibilidade de antípodas e criticava a hipótese de que a Terra estivesse suspensa no meio do universo⁴⁵¹.

Essa foi uma visão de mundo muito difundida, até o Renascimento. A maioria das pessoas, mesmo cultas, sem contudo conhecerem os argumentos dos antigos astrônomos gregos ou se opondo a eles, acreditava que a Terra fosse plana ou defendia essa forma geométrica. A idéia de uma Terra plana, além de

⁴⁴⁷ William C. Dampier, *Pequena História da Ciência* (São Paulo: IBRASA, 1961), 46-47.

⁴⁴⁸ Ibid., 47.

⁴⁴⁹ Ibid., 47.

⁴⁵⁰ Ibid., 49.

⁴⁵¹ Dreyer, 214-215.

estar de acordo com a interpretação literal da Bíblia, respondia muito bem às exigências impostas pelo sentido comum de pessoas que não se deslocavam de seus lugares de origem, ou o faziam em forma muito limitada. Vejamos o que se perguntava Lactâncio que, com bases unicamente teológicas e em tom zombeteiro, criticava a ciência aristotélica, opondo-se abertamente à idéia de uma Terra esférica:

Existirá alguém tão extravagante que crê que os homens têm pé por cima da cabeça, o incrível para nós que estamos colocados por baixo? Que as ervas e as plantas cresçam para baixo, e que as chuvas, o granizo e a neve sobem da Terra?⁴⁵²

Após a desintegração do Império Romano, a tradição grega foi preservada no Império Bizantino, onde o idioma grego ainda se mantinha vivo⁴⁵³ e os autores antigos eram lidos⁴⁵⁴. Não se conhece a história da ciência bizantina, no entanto, e não há notícia de que tenham produzido algum astrônomo relevante. Para nós, a grande importância da cultura bizantina foi a preservação do pensamento antigo.

Uma parte do pensamento astronômico grego e helenístico foi também conservado na Índia. Antes da era cristã, os indianos haviam desenvolvido uma astronomia própria, associada à religião e à astrologia, com fortes influências mesopotâmicas. Como no caso da astronomia babilônica e da egípcia, os indianos não dispunham de teorias geométricas para explicar os movimentos celestes. No século II d.C. (ou, talvez, antes) a astronomia desenvolvida em Alexandria chegou à Índia e em torno do ano 500 os indianos produziram obras que mostravam total domínio sobre os métodos de Ptolomeu⁴⁵⁵. São conhecidos alguns astrônomos indianos importantes a partir dessa época, como Aryabhata, Latadeva e Varaha Mihira (séc. VI) e, posteriormente, Brahmagupta (século VII), cujas obras foram conservadas.

⁴⁵² Corral, 89-91.

⁴⁵³ O idioma falado popularmente na região era, no entanto, o sírio.

⁴⁵⁴ Pedersen, 151.

⁴⁵⁵ *Ibid.*, 152.

As teorias desenvolvidas pelos astrônomos indianos dessa época eram essencialmente semelhantes às do *Almagesto*, mostrando alguns avanços matemáticos (como o desenvolvimento da trigonometria, introduzindo por exemplo o “seno”), criação de séries para cálculos matemáticos, etc. O uso de deferentes excêntricos com epiciclos não parece ter tido muita popularidade naquela região; davam preferência a deferentes concêntricos à Terra, com epiciclos⁴⁵⁶.

6.2 OS COMENTÁRIOS DE PROCLOS

Ao apagar das luzes do mundo antigo, encontramos um importante pensador que deve ser mencionado: Proclo de Lycia (c. 412 – 485 d.C.). Ele foi um filósofo neo-platônico que ensinou na Academia de Atenas, três séculos depois da época em que Ptolomeu compôs suas obras. Proclo escreveu um comentário ao primeiro livro dos *Elementos* de Euclides, uma exposição sobre as teorias astronômicas, uma obra sobre a física aristotélica e comentários ao *Timeu* e à *República* de Platão. Era um pensador que tinha bom domínio tanto sobre a matemática quanto sobre a filosofia. A obra de Proclo teve enorme influência mais tarde – especialmente a partir do Renascimento, quando o neo-platonismo foi redescoberto na Europa e os textos clássicos foram traduzidos para o latim por Marsilio Ficino (1433-1499), com o patrocínio de Cosimo de Medici.

Proclos discutiu com bastante detalhe os modelos astronômicos que tentavam salvar os fenômenos através de excêntricos, epiciclos e modelos semelhantes. Para Proclo (como para Platão) os astros eram seres divinos e, por isso, seu movimento não devia ser explicado por meros mecanismos:

Como foi dito nas *Leis*, grande é o erro daqueles que ousam associar movimentos erráticos aos deuses celestes, desconhecendo assim como é ordenada e harmoniosa sua dança cíclica, como seu movimento é uniforme. A anomalia que neles aparece é devida somente aos sentidos contrários de suas revoluções diretas e

⁴⁵⁶ *Ibid.*, 153.

retrógradas, que são explicadas [pelos matemáticos] por epiciclos, por círculos excêntricos ou por outras causas. Na realidade, essas hipóteses não são sequer prováveis, algumas se afastando da simplicidade dos seres divinos, outras – as que foram inventadas mais recentemente – tornando o movimento dos corpos celestes uma coisa tão artificial quanto o aparecimento de um deus no teatro⁴⁵⁷.

Quanto à hipótese dos epiciclos, coloquemos que é uma coisa completamente absurda [...]. Além disso, o universo não se parece com um mecanismo artificial, mas é algo natural. Ora, com os epiciclos, são introduzidos muitos mecanismos artificiais. Se de fato concebemos certos pequenos círculos sobre os quais se encontram os astros, pequenos círculos que se movem sobre circunferências homocêntricas, seria um grande absurdo imaginar círculos no céu, e não corpo, girando. E se concebemos certos corpos esféricos presos às esferas e movidos por elas, e astros sobre esses corpos, isso é ainda mais impossível e mais fictício: isso corresponde exatamente a representar os astros como transportados em certos carros, como se não pudessem se mover por si próprios e precisassem ser transportados por outras coisas. É portanto ridículo que, no desejo de salvar a regularidade do movimento, se pense em ter sucesso com a multiplicação dos corpos que se movem⁴⁵⁸.

Proclus apresentou interessantes críticas filosóficas à teoria de Ptolomeu. No caso dos modelos de deferentes com epiciclos, ele comentou que o movimento desses círculos exigiria ou que houvesse espaços vazios no céu (para que os epiciclos pudessem se deslocar pelo espaço), o que era contrário ao pensamento de Platão e de Aristóteles; ou deveriam existir certos corpos parados no céu (como no caso da *Hipótese dos Planetas*, em que existem estruturas paradas nos

⁴⁵⁷ Proclus, *Commentaire sur le Timée*, vol. 4, 79.

⁴⁵⁸ Proclus, *Commentaire sur la République*, vol. 3, dissertação XVI, 184.

orbes de cada planeta)⁴⁵⁹. Mas como poderiam existir corpos celestes parados, se a tendência natural dos corpos celestes é girar?

Outro problema filosófico é a pluralidade dos centros. Vemos que existe um centro da esfera da Terra (e da atmosfera) e que os corpos sublunares se movem ou para esse centro, ou afastando-se desse centro. Mas se existem muitos centros para os movimentos do universo, essa teoria se torna irracional, pois ela pressupõe a existência de um único centro. Além disso, por que motivo os corpos leves e pesados se movem para o centro da esfera da Terra (ou para longe desse centro), e os corpos celestes utilizam outros centros? Nota-se também que a esfera das estrelas fixas gira em torno do mesmo centro que a esfera da Terra⁴⁶⁰. Assim, a multiplicidade de centros de rotação parece irracional, e apenas a teoria que aceita um único centro dos movimentos no universo parece aceitável.

Uma outra crítica apresentada por Proclo estava relacionada com a diversidade de mecanismos utilizados para os vários astros. Referindo-se a modelos que utilizavam epiciclos para o Sol e para a Lua, ele indicou que nesses casos o epiciclo gira no sentido oposto ao movimento do deferente, e que no caso dos 5 planetas o epiciclo gira no mesmo sentido que o movimento do deferente, o que lhe parece inaceitável:

As pessoas provenientes das matemáticas dirão sem dúvida que tomam tais hipóteses para salvar os fenômenos. Mas os que respeitam a Musa filosófica dizem que deve-se tomar cuidado para que nada seja produzido de modo irracional, e sobretudo que nada ocorra ao acaso, mas tudo se conforme a um plano [...]

Os Pitagóricos exigiam que se devia utilizar o menor número de hipóteses, e as mais simples, para relacionar a irregularidade aparente dos corpos celestes à regularidade e à ordem. Ora, os que se servem de esferas movidas em sentido inverso estão longe de agir assim, pois, para criar um mecanismo com estrutura simples para um único astro, eles multiplicam os fundamentos hipotéticos dos

⁴⁵⁹ *Ibid.*, vol. 3, dissertação XVI, 182-183.

⁴⁶⁰ *Ibid.*, vol. 3, dissertação XVI, 183.

fenômenos, fabricando um número incrível de esferas, constróem um mundo cheio de diversidade, e não explicam nem o número nem a complexidade de um modo que seja adequado com relação à atividade do Demiurgo. Além disso, essas mesmas hipóteses já foram refutadas por sábios posteriores, mostrando que elas não salvam todos os fenômenos nem fornecem demonstrações suficientes daquilo que querem salvar⁴⁶¹.

Note-se como Proclo exige que a astronomia seja algo mais do que “salvar os fenômenos”. Ela deve se basear em fundamentos filosóficos, para ser realmente valiosa.

Proclos discutiu também o problema astronômico da ordem dos planetas e suas distâncias à Terra. Como vimos, Platão adotava a ordem

Lua – Sol – Mercúrio – Vênus – Marte – Júpiter – Saturno

enquanto Ptolomeu adotou a ordem

Lua – Mercúrio – Vênus – Sol – Marte – Júpiter – Saturno

Proclos, como seguidor de Platão, defende a ordem apresentada na *República* e no *Timeu*, desqualificando os argumentos dos astrônomos:

Se alguns, aprovando as hipóteses dos matemáticos, preferem colocar o Sol no meio dos sete planetas, fazendo com que ele reuna e associe as tríades [conjuntos de 3 planetas] colocadas de cada um dos seus lados, que eles saibam que mesmo os sábios que se baseiam nas matemáticas não dizem nada de seguro⁴⁶².

Proclos mostra conhecer muito bem a teoria da *Hipótese dos Planetas*, que descreve e cita nominalmente, mas não concorda com ela. O único argumento que o faz ter algumas dúvidas sobre a ordem platônica é um argumento de autoridade: os oráculos pareciam indicar que o Sol estava em posição central.

⁴⁶¹ *Ibid.*, dissertação XVI, 230.3-6; vol. 3, 185.

⁴⁶² Proclus, *Commentaire sur le Timée*, vol. 4, 85.

É portanto através desse tipo de argumento que Ptolomeu conclui que o Sol está no meio dos sete planetas. Sem dúvida não devemos dar grande importância aos matemáticos como se eles utilizassem argumentos prováveis, mas não é permitido rejeitar a fé no Teurgo que sustenta claramente a mesma opinião quando diz que o Demiurgo “suspendeu no céu as seis faixas, inserindo no entanto no meio, como sétimo, o fogo do Sol”⁴⁶³.

Veremos, no próximo capítulo, que há um possível eco de idéias de Proclo na obra de Copérnico.

6.3 A CIVILIZAÇÃO ISLÂMICA E A ASTRONOMIA

Durante o primeiro terço do século VII, Muhammad ou Maomé (570 – 632), nascido em Meca, se converteria em líder espiritual e militar das diversas tribos que habitavam a península arábica e que rapidamente se converteram ao islamismo.⁴⁶⁴ A Hégira⁴⁶⁵, que marca o início da contagem de tempo utilizada pelos muçulmanos, teve lugar no ano 622.

A partir da morte de Muhammad, no ano 632, iniciou-se a conquista de grande parte do Oriente Médio pelos árabes, e em menos de um século eles já haviam dominado uma vasta região, que ia da Espanha até a Índia.

O território da Arábia era em grande parte formado por desertos e estava se tornando cada vez mais difícil manter a sua população. As primeiras invasões árabes começaram com meras incursões de pilhagem, e só se transformaram em ocupações permanentes depois de sentirem a fragilidade do inimigo: o antigo Império Romano. No Oriente, a Síria, atacada em 634, sucumbe dois anos depois; a Pérsia, invadida em 637, é subjugada após 13 anos de lutas; a Índia foi invadida em 664 e a cidade de Constantinopla foi assediada nos anos de 669,

⁴⁶³ *Ibid.*, vol. 4, 87.

⁴⁶⁴ Corral, 83; Michael Hoskin and Owen Gingerich, "Islamic Astronomy," In: Michael Hoskin (ed), *The Cambridge Illustrated History of Astronomy* (Cambridge: Cambridge University Press, 1997), 50.

⁴⁶⁵ A Hégira foi a fuga de Maomé de Meca para Medina.

716 e 717. O deslocamento dos invasores árabes para o Ocidente não foi tão rápido: o Egito foi conquistado em 642, Cartago em 697 e a Espanha, exceto uma pequena parte situada a Noroeste, foi conquistada durante os anos de 711 e 712. A expansão para Oeste, com exceção da Sicília e do Sul da Itália, foi detida pela derrota dos maometanos na batalha de Tours, em 737⁴⁶⁶.

Os muçulmanos não procuraram aniquilar com a cultura dos povos conquistados. Pelo contrário, seus dirigentes realizavam esforços para conservar e adquirir, dos povos conquistados o conhecimento científico – especialmente aqueles gerados pelos gregos.⁴⁶⁷

Enquanto a Astronomia européia parecia entrar num período de hibernação, sobrevivia uma cultura mista, de origem grega, romana e judaica, em Bizâncio⁴⁶⁸ e nos países que se estendiam da Síria ao Golfo Pérsico. A escola persa de Jundishapur acolhera os cristãos nestorianos⁴⁶⁹ e, quando a Academia de Platão foi fechada, os neoplatonistas.⁴⁷⁰

No período inicial de expansão árabe não parece ter existido nenhum desenvolvimento filosófico e científico importante, mas logo após a fundação de Bagdá começa a criação de uma série de centros de cultura naquela cidade, em Cairo, Córdoba e outros locais, onde se estudava (entre outras coisas) a astronomia⁴⁷¹.

Bagdá, a nova capital do mundo islâmico, foi fundada em 762 pelos sucessores de Maomé, no Oriente Médio. Bagdá se estendia através do rio Tigre e era próxima ao Eufrates. Encontrava-se dentro do alcance dos sábios cristãos de Jundishapur, que foram convidados a fazer parte do conselho do tribunal da cidade. Logo os bagdális perceberiam que estavam rodeados por tesouros

⁴⁶⁶ Bertrand Russell, *História da Filosofia Ocidental*, v. 2 (São Paulo: Editora Nacional, 1969), 130; Corral, 82.

⁴⁶⁷ Corral, 82.

⁴⁶⁸ Relativo a Bizâncio, cidade européia, situada às margens do Bósforo, fundada pelos gregos no séc. VII a.C., que se tornou a capital do Império Romano do Oriente, ou Império Bizantino (330 a 1453), tomando o nome de Constantinopla, atual Istambul.

⁴⁶⁹ Adeptos da seita de Nestório que fora patriarca na cidade síria de Constantinopla, em 428, e deposto pelo concílio de Éfeso em 431.

⁴⁷⁰ Dampier, 48-49.

⁴⁷¹ Pedersen, 153.

intelectuais da Antigüidade, a maioria preservado em manuscritos pertencentes a várias bibliotecas e escritos em idiomas diferentes do árabe⁴⁷².

No início, as atividades dos intelectuais árabes estavam dirigidas à tradução e à compilação de obras do saber antigo. Entre os séculos VIII e IX, as cidades de Bagdá, Damasco e Jundishapur foram os principais sítios dos trabalhos realizados por sábios persas, judeus, gregos, sírios e indianos que, sob a proteção direta dos califas, traduziram para o árabe parte considerável da literatura astronômica grega e de outras ciências, assim como as obras persas e indianas.⁴⁷³ Existe um registro de que já no ano de 772 um tratado astronômico indiano foi traduzido para o árabe⁴⁷⁴. No século IX houve grande número de traduções de textos gregos (primeiramente de versões sírias, e posteriormente diretamente do grego).

A astronomia islâmica teve um forte desenvolvimento a partir do século IX, sofrendo nessa época tanto influência indiana quanto helenística (através do contato com o sistema de Ptolomeu)⁴⁷⁵. Acredita-se que entre o final do século VIII e início do século IX, duas obras de Ptolomeu, o *Almagesto* e *As Hipóteses dos Planetas*, e as de Aristóteles já haviam sido traduzidas ao idioma árabe.

Como consequência desse trabalho de tradução e compilação das obras clássicas, a astronomia islâmica apresentaria forte desenvolvimento entre os séculos IX e XI.⁴⁷⁶ Os astrônomos do mundo islâmico dominaram as teorias grega e indiana, realizaram observações sistemáticas, determinaram parâmetros atualizados para os movimentos celestes e calcularam tabelas astronômicas (utilizando principalmente o método indiano de aproximações sucessivas).

Além da própria curiosidade científica, a astronomia despertou o interesse dos árabes por alguns motivos práticos, como a necessidade de conhecer as coordenadas geográficas para a navegação, e para permitir que os fiéis orassem com o rosto voltado para Meca. A astrologia foi outro fator importante, pois o pensamento do *Alcorão* era fortemente determinista, facilitando a expansão da

⁴⁷² Hoskin and Gingerich, 50.

⁴⁷³ Corral, 82.

⁴⁷⁴ Dreyer, 244.

⁴⁷⁵ Neugebauer, *A history of Ancient Mathematical Astronomy*, vol. 1, 7.

⁴⁷⁶ Corral, 82-83.

crença de que o futuro está escrito nas estrelas e levando assim a um interesse nos cálculos astronômicos.

6.4 ALGUNS DESENVOLVIMENTOS DA ASTRONOMIA ISLÂMICA

Citaremos alguns dos astrônomos que contribuíram com o desenvolvimento da Astronomia islâmica.

Al-Fargani ou Alfraganus (c. 800 – c. 870), astrônomo de Bagdá, escreveu um *Compêndio de Astronomia*. Nesse período os árabes ofereceram valiosas contribuições à Óptica e à Matemática. Na Matemática deixaram um legado muito rico no campo da Álgebra, da Trigonometria⁴⁷⁷ e um sistema de numeração usado até os nossos dias. Foi também nessa época que Alfragnus, através do modelo físico de Universo das esferas encaixadas uma nas outras, de Aristóteles, calculou os tamanhos relativos dos epiciclos e deferentes medidos a partir do centro do Universo, em relação ao raio terrestre. De acordo com as estimativas de Alfraganus, a superfície exterior da esfera da Lua media 64 1/6 raios terrestres; a superfície exterior da esfera de Mercúrio media 167; de Vênus 1.120; do Sol 1.220; de Marte 8.867; de Júpiter 14.405 e de Saturno 20.110. Como para o astrônomo a Terra apresentava um raio de 3250 milhas romanas, o raio das estrelas fixas se encontrava a mais de 75 milhões de milhas romanas da Terra.⁴⁷⁸

Thabit ibn Qurra (c. 826 – 901) compôs um tratado astronômico no qual se esforçava em atribuir aos céus um comportamento físico que concordasse com a astronomia de Ptolomeu. Qurra construía o movimento dos corpos celestes por meio de esferas sólidas, ocas ou cheias, que giravam em meio de um fluido etéreo capaz de condensar-se e dilatar-se⁴⁷⁹.

Al-Battani (c. 850 – 929), fez uma análise minuciosa sobre o *Almagesto*, corrigindo alguns erros e imprecisões. Descobriu que a posição do apogeu do Sol não coincidia com aquele proposto por Ptolomeu. Supôs que o grande astrônomo

⁴⁷⁷ Ibid., 83.

⁴⁷⁸ Kuhn, 103.

⁴⁷⁹ Pierre Duhem, *Salvar os Fenômenos: Ensaio Sobre a Noção de Teoria Física de Platão a Galileu*. Trad. Roberto de Andrade Martins. In: *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 1984, 24.

não poderia cometer um erro das proporções encontradas, preferindo admitir que a posição desse ponto deveria se modificar ao longo dos séculos, calculando o seu movimento, ou seja, efetuava o giro de 1° em 66 anos ou $54''$ por ano⁴⁸⁰. Fez novos cálculos para a obliquidade da eclíptica e para os movimentos excêntricos do Sol, da Lua, etc. Obteve o valor de 365 dias, 5 horas, 46 minutos e 24 segundos para o período do movimento do Sol que, sete séculos mais tarde, seria usado no calendário gregoriano.⁴⁸¹

Al-Sufi (903 – 986), persa de nascimento e trabalhando em Bagdá, escreveu *O Livro das Estrelas Fixas*. Nesse livro faz uma revisão na posição das estrelas encontradas no *Almagesto*, incluindo importantes comentários sobre o nome de estrelas e de constelações. Ampliou também a lista de objetos com aspecto nebulosos que Ptolomeu havia incluído no *Almagesto*, citando pela primeira vez aquilo que descrevemos como sendo a galáxia Andrômeda.⁴⁸²

Outro astrônomo importante foi Al-Biruni (973-1048), que escreveu sobre *Kahkashan*, nome árabe da Via Láctea, dizendo que:

[...] estava formada por uma coleção sem número de fragmentos cuja natureza é o de nuvens de estrelas. Elas formam aproximadamente um grande círculo, o qual passa entre as constelações dos Gêmeos e Sagitário. As nuvens de estrelas estão mais densamente reunidas em algumas zonas que em outras. Algumas vezes é larga e outras vezes é delgada, e ocasionalmente se separa em três ou quatro ramificações.⁴⁸³

Al-Biruni defendeu a existência física das esferas celestes, que descreveu como sendo cristalinas⁴⁸⁴. Ele adotou o modelo de Ptolomeu, de cascas esféricas encaixadas umas nas outras “como as camadas de uma cebola”, indicando que

⁴⁸⁰ Esse movimento representa uma rotação da linha dos apsides, com período de 110.000 anos.

⁴⁸¹ Pedersen, 163.

⁴⁸² Corral, 83.

⁴⁸³ Corral, 82-83.

⁴⁸⁴ Seyyed Hossein Nasr, *An Introduction to Islamic Cosmological Doctrines* (Albany: State of New York University, 1993), 133.

cada um desses orbes tem uma certa espessura, correspondente à diferença entre a distância mínima e máxima de cada planeta. Na determinação do tamanho das várias esferas planetárias e dos astros, al-Biruni segue os princípios da Astronomia ptolomaica e, às vezes, até mesmo obtém os mesmos resultados. A tabela abaixo mostra os valores do tamanho das órbitas planetárias e dos planetas, em função do raio terrestre, obtidos por al-Biruni.⁴⁸⁵ A segunda coluna fornece o volume dos astros comparado com o volume da Terra, $V_T = 1$; a terceira coluna fornece a menor distância do astro à Terra, comparada com o raio terrestre, R_T .

Tabela 6.1: Volumes e distâncias dos planetas à Terra, segundo al-Biruni

Astros	Volume ⁴⁸⁶	Dist. Mínima
Lua	0; 1' 33"	36
Mercúrio	0; 0' 14"	69
Vênus	0; 1' 34"	183
Sol	167; 20'	1254
Marte	1; 27'	1363
Júpiter	95; 14'	9919
Saturno	92; 08'	17914

6.5 O GRUPO IKHWAN AL-SAFA

Um grupo de pensadores árabes de nome Ikhwan al-Safa', formado em Baçorá, por volta de 963 escreveu uma importante obra filosófica denominada Rasa'il, que contém (entre outras coisas) uma descrição de suas idéias astronômicas⁴⁸⁷. Em grande parte, a visão do Ikhwan sobre a estrutura do

⁴⁸⁵ *Ibid.*, p. 134.

⁴⁸⁶ Os volumes são dados em notação sexagesimal, ou seja, os números após o ponto-e-vírgula representam uma fração de 1/60. Por exemplo: 1; 27' representa $1 + 27/60$.

⁴⁸⁷ Nasr, 25.

universo é a mesma de Aristóteles, porém eles supunham que a “quinta essência” tinha as mesmas qualidades dos elementos sublunares, o que lhes permitia explicar as influências astrológicas particulares atribuídas a cada astro⁴⁸⁸.

A astronomia não era considerada como um conhecimento profano e sim sagrado, revelado pelo profeta Idris (Hermes Trimegisto)⁴⁸⁹. O céu, para o Ikhwan, é a morada dos anjos, que atuam como poderes da Alma Universal. Por isso, os corpos celestes são movidos por essas forças espirituais⁴⁹⁰.

O sistema astronômico adotado pelo Ikhwan é essencialmente o mesmo do *Hipótese dos Planetas* de Ptolomeu, com cascas esféricas concêntricas e epiciclos formados por pequenas esferas⁴⁹¹. Eles adicionaram uma nova esfera além do orbe das estrelas, para explicar o movimento de precessão dos equinócios.

Esse texto fornece as espessuras e diâmetros das várias esferas e os tamanhos relativos dos planetas, sem contudo se referirem às fontes desses valores. Duhem interpretou os valores dos diâmetros que constavam nessa referência histórica como sendo os raios das esferas e, assim, os valores fornecidos por Ikhwan, ficam mais próximos daqueles fornecidos por al-Fargani e al-Battani. A tabela, fornecida por Duhem, é baseada nas distâncias mencionadas por Rasa'il:⁴⁹²

Tabela 6.2: Distâncias dos astros à Terra, comparados ao raio da Terra

Distância em função de R_T	Dist. corrigida	Dist. não corrigida
Esfera de ar	16 1/2	16 1/2
Ao perigeu da Lua	34	34
Ao apogeu da Lua e perigeu de Mercúrio	67	67
Ao apogeu de Mercúrio e perigeu de Vênus	172	172

⁴⁸⁸ *Ibid.*, 62.

⁴⁸⁹ *Ibid.*, 75, 132.

⁴⁹⁰ *Ibid.*, 81.

⁴⁹¹ *Ibid.*, 76.

⁴⁹² *Ibid.*, 134.

Ao apogeu do Vênus e perigeu do Sol	1087	2107
Ao apogeu do Sol e perigeu de Marte	1187	2307
Ao apogeu de Marte e perigeu de Júpiter	8843	17619
Ao apogeu de Júpiter e perigeu de Saturno	14370	28673
Ao apogeu de Saturno	21975	43883
À superfície externa das estrelas fixas	33975	67883

Na Tabela 6.2, a segunda coluna apresenta os valores corrigidos por Duhem, em função do raio terrestre, R_T , e a terceira coluna apresenta os valores originais de Ikhwan.

O Rasa'il, por outro lado, fornece o tamanho relativo dos astros, em função do raio terrestre:⁴⁹³

Tabela 6.3: O tamanho dos astros, segundo o Rasa'il, em função do raio da Terra.

Planeta	Tamanho
Lua	1/28
Mercúrio	1/28
Vênus	5/12
Sol	5 2/5
Marte	1 1/6
Júpiter	4 5/6
Saturno	4 1/2

O Sol era o principal astro, na visão do Ikhwan, e era descrito como o coração do universo, o sinal visível de Deus no céu e na Terra, a fonte de luz para todo o universo, e outras expressões semelhantes. É curiosa a seguinte citação: “Deus colocou o Sol no centro do universo como a capital de um país é colocada no seu meio, e como o palácio de um dirigente é colocado no meio da cidade”⁴⁹⁴. Isso não significava adotar um modelo heliocêntrico, no entanto. O Sol estava “no meio

⁴⁹³ *Ibid.*, 79.

⁴⁹⁴ *Ibid.*, 77.

do universo” no sentido de estar posicionado em posição intermediária entre a Terra e a esfera das estrelas, tendo abaixo dele 3 planetas (Lua, Mercúrio, Vênus) e acima outros três (Marte, Júpiter, Saturno). Essa concepção filosófica a respeito da importância e da situação do Sol é análoga à que encontramos em Proclo e em outros autores (como Hermes Trimegisto), e terá grande influência na Europa, durante o Renascimento.

6.6 OBSERVATÓRIOS E MEDIDAS

Uma contribuição muito valiosa dos árabes à Astronomia foi a construção de instrumentos astronômicos maiores e mais precisos que aqueles usados anteriormente⁴⁹⁵, dando continuidade aos trabalhos de observação iniciados pelos gregos e outros povos mais antigos.

Os árabes estudaram os astrolábios gregos (já descritos por Ptolomeu) e os desenvolveram a um alto grau de perfeição, criando assim métodos mecânicos de cálculo astronômico. No campo observacional, construíram observatórios com grandes instrumentos, para obter medidas mais precisas dos movimentos celestes. Esse tipo de iniciativa prosseguiu por vários séculos, e são bem conhecidos os grandes instrumentos construídos por ordem do príncipe Ulugh Beg no século XV, por exemplo⁴⁹⁶.

Como vários séculos haviam se passado desde Ptolomeu, os astrônomos árabes tiveram a possibilidade de comparar os dados daquela época com medidas recentes, não só corrigindo parâmetros antigos (como a duração do ano e a velocidade de precessão dos equinócios) como também descobrindo fenômenos novos. Para Hiparco e Ptolomeu, o apogeu solar tinha uma posição fixa no espaço. Al-Battani (c. 850 – 929) foi capaz de mostrar que a posição do apogeu havia se deslocado $16^{\circ} 47'$ desde a época de Hiparco⁴⁹⁷.

⁴⁹⁵ Abetti, 65.

⁴⁹⁶ Edward S. Kennedy, *Astronomy and Astrology in the Medieval Islamic World* (Aldershot: Ashgate, 1998), capítulos 10 e 11.

⁴⁹⁷ Pedersen, 161.

No século XI o astrônomo al-Zarqali (c. 1029 – 1087), conhecido na Europa como Azarquiel, elaborou um manual prático contendo dados astronômicos, as “Tabelas de Toledo”. Essas tabelas estavam baseadas em registros contínuos de observação que cobriam um período de mais de 900 anos. Os parâmetros astronômicos das *Tabelas Toledanas* eram melhores do que os antigos e permitia prever as posições dos corpos celestes com uma melhor precisão. Isto foi aproveitado pelos astrônomos do Renascimento que, baseando-se nesse material, fizeram descobrimentos que haveriam de modificar de forma radical nossa visão do Universo⁴⁹⁸.

As *Tabelas de Toledo* se difundiram rapidamente no mundo europeu, tornando-se no século XIII a base de construção das “Tabelas Alfonsinas”, compiladas por ordem do rei Alfonso X, o Sábio⁴⁹⁹. Essas tabelas, que dominaram a astronomia européia até o século XVI, eram portanto uma herança indireta dos astrônomos árabes.

6.7 A ORDEM E AS DISTÂNCIAS DOS PLANETAS

A ordem dos planetas e suas distâncias à Terra foi um tema que suscitou grande interesse durante a Idade Média.

As observações astronômicas medievais abordaram alguns temas que não interessaram a Ptolomeu: brilho dos planetas, trânsitos, estudo de cometas⁵⁰⁰. A análise de trânsitos (passagem de planetas diante do disco do Sol) era relevante para discutir as distâncias dos diversos astros até a Terra. Variações de brilho também tinham importância pelo mesmo motivo.

A hipótese dos orbes encaixados uns nos outros, apresentada por Ptolomeu, era aceita por muitos pensadores medievais, e levava à conclusão de que Mercúrio e Vênus estavam entre a Lua e o Sol. No entanto, outros procuraram

⁴⁹⁸ Abetti, 84

⁴⁹⁹ Pedersen, 155.

⁵⁰⁰ Bernard R. Goldstein, “Theory and Observation in Medieval Astronomy,” *Isis* **63** (1972): 39-47.

evidências mais diretas, que poderiam ser proporcionadas se fosse possível observar Mercúrio ou Vênus passando diante do Sol⁵⁰¹.

Uma obra escrita na Europa, provavelmente no século IX, atribuída a Bede, o Venerável, defendeu a idéia de que Vênus e Mercúrio estão algumas vezes acima do Sol e outras vezes abaixo dele, e citou o testemunho de Carolus que teria observado Mercúrio como uma mancha visível no disco do Sol, durante 9 dias⁵⁰².

Avicenna foi um dos autores que descreveu ter observado a passagem de Vênus sob a forma de uma pequena mancha no disco solar. Segundo Bernard Goldstein, a passagem de Vênus diante do Sol é realmente visível sem instrumentos, e ocorreu um trânsito de Vênus no dia 24 de maio de 1032. Como Avicenna morreu em 1037, ele poderia ter observado essa passagem – mas poderia também ter visto uma mancha solar, e pensado que se tratava de Vênus⁵⁰³.

Ptolomeu não discutiu em suas obras a questão da variação do brilho dos planetas. Esse assunto foi no entanto objeto de estudo durante a Idade Média.

Alguns autores medievais inferiram que, se Vênus recebe sua luz do Sol, e se esse planeta se move entre o Sol e a Terra, seu disco nunca deveria estar totalmente iluminado, e Vênus deveria mostrar fases, como as da Lua. O mesmo deveria ocorrer com Mercúrio. No entanto, tal fenômeno nunca havia sido observado. Al-Biruji (séc. XII) resolveu essa dificuldade afirmando que os planetas possuem luz própria⁵⁰⁴.

Levi ben Gerson (1288-1344) fez observações sobre o tamanho aparente de Vênus e criticou o modelo de Ptolomeu com base nesses estudos. Segundo o modelo de Ptolomeu, a distância máxima de Vênus à Terra é seis vezes maior do que sua distância mínima (na verdade, 6,5 vezes). Assim, o tamanho aparente desse planeta deveria variar muito. No entanto, Levi ben Gerson afirmou que não havia conseguido notar nenhuma variação de brilho tão grande quanto se

⁵⁰¹ Goldstein, 43.

⁵⁰² Dreyer, 228.

⁵⁰³ Goldstein, 44.

⁵⁰⁴ *Ibid.*, 45.

esperava. No caso de Marte, ele também não notou uma variação de brilho correspondente à teoria⁵⁰⁵.

6.8 CRÍTICAS ÀS TEORIAS ANTIGAS

Muitos astrônomos islâmicos, como Thabit ibn Qurra, Al-Battani e outros, esforçavam-se em divulgar e melhorar a Astronomia de Ptolomeu. Outros, no entanto, adotaram uma posição mais crítica. As hipóteses astronômicas não deveriam ser simplesmente meios de salvar os fenômenos, mas sim explicações dos movimentos dos corpos celestes a partir de causas realmente existentes. A partir dessa exigência, as hipóteses sobre o movimento de corpos celestes seriam passíveis de julgamento a partir de leis e princípios físicos.⁵⁰⁶

A Física aceita pela maior parte dos filósofos islâmicos era a Física aristotélica, que era discordante com a Astronomia dos excêntricos e dos epiciclos de Ptolomeu. Assim, polêmicas foram levantadas contra e a favor da Astronomia ptolomaica, especialmente durante o transcurso do século XII.

Averroes se refere ao estagirita com as seguintes palavras:

[...] fundou e completou a Lógica, a Física e a Metafísica. Digo que ele as fundou, pois todas as obras que foram escritas antes dele sobre essas ciências não merecem ser comentadas e foram eclipsadas por seus escritos. Digo que ele as completou porque aqueles que a ele seguiram até nosso tempo, ou seja, durante quase quinze séculos, nada puderam adicionar a esses escritos, nem encontrar neles erro de alguma importância.⁵⁰⁷

O uso de epiciclos e excêntricos contrariava os princípios filosóficos de Aristóteles, porque introduziam movimentos circulares em torno de pontos onde não havia nada (no caso dos excêntricos) e criavam uma multiplicidade de

⁵⁰⁵ *Ibid.*, 45.

⁵⁰⁶ Duhem, 25.

⁵⁰⁷ *Ibid.*, 26.

centros no universo. Moses Maimonides (final do século XII), Ibn Bajja, conhecido na Europa como Avempace (século XII) e al-Bitruji (ou Alpetragius, final do século XII) consideraram que esses recursos matemáticos eram filosoficamente repugnantes⁵⁰⁸.

O uso de equantes por Ptolomeu também recebeu críticas por parte de vários astrônomos árabes, como Ibn al-Haytham (c. 1000 d.C.) e Omar Khayyam (c. 1100)⁵⁰⁹, mas não se sabe se eles propuseram alternativas. Nos séculos seguintes, Ibn Sina (Avicena) e al-Bitruji procuraram livrar-se dos equantes, sem muito sucesso. A solução geométrica foi encontrada posteriormente por al-Tusi, com a invenção de um par de círculos giratórios que produz um efeito de oscilação linear.

O astrônomo iraniano Nasir al-Din al-Tusi (1201-1274) foi o criador do recurso geométrico totalmente novo conhecido como o par de círculos de Tusi⁵¹⁰. Trata-se de um arranjo de um círculo que gira dentro de um outro, com o dobro do raio, e que produz um movimento resultante retilíneo, que corresponde àquilo que denominamos movimento harmônico simples.

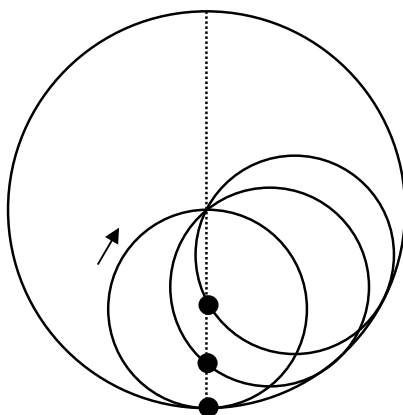


Fig. 6.1 – No par de círculos de Tusi, um círculo gira uniformemente dentro de um outro com o dobro do raio. Cada ponto do círculo menor descreve uma trajetória retilínea

⁵⁰⁸ Goldstein, 40-41.

⁵⁰⁹ Kennedy, capítulo 12, 20.

⁵¹⁰ *Ibid.*, capítulo 6; Dreyer, 268-269.

O par de círculos de Tusi permite introduzir oscilações simples em qualquer direção desejada, sem trazer oscilações simultâneas em outras direções (como ocorre quando são utilizados círculos).

Associando o centro do deferente a um dispositivo desse tipo, era possível produzir uma variação periódica de distância entre o epiciclo do planeta e a Terra, produzindo um efeito semelhante ao do equante de Ptolomeu, mantendo no entanto o princípio da uniformidade dos movimentos (o centro do epiciclo se move com velocidade constante ao longo do deferente).

Utilizando esse dispositivo era possível aperfeiçoar, entre outras coisas, a teoria da Lua, evitando a consequência existente na teoria de Ptolomeu de que no perigeu ela deveria ter o dobro do tamanho aparente que teria no apogeu.

A teoria de Ptolomeu para o movimento da Lua foi criticada durante o período medieval, porque embora proporcionasse bons resultados no que se refere ao cálculo de sua longitude e latitude, seu modelo exigia que a Lua tivesse o dobro do tamanho aparente nas quadraturas (Lua crescente e minguante) do que em oposição (Lua cheia), e isso não era observado. No século XIV, dois astrônomos criticaram a teoria de Ptolomeu e propuseram novas teorias⁵¹¹. Um deles foi Levi ben Gerson (1288-1344), o outro foi Ibn al-Shatir (1304-1376).

Levi ben Gerson utilizou dois métodos diferentes para estudar variações do tamanho e da distância da Lua. Um método foi projetar a imagem da Lua, por meio de um anteparo com um pequeno furo, e medir o tamanho da imagem formada em uma tela. Outro método, menos direto, consistiu em fazer observações da Lua separadas por intervalos de 4 ou 5 horas, e a partir dessas medidas determinar a paralaxe da Lua (o que permitia inferir sua distância). As variações de distância da Lua eram de apenas cerca de 10% (e não 100%), e isso o levou a descartar o modelo de Ptolomeu e desenvolver um completamente diferente⁵¹².

No século XIV um astrônomo de Damasco, Ibn al-Shatir, utilizou o par de círculos de Tusi para desenvolver vários aperfeiçoamentos da teoria de

⁵¹¹ Goldstein, 46.

⁵¹² *Ibid.*

Ptolomeu⁵¹³. Em particular, ele substituiu as teorias do movimento de Mercúrio e da Lua por outras mais elegantes. No caso da Lua, al-Shatir eliminou o movimento do centro do deferente e introduziu um segundo epiciclo. Isso permitiu explicar o movimento da Lua em longitude tão bem quanto Ptolomeu, sem a consequência ptolomaica de que a distância entre a Lua e a Terra deveria sofrer variações de 100% durante o ciclo lunar⁵¹⁴.

6.9 A TEORIA DE HERACLEIDES NA IDADE MÉDIA

A hipótese de que Mercúrio e Vênus giravam em torno do Sol e não em torno da Terra foi descrita por Macrobius e Capella no século V d.C., e foi posteriormente comentada e adotada por vários autores europeus medievais. É relevante documentar esse ponto, porque essa teoria teve influência, depois, na obra de Copérnico.

Guillaume de Conches (c. 1090 – c. 1160) descreveu as diferentes opiniões sobre a ordem dos planetas:

Os egípcios, a quem Platão seguiu, disseram que o Sol está imediatamente após a Lua, acima [do Sol] está Mercúrio, acima de Mercúrio, Vênus. Os caldeus, seguidos por Cícero, preferiram Mercúrio logo após a Lua, Vênus acima dele, e acima dela o Sol⁵¹⁵.

Guillaume de Conches tentou conciliar as duas opiniões, apresentando a idéia de que Mercúrio e Vênus circulam em torno do Sol, e por isso às vezes estão abaixo e às vezes estão acima dele:

As órbitas de Vênus e Mercúrio são epípiclos, ou seja, círculos que existem acima da Terra, e que não a circundam. O centro de suas órbitas é o Sol, mas o [centro da órbita] de Mercúrio está no centro do

⁵¹³ Kennedy, capítulo 12, 21.

⁵¹⁴ *Ibid.*, cap. 12, 22.

⁵¹⁵ Conches, 63.

Sol, o de Vênus está acima do meio. Para que você possa compreender isso melhor, eu desenharei uma figura, na qual traçarei a Terra, o Sol, e os epiciclos de Vênus e de Mercúrio, cada planeta em seu próprio epiciclo, em dois lugares, ou seja, o mais elevado e o mais baixo.⁵¹⁶

Após expor a hipótese, Guillaume procurou conciliar as opiniões contraditórias existentes – bem no estilo medieval:

Assim, quando Vênus e Mercúrio estão no ponto mais alto de suas órbitas, eles estão realmente acima do Sol, e então Mercúrio está mais próximo do Sol. Mas quando estão nos pontos mais baixos de suas órbitas, então o Sol está acima deles, e Vênus está mais próximo ao Sol. Portanto os caldeus, considerando que algumas vezes os planetas estão mais baixos do que o Sol, e então brilham de forma mais luminosa, disseram que o Sol é mais alto do que os planetas [...].

Platão e os egípcios, considerando quanto os planetas podem subir, perceberam que o Sol não sobe tanto quanto Mercúrio, nem Mercúrio tanto quanto Vênus. Por esta razão, eles julgaram que o Sol era mais baixo do que Mercúrio, e Mercúrio mais baixo do que Vênus. [...]

Nós preferimos concordar com esta opinião, de que o Sol está abaixo de Vênus e Mercúrio. Pois como a Lua é fria e úmida, era necessário que, quando o Sol (que é quente e seco) fosse unido à Lua, seu frio fosse temperado pelo calor do Sol, sua umidade pela secura do Sol, de modo que a Lua, estando mais perto da Terra e portanto possuindo maior domínio sobre ela, não tornasse a Terra destemperada se seus raios destemperados caíssem sobre ela⁵¹⁷.

⁵¹⁶ *Ibid.*, 63-64.

⁵¹⁷ *Ibid.*, 64-65.

Este é apenas um de vários exemplos medievais que poderiam ser citados onde a teoria de Heráclides é descrita e defendida (sem se citar o nome de Heráclides, no entanto). Portanto, a idéia de que alguns planetas poderiam girar em torno do Sol não só era conhecida mas também aceita por vários autores medievais.

A hipótese de que a própria Terra poderia estar em movimento também não foi desconhecida no período medieval. Al-Biruni visitou a Índia e, lá, tomou conhecimento da existência de teorias sobre o movimento da Terra, cujos detalhes desconhecemos⁵¹⁸. Não se conhece nenhuma teoria indiana em que a Terra seja um dos planetas, e provavelmente tratava-se apenas da hipótese de que a Terra gira em torno do seu eixo (como na teoria de Heráclides)⁵¹⁹. Posteriormente, no entanto, al-Biruni comentou em uma de suas obras:

Vi o astrolábio chamado Zuraqi inventado por Abu Sa'id Sijzi. Eu gostei muito e o elogiei bastante, por ser baseado na idéia defendida por alguns de que o movimento que vemos é devido ao movimento da Terra e não do céu. Realmente, este é um problema difícil de solucionar [...]

É indiferente considerar que a Terra se move ou o céu. Pois, em ambos os casos, isso não afeta a ciência astronômica. Cabe ao físico ver se ele consegue refutá-lo⁵²⁰.

Nesse caso, tratava-se certamente da suposição de que a Terra era um dos planetas, pois a construção de um astrolábio é independente da hipótese de que a Terra gira em torno de seu eixo.

Note-se que al-Biruni percebeu claramente que, sob o ponto de vista puramente astronômico, era indiferente supor que a Terra está parada ou que ela se move, pois somente são observados movimentos relativos. Essa idéia já era bem clara na Idade Média, e foi utilizada (entre outros autores) por Nicole

⁵¹⁸ Nasr, 135.

⁵¹⁹ Aryabhata supôs que a esfera das estrelas estava em repouso e que a Terra girava em torno de seu eixo. Dreyer, 242.

⁵²⁰ Al-Biruni, *apud* Nasr, 135.

Oresme, para defender a idéia de que nenhuma observação poderia indicar se a Terra está parada ou se ela está em movimento. Mais tarde, Galileo iria desenvolver esse princípio, para defender a teoria de Copérnico⁵²¹.

6.10 O RENASCIMENTO DA ASTRONOMIA NA EUROPA

Vemos que a imagem popular, de que os pensadores do período medieval se limitaram a preservar o conhecimento antigo, é incorreta. Alguns astrônomos estavam preparados para questionar ou modificar as teorias antigas em aspectos fundamentais, empregando tanto argumentos filosóficos quanto matemáticos, baseados em observações cuidadosas. Foram criados novos modelos matemáticos, e novas teorias foram propostas para o movimento da Lua e de Mercúrio.

Ao declinar a cultura islâmica iria ocorrer um processo de reforço da ciência europeia. Durante o século XII se iniciou uma verdadeira enxurrada de traduções de obras científicas do árabe ao latim, que iniciava o retorno à ciência grega com leves retoques árabes. Em meados do século surgiram na França e na Espanha traduções de Aristóteles (a partir do árabe), e depois traduções de comentários a Aristóteles escritos por Alexandre, Simplicio e outros⁵²². Desta forma os estudiosos europeus da alta Idade Média e do Renascimento conheceram as obras de Aristóteles, Ptolomeu, Euclides, Arquimedes e outros filósofos da Grécia Antiga, graças ao trabalho dos árabes. Pode-se dizer que os árabes estabeleceram o elo perdido entre a filosofia helênica e Idade Média⁵²³.

Como consequência desse aprendizado da astronomia através dos árabes, o vocabulário astronômico técnico europeu adotou alguns termos árabes, que sobreviveram até nossos dias. Vejamos o que diz Corral a respeito desse fato:

⁵²¹ Roberto de Andrade Martins, "Galileo e o princípio da relatividade," *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* 9 (1986): 69-86.

⁵²² Dreyer, 231.

⁵²³ Corral, 84-86.

Um claro rastro do predomínio astronômico que os árabes tiveram durante parte da Idade Média européia foi a incorporação à nossa linguagem de várias palavras árabes, tais como: zênite⁵²⁴, nadir⁵²⁵, almanaque⁵²⁶. Também haveria de sobreviver um grande número de nomes de estrelas: Albireo, Aldebarán, Algol, Altair, Betelgeuse, Mizar, El Nath.⁵²⁷

Em meados do século XIII, na mesma época em que Tomás de Aquino e Alberto Magno escreviam seus famosos comentários sobre o pensamento de Aristóteles, Johannes de Sacrobosco escreveu um pequeno livro texto de astronomia, o *Tratado da Esfera*. Baseando-se em obras que haviam sido recentemente traduzidas ao latim, Sacrobosco se referiu às idéias de Ptolomeu e Alfragano, descrevendo de forma elementar os mecanismos celestes. Este parece ter sido o primeiro autor europeu medieval a fornecer um esboço do sistema astronômico ptolomaico⁵²⁸.

Este influente livro foi amplamente utilizado nas mais importantes universidades européias até o século XVII. Nele, muitos acadêmicos aprenderam sobre: a redondeza da Terra,

[...] porque aos que vivem na banda do norte, as estrelas que estão junto ao pólo ártico num se lhes põem, e as que estão junto ao pólo antártico nunca se lhes nascem nem nunca podem ver. E portanto se alguém fosse do norte para o sul, tanto poderia ir que as estrelas que sempre via já não veja, e veja as que antes não via. E a

⁵²⁴ Ponto da abóbada celeste que corresponde à vertical do observador.

⁵²⁵ Ponto contrário ao zênite, antípoda do observador, lado diametralmente oposto.

⁵²⁶ Nos almanaques, os árabes registravam todos os eventos astronômicos previsíveis, como por exemplo as fases da Lua. Se assemelhavam aos nossos anuários astronômicos de hoje.

⁵²⁷ Corral, 84.

⁵²⁸ Dreyer.

quem fosse do Sul para o norte outro tanto aconteceria, por causa de ser a Terra redonda. [...] ⁵²⁹

Diz Sacrobosco sobre a redondeza da água:

[...] Ponha-se um sinal na ribeira do mar e saia uma nau do porto, e aparte-se tanto que quem estiver ao pé do mastro não possa ver o sinal, e estando assim a nau, ver-se-á o mesmo sinal da gávea, pois o olho que estivesse ao pé do mastro, melhor deveria ver o sinal que o que em cima estivesse, como parece pelas linhas que vão até o sinal. E portanto nenhum desconto tem isso senão ser a Água redonda, e ponhamos que não haja névoa, nem vapores, nem algum outro impedimento. Mas a Água é corpo homogêneo, segue-se que o todo e as partes da Água, como parece nas gotas e no orvalho das ervas, buscam naturalmente figura redonda. Portanto a mesma Água que é o todo deve ser redonda. ⁵³⁰

Enfim, Sacrobosco e outros cientistas, defendiam e ensinavam a Física aristotélica e os princípios da Astronomia ptolomaica. Contudo outros havia que eram frontalmente contrários a esses ensinamentos. Durante um período tão extenso como a Idade Média, seria natural que esse fato ocorresse. Surgiram na Europa pensadores que, sem questionar os ensinamentos da Igreja, criticavam os ensinamentos da ciência aristotélica. Tal como é o caso de Juan Buridan e Nicolas Oresme. Essa atitude começou a tomar maior força a partir do século XIV e deveria continuar até o Renascimento.

Na segunda metade do século XIII, o rei Alfonso X, o sábio, de Castela (1252-1284), seguindo o exemplo dos califas, reuniu astrônomos em sua corte e ordenou a tradução de muitos textos científicos para o castelhano, além da elaboração de tabelas astronômicas atualizadas⁵³¹. Essas tabelas foram

⁵²⁹ Johannes de Sacrobosco, *Tratado da Esfera*. Trad. Pedro Nunes, Int. e notas de Carlos Ziller Camenietzk (São Paulo: Nova Estela, 1991), 34 - 35.

⁵³⁰ *Ibid.*, 35.

⁵³¹ Dreyer, 247-248; 272-274.

consideradas as melhores existentes durante 3 séculos, e espalharam-se por toda a Europa sob a forma de cópias manuscritas, terminando por ser impressas em 1483. Além de estabelecer parâmetros planetários atualizados, os astrônomos de dom Alfonso concluíram que o movimento de precessão dos equinócios era mais lento do que Ptolomeu havia calculado e aumentaram o seu período de 36.000 anos para 49.000 anos⁵³² – um valor que foi aceito durante séculos.

Um dos homens mais notáveis desse período de transição foi Nicolas de Cusa (1401-1464), que se distinguiu em muitas áreas do conhecimento. Em suas discussões filosóficas, ensinava sobre a existência de um cosmo perfeito, esférico e infinito, tornando-se um dos precursores de uma visão moderna do Universo. Sua obra mais importante, *De Docta Ignorantia*, contém idéias importantes. O universo seria ilimitado e portanto não poderia ter centro. Assim sendo, a Terra não poderia estar em uma posição central e, como Nicolau de Cusa supunha que o movimento era uma propriedade natural de todos os corpos, a própria Terra deveria possuir um movimento – aparentemente, um movimento de rotação em torno de seu eixo⁵³³. No universo concebido por Cusa, as estrelas não estariam todas localizadas numa esfera, de acordo com os modelos gregos, mas poderiam se encontrar à distâncias variadas, espalhadas pelo universo⁵³⁴. Não existiria uma diferença essencial entre a Terra, o Sol, a Lua e as estrelas – todos os corpos do universo seriam formados pelos mesmos elementos.

A obra de Nicolau de Cusa é essencialmente filosófica e não astronômica. Ele não procurou, com essas idéias, explicar os movimentos dos astros. No entanto, sua contribuição é relevante por mostrar que os pensadores desse período não estavam presos cegamente às idéias antigas, e podiam sentir-se suficientemente livres para propor concepções revolucionárias.

⁵³² *Ibid.*, 278.

⁵³³ Dreyer, 284-285.

⁵³⁴ Corral, 97.

6.11 ANTES DE COPÉRNICO

No final do século XV a astronomia européia se encontrava em forte desenvolvimento. Novos textos, antes desconhecidos, estavam sendo trazidos à luz na Europa, e com a invenção da imprensa de tipos móveis, os primeiros livros astronômicos começaram a ser publicados na década de 1470.⁵³⁵ Muitos deles eram “clássicos”, como os tratados dos principais astrônomos árabes traduzidos para o latim. Obras astrológicas e místicas (como os textos de Hermes Trimegisto) foram também estudados, traduzidos e impressos a partir dessa época⁵³⁶. O *Corpus Hermeticum* teve enorme influência no final do século XV e início do século XVI, levando a uma veneração pela alquimia, pela astrologia e pela magia natural⁵³⁷. A visão de uma correspondência entre o macrocosmo e o microcosmo, que foi uma das bases da astrologia, foi reforçada pelos textos herméticos⁵³⁸.

O *Tratado da Esfera* de Sacrobosco logo foi publicado e reeditado dezenas de vezes, algumas vezes sozinho, outras vezes acompanhado de comentários ou da *Teoria dos Planetas* de Georg Peurbach (1423-1461), que continha uma análise mais técnica do modelo de Ptolomeu⁵³⁹.

Além de edições de obras antigas, aparecem produções novas. Em 1474 Regiomontanus (ou seja, Johannes Müller, 1436-1476) publicou suas *Ephemerides astronomicae*, contendo as posições dos astros para o período 1475 a 1506⁵⁴⁰. Dois anos depois, ele publicou uma tabela do movimento da Lua, com previsões de eclipses e desenhos dos mesmos⁵⁴¹. Em 1496 publicou uma *Epítome do Almagesto* que resumia o grande trabalho de Ptolomeu⁵⁴².

⁵³⁵ Jérôme de Lalande, *Bibliographie Astronomique* (Paris: Imprimerie de la République, 1803), 9.

⁵³⁶ Allen G. Debus, *Man and Nature in Renaissance* (Cambridge: Cambridge University Press, 1978), 133-134.

⁵³⁷ *Ibid.*, 101.

⁵³⁸ *Ibid.*, 12.

⁵³⁹ Dreyer, 288-289.

⁵⁴⁰ Lalande, 11.

⁵⁴¹ *Ibid.*, 12. Os calendários e efemérides de Regiomontanus continuaram a ser publicados por vários anos.

⁵⁴² Pedersen, 261.

Na transição do século XV para o século XVI, havia comentários sobre a hipótese de que a Terra pudesse estar em movimento⁵⁴³. Isso não significa que a questão estivesse sendo realmente debatida, pois os autores (como Regiomontanus e Johann Schoner) simplesmente seguiam o exemplo de Ptolomeu e repetiam seus argumentos. No entanto, essa apresentação dos argumentos a favor do repouso da Terra poderiam produzir um efeito contrário ao esperado, por dois motivos. Primeiramente, porque as pessoas cultas da época eram treinadas, nas universidades, a discutir qualquer argumento, contrapondo-lhe contra-argumentos. Em segundo lugar, porque quando se apresentam argumentos a respeito de uma idéia, torna-se mais fácil questionar essa idéia do que quando ela é exposta dogmaticamente e aceita tacitamente. Dessa forma, a ampla difusão de argumentos que procuravam mostrar que a Terra está em repouso no centro do universo podem ter excitado especulações opostas. É conhecido pelo menos um exemplo pré-copernicano de sugestão a favor do movimento da Terra, no início do século XVI: Celio Calcagnini (1479-1541), que escreveu um pequeno opúsculo em 1524, defendendo a rotação da Terra⁵⁴⁴.

É importante também citar que, na passagem do século, alguns pensadores estavam criticando a astronomia de Ptolomeu e tentando retornar a modelos mais satisfatórios sob o ponto de vista filosófico. Girolamo Fracastoro (1483-1553) e Giovanni Battista Amici (1512-1538), independentemente um do outro, tentaram ressuscitar a teoria das esferas homocêntricas, que era a única realmente compatível com a física aristotélica⁵⁴⁵. A teoria de Fracastoro era extremamente complexa, incluindo um total de 77 esferas.

Tanto Fracastoro quanto Amici procuraram superar a principal dificuldade da teoria das esferas homocêntricas (variações aparentes de tamanho e brilho dos astros) recorrendo a uma hipótese adicional: essas variações seriam simples efeitos ópticos de refração, produzidos pela falta de homogeneidade da matéria existente abaixo dos astros.

⁵⁴³ Dreyer, 290-291.

⁵⁴⁴ *Ibid.*, 292-293.

⁵⁴⁵ *Ibid.*, 196-304.

Os modelos desenvolvidos por esses dois italianos não tiveram sucesso. No entanto, suas tentativas mostram que, no início do século XVI, existiam pensadores insatisfeitos com a teoria astronômica de Ptolomeu e que se sentiam suficientemente livres para propor modelos diretamente em oposição ao pensamento tradicionalmente aceito.

7 – O sistema heliocêntrico

7.1 INTRODUÇÃO

Em meados do século XVI foi publicado o trabalho astronômico de Copérnico, com a proposta de um novo sistema cosmológico.

No sistema de Ptolomeu, a Terra ocupava a posição de repouso no centro ou próxima ao centro do universo. A Lua era o astro mais próximo da Terra, depois vinha Mercúrio, a seguir Vênus, o Sol, Marte, Júpiter e Saturno. No sistema de Copérnico, o Sol permuta seu antigo lugar com a Terra e a Lua se transforma num "satélite" da Terra. Assim, o Sol se encontra em repouso no centro ou próximo ao centro do universo, depois vem Mercúrio, a seguir Vênus, Terra, Marte, Júpiter e Saturno.

Com o sistema de Ptolomeu, o movimento retrógrado de cada planeta é explicado com a escolha das velocidades angulares do centro do epíciclo percorrendo o deferente e do planeta percorrendo o epíciclo; além disso, era fixada, para cada planeta, uma determinada razão entre os raios do deferente e do epíciclo. Com o sistema de Copérnico, além de se calcular a distância de um planeta ao Sol, conseguia-se uma explicação mais natural do movimento retrógrado realizado pelo planeta: esse movimento passaria a ser interpretado como uma combinação dos movimentos do planeta e da Terra em redor do Sol. Contudo, os universos de Copérnico e Ptolomeu eram muitos semelhantes, em relação aos deferentes e epícclos. Este capítulo irá descrever alguns aspectos da teoria de Copérnico e comparar seu trabalho ao de seus predecessores.

7.2 COPÉRNICO

Nikolaj Koppernigk (1473 – 1543), nasceu na Polônia, na cidade de Torun. Tornou-se conhecido na Europa com o nome latinizado de Copernicus (no presente trabalho usamos o nome aportuguesado Copérnico). Ingressa, em 1491, na Universidade de Cracóvia onde estudou as artes liberais que incluíam, entre outras coisas, o estudo da Matemática e da Astronomia. Sem ter obtido nenhum

título na Cracóvia, em 1496 Copérnico matricula-se na Universidade de Bolonha, na Itália, para estudar Direito. Durante sua estada lá, familiarizou-se com as obras de Platão e manteve contato com o astrônomo neo-platônico Domenico Maria Novara (1454-1504), que criticava o sistema de universo de Ptolomeu por achá-lo confuso, não coerente com a Física aceita da época. Em 1497 desenvolve suas primeiras observações astronômicas conhecidas. Nesse período teria lido o *Almagesto* de Ptolomeu. Graças ao apoio de um tio, Copérnico foi escolhido como cônego da diocese de Frauenburg, e essa posição lhe deu segurança financeira pelo resto de sua vida.⁵⁴⁶

Copérnico realizou também estudos de medicina em Pádua e acabou obtendo o título de doutor em Direito Canônico em Ferrara. Em 1504 retornou à Polônia. Foi provavelmente durante o período em que permaneceu na Itália que ele leu a respeito dos pensadores antigos que aceitavam o movimento da Terra.

Depois de seu retorno definitivo à Polônia, Copérnico escreveu uma pequena obra, o *Commentariolus*, onde fez uma breve descrição do seu sistema heliocêntrico. Segundo Crowe⁵⁴⁷, há fortes evidências de que Copérnico teria estruturado o sistema heliocêntrico no intervalo de tempo entre os anos de 1510 e 1514. Algumas cópias desse manuscrito são distribuídas entre colegas e amigos do astrônomo. No prefácio de *As Revoluções dos Orbes Celestes*, publicado em 1543, Copérnico se refere a uma carta enviada a sua Santidade Paulo III, escrevendo o seguinte:

[...] hesitei comigo durante muito tempo se havia de dar a lume os meus *Comentários* escritos para demonstração desse movimento [da Terra], ou se seria preferível seguir o exemplo dos pitagóricos e de alguns outros que procuravam confiar os mistérios da filosofia aos seus familiares, amigos e a ninguém mais, não por escrito mas de viva voz, tal como atesta a carta de Lísias a Hiparco. [...] ⁵⁴⁸

⁵⁴⁶ Nicolau Copérnico, *Commentariolus*. Trad. e notas de Roberto de Andrade Martins (São Paulo: Nova Stella, 1990), 85-86; Dampier, 63-65; Dreyer, 305-310.

⁵⁴⁷ Crowe, 87.

⁵⁴⁸ Nicolau Copérnico, *As Revoluções dos Orbes Celestes* (Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1984), 5.

Foi provavelmente em torno de 1530 que Copérnico completou a redação inicial de sua grande obra, *Sobre as Revoluções dos Orbes Celestes*, mas seu livro só foi publicado no ano de sua morte, em 1543. Com relação ao longo intervalo de tempo, de aproximadamente 30 anos, entre a divulgação do *Commentariolus* e a publicação do *Sobre as Revoluções dos Orbes Celestes*, chega-se à conclusão que Copérnico deveria estar ciente de que seu sistema de universo, com o Sol ocupando o lugar da Terra, não seria aceito. No prefácio dessa obra pode-se ler:

Mas os amigos me arrancaram à indecisão e mesmo à relutância em que andava, há longo tempo, entre os quais esteve Nicolau de Schönberg, cardeal de Cápua, célebre em todo o tipo de conhecimento, e um homem a ele semelhante, o meu muito querido amigo Tideman Gísio, bispo de Cúlmen, por ser profundamente interessado pelas ciências sagradas e por todas as belas letras. Foi ele na verdade que freqüentemente me exortava e, de mistura por vezes com censuras, me instava a que deixasse publicar e dar finalmente a lume esta minha obra que estava escondida, retida em minha casa, não apenas há nove anos, mas há quatro vezes nove. [...] ⁵⁴⁹.

É pouco provável que o *Sobre as Revoluções* estivesse pronto 36 anos antes da publicação. É mais razoável supor-se que Copérnico estava se referindo ao primeiro esboço de sua teoria. De fato, há uma enorme distância conceitual e técnica entre os dois trabalhos, que parece indicar a necessidade de um longo tempo de maturação até a elaboração final da teoria. O *Commentariolus* descreve apenas as idéias básicas da teoria, sem indicar como podem ser feitos cálculos detalhados. O *Sobre as Revoluções* é um tratado enorme, detalhado, com todas as informações necessárias para os cálculos astronômicos, com tabelas, etc. E

⁵⁴⁹ *Ibid.*, 6.

alguns princípios utilizados nesta obra madura são diferentes dos expostos no *Commentariolus*.

Referindo-se a Lactâncio⁵⁵⁰, que fez considerações zombeteiras aos que acreditavam na esfericidade da Terra, Copérnico revela mais um aspecto de sua personalidade: a timidez. No prefácio de *As Revoluções dos Orbes Celestes*, escreve o seguinte:

[...] quando [Lactâncio] zomba dos que proclamam que a Terra tem a forma de um Globo. Portanto, não deve parecer estranho aos estudiosos se alguns que tais zombarem de nós também. As Matemáticas escrevem-se para os matemáticos, aos quais também esta minha obra, se não me engana a mim a idéia, há de parecer algo útil até à República eclesiástica, cujo principado Vossa Santidade tem agora em seu poder⁵⁵¹.

7.3 OS PRINCÍPIOS DA TEORIA DE COPÉRNICO

No *Commentariolus*, Copérnico apresentou a sua proposta astronômica como sendo simplesmente uma tentativa de dar conta dos fenômenos através de modelos mais simples do que os de Ptolomeu, evitando o uso de equantes e exigindo que todos os círculos se movam com velocidades uniformes em torno de seus centros⁵⁵². É claro que isso não justifica a hipótese de que a Terra é um dos planetas, mas logo depois desses comentários Copérnico introduziu sete princípios do seu sistema heliocêntrico.⁵⁵³

- 1) Não existe um centro único de todos os orbes celestes ou esferas.

⁵⁵⁰ As considerações de Lactâncio sobre a esfericidade da Terra foram comentadas no Cap. 6.

⁵⁵¹ Copérnico, 9.

⁵⁵² Copérnico, *Commentariolus*, 101-103.

⁵⁵³ *Ibid.*, 103 – 105.

2) O centro da Terra não é o centro do mundo, mas apenas o da gravidade e do orbe lunar.

3) Todos os orbes giram em torno do Sol, como se ele estivesse no meio de todos; portanto o centro do mundo está perto do Sol.

4) A razão entre a distância do Sol à Terra e a altura do firmamento é menor que a razão entre o raio da Terra e a sua distância ao Sol; e com muito mais razão esta é insensível confrontada com a altura do firmamento.

5) Qualquer movimento aparente no firmamento, não pertence a ele, mas à Terra. Assim a Terra, com os elementos adjacentes, gira em torno dos seu pólos invariáveis em um movimento diário, ficando permanentemente imóveis o firmamento e o último céu.

6) Qualquer movimento do Sol não é causado por ele mas pela Terra e pelo nosso orbe, com o qual giramos em torno do Sol como qualquer outro planeta. Assim, a Terra é transportada por vários movimentos.

7) Os movimentos aparentes de retrogressão e progressão dos errantes não pertencem a eles mas à Terra. Apenas o movimento desta é suficiente para explicar muitas irregularidades aparentes do céu.

O primeiro princípio de Copérnico representava simplesmente a negação dos sistemas homocêntricos. Praticamente todos os astrônomos da época estariam de acordo com isso.

O segundo princípio introduz uma idéia crucial: se nem tudo gira em torno da Terra, a Terra não é o centro de tudo. No entanto, os corpos pesados (“graves”) caem em direção à Terra, portanto a Terra é o centro da gravidade. Dessa forma, Copérnico abandonou a teoria dos movimentos naturais de Aristóteles, eliminando a associação entre o centro do universo e os movimentos de queda dos corpos. Na época, abandonar a física aristotélica não era um ponto positivo e sim negativo da teoria, pois Copérnico não dispunha de uma física alternativa para substituir a física aristotélica.

Um dos problemas que já havia sido discutido por Proclo era que as teorias astronômicas introduziam muitos centros diferentes para os movimentos, e assim não se compreendia mais por qual motivo os corpos pesados e leves se movem radialmente para o centro da Terra (ou para longe dela). Copérnico indicou que o centro da Terra não seria realmente o centro do universo ou o centro de todos os movimentos, mas apenas o centro dos movimentos terrestres – incluindo a queda dos corpos. Cada corpo celeste deve ter propriedades análogas, e atrair para si os corpos que possuem natureza semelhante à deles⁵⁵⁴.

Aristarco, em seu sistema heliocêntrico, também fez da Lua um "satélite" da Terra. No entanto, a suposição de que apenas a Lua gira em torno da Terra, e não os outros astros, também não é algo evidente. Na teoria ptolomaica do movimento lunar, eram utilizados muitos círculos para explicar os fenômenos – assim como no caso dos planetas. Não era evidente que somente a Lua estivesse realmente girando em torno da Terra. Na verdade, era mais aceitável, na época, a idéia de que o Sol gira em torno da Terra, porque seu movimento tinha uma menor excentricidade do que todos os outros, e era mais uniforme do que o da Lua.

Em suas observações sobre o texto de Copérnico, Martins comentou:

Outro aspecto estranho (na época) da teoria de Copérnico é que, nela, quase todos os astros giram em torno do Sol, mas a Lua gira em torno da Terra, o que cria uma diferença inexplicável. Na época não eram conhecidos outros satélites. Se Copérnico estava identificando a Terra aos planetas, por que motivo só ela possuía um outro "planeta" girando ao seu redor?

No sistema geocêntrico, a Lua somente poderia girar em torno da Terra, da maneira como foi estabelecida pela maioria dos astrônomos gregos. Contudo, no sistema heliocêntrico a Lua não pode ser um "planeta", ela deverá, necessariamente, girar em torno da Terra (deverá ser um "satélite" da Terra), como será mostrado mais adiante.

⁵⁵⁴ *Ibid.*, livro I, cap. 9, 521.

No terceiro princípio, Copérnico simplesmente afirma que o Sol está parado e que os orbes giram em torno dele, sem justificar essa idéia. Note-se que ele não é colocado exatamente no centro dos orbes planetários, porque Copérnico irá utilizar círculos excêntricos. Por esse motivo, pode ser preferível dar o nome de “heliostático” e não “heliocêntrico” para essa teoria.

Não se sabia, na época, que o Sol gira. A descoberta da rotação do Sol ocorreu no início do século seguinte, pela observação das manchas solares, que servem como referência para se perceber que a superfície do Sol está rodando⁵⁵⁵.

O quarto princípio é introduzido para responder a objeções que poderiam ser levantadas contra a teoria. Em primeiro lugar, se a Terra se movesse em torno do Sol a uma distância comparável a do “firmamento” (esfera das estrelas “fixas”)⁵⁵⁶, nunca se veria, à noite, metade da esfera celeste, e sim uma parcela menor do que a metade, como Ptolomeu havia mostrado e era comentado em todas as obras da época (como o *Tratado da Esfera* de Sacrobosco)⁵⁵⁷. Outra consequência que Copérnico consegue evitar é a deformação das constelações, que ocorreria se a Terra se movesse a uma distância do centro do universo comparável ao raio do firmamento.

Por fim, Copérnico poderia também estar pensando no problema da paralaxe estelar, que deveria ser observada se o movimento orbital da Terra fosse comparável ao raio do universo. Sabe-se que na medida da posição da estrela Spica, por exemplo, medida por Copérnico, ele cometeu um erro de 40', maior que o diâmetro angular do Sol ou da Lua, que é da ordem de 30'⁵⁵⁸. Se o erro de

⁵⁵⁵ Pela rotação do Sol, em torno de seu eixo, cada mancha, localizada em sua superfície, tem um certo período que depende da latitude solar. Quando uma mancha está localizada no equador solar, à latitude 0° , completa uma volta em, aproximadamente, 25 dias; outra que esteja localizada à latitude de 75° , completa uma volta em, aproximadamente, 33 dias. Essas observações mostram que a superfície solar tem uma rotação diferenciada, ou seja, sua velocidade angular decresce com o crescer do ângulo de latitude. Esse fato mostra, observacionalmente, a rotação solar, em torno de seu eixo de rotação. As primeiras observações de manchas solares foram realizadas no final de 1610 por Thomas Harriot e no início de 1611 por Johannes Fabricius e por Christophorus Scheiner.

⁵⁵⁶ Observe-se que Copérnico manteve aqui a idéia de uma esfera para as estrelas fixas.

⁵⁵⁷ Ptolomeu, *Almagesto*, livro 1, caps. 6 e 7; Sacrobosco, 36.

⁵⁵⁸ Copérnico, 88 – 89.

medida da posição das estrelas for de aproximadamente $\pm 0,5^0$, pode-se concluir que o universo de Copérnico deve ser mais de 100 vezes a distância da Terra ao Sol, para não haver paralaxes estelares mensuráveis.

Isso, no entanto, era incompatível com as idéias da época, pois na teoria de Ptolomeu admitia-se que a esfera das estrelas tinha um raio cerca de 20 vezes maior do que o deferente do Sol. Para evitar todas essas conseqüências, portanto, Copérnico precisava supor uma enorme distância entre as estrelas e o Sol, e isso foi considerado na época como um defeito de seu sistema.

O quinto princípio afirma que o firmamento (esfera das estrelas) é imóvel e que a Terra gira em torno de um eixo fixo. Posteriormente, Copérnico admitiu que esse eixo era móvel, para explicar a precessão dos equinócios. Ao afirmar que os “elementos adjacentes” à Terra giram com ela, Copérnico está admitindo que o ar, as nuvens, etc. acompanham seu movimento – uma suposição importante para responder a argumentos antigos⁵⁵⁹ contra a rotação da Terra.

Os dois últimos princípios estabelecem que certos movimentos que observamos nos corpos celestes não pertencem a eles, mas à Terra. Em particular, Copérnico vai procurar mostrar que os planetas não possuem realmente movimento de retrogradação e paradas, e que essas aparências são devidas ao movimento da Terra.

A partir desses princípios básicos, Copérnico vai construir sua teoria, no *Commentariolus*. Ele não discute nem justifica cada um deles, mas faz apenas um comentário geral após descrevê-los:

Para que ninguém julgue que eu afirmei gratuitamente a mobilidade da Terra, junto com os pitagóricos, deve-se perceber a grande prova contida na descrição dos círculos⁵⁶⁰.

Ou seja: Copérnico considera que possui um forte argumento, mas esse argumento não é uma justificativa de cada um dos princípios, e sim a força do resultado final obtido – uma teoria mais simples e harmoniosa do que a de

⁵⁵⁹ Ptolomeu, *Almagesto*, livro 1, cap. 7.

⁵⁶⁰ Copérnico, 106.

Ptolomeu. Assim, no *Commentariolus*, ele não apresentou motivos filosóficos ou físicos para admitir que a Terra se move e que o Sol está parado.

7.4 A ORDEM DOS PLANETAS

Segundo Copérnico, a ordem de distâncias dos planetas ao Sol é a seguinte: Mercúrio é o planeta que mais próximo se encontra do Sol, completando uma volta em torno do Sol no terceiro mês⁵⁶¹; logo a seguir vem Vênus, completando sua volta no nono mês; depois a Terra, apresentando seu período em torno do Sol de um ano; segue-se Marte, com período de dois anos⁵⁶²; depois vem Júpiter, com período de doze anos e, finalmente, Saturno, com período de trinta anos. A Lua, por outro lado, deixa de ser um "planeta" e se torna um "satélite", girando em torno da Terra "como um epíciclo", com período de 27,3 dias. Todos esses períodos são aproximados e relativos ao orbe das estrelas fixas que se encontra em repouso.⁵⁶³

Copérnico não explicou, no *Commentariolus*, como determinou essa ordem e esses períodos – apenas forneceu o resultado. É claro que nem as distâncias dos planetas ao Sol e nem mesmo seus períodos de rotação em torno do Sol são mensuráveis diretamente. O que se podia determinar era o período de rotação dos planetas, vistos da Terra, em relação ao fundo de estrelas (período sideral geocêntrico) e o período sinódico (período das "laçadas" ou retrogradações).

O que Copérnico fez foi basear-se nos parâmetros conhecidos da teoria geocêntrica e reinterpretar esses parâmetros, calculando assim os períodos dos movimentos dos planetas em torno do Sol, como será explicado mais adiante.

⁵⁶¹ Em *As Revoluções dos Orbes Celestes*, 52, Copérnico assinala para o período de Mercúrio 80 dias; no *Commentariolus*, 127, assinala um período de 88 dias.

⁵⁶² Em *As Revoluções dos Orbes Celestes*, liv. I, cap. X, 52, Copérnico assinala para o período de Marte 2 anos; no *Commentariolus*, 127, assinala um período de 29 meses.

⁵⁶³ Copérnico, *Commentariolus*, 107- 109.

7.5 POSSÍVEIS RAZÕES DE COPÉRNICO EM TRANSFORMAR A LUA NUM "SATÉLITE" DA TERRA

Mencionamos que não era óbvio, na época, que todos os planetas poderiam ser considerados como girando em torno do Sol, mas a Lua devesse girar em torno da Terra. Vejamos alguns argumentos que Copérnico pode ter imaginado para transformar a Lua em um "satélite" da Terra.

a) Se a Lua fosse uma planeta, ela deveria girar em torno do Sol e isso poderia ocorrer de duas formas: ou ela estaria mais próxima do Sol do que a Terra (planeta interno ou inferior), ou mais distante (planeta externo ou superior). Se ela estivesse mais próxima do Sol (como Mercúrio e Vênus), ela nunca poderia ser observada em oposição ao Sol, e sempre seria observada perto dele, nunca se afastando mais do que um certo ângulo (como Mercúrio e Vênus). Contudo, a Lua é observada tanto junto ao Sol como em oposição ao Sol.

b) Se a Lua e a Terra girassem em torno do Sol, como seriam os eclipses? Se a Lua fosse um planeta interno, somente seria possível se presenciar os eclipses do Sol e não os eclipses da Lua. Pode-se visualizar esse fato na Figura 7.1: com o Sol, Lua e Terra alinhados, ter-se-ia um eclipse do Sol; por outro lado, não há como se visualizar um eclipse da Lua.

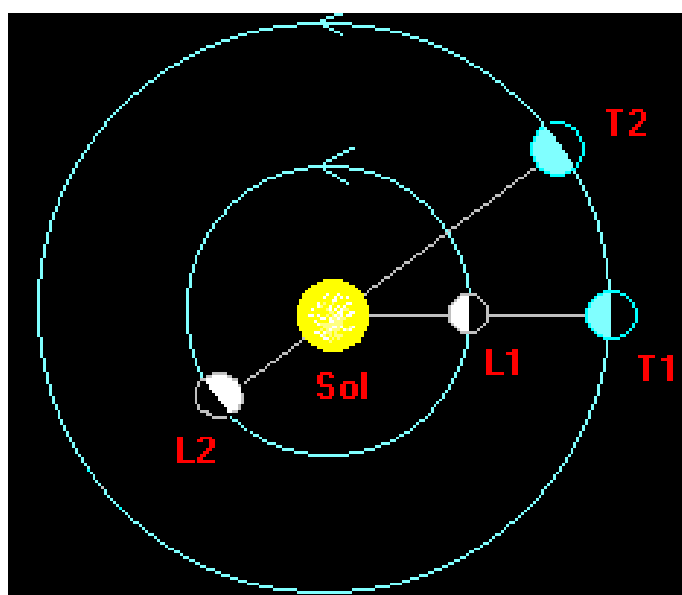


Figura 7.1: Provável motivo de Copérnico para não manter a Lua como um planeta.

Inversamente, se a Lua fosse um planeta externo, ela nunca poderia passar entre a Terra e o Sol e portanto não poderiam existir eclipses do Sol. A existência dos dois tipos de eclipse mostra que às vezes a Terra está entre a Lua e o Sol e em outros momentos a Lua está entre a Terra e o Sol, o que mostra que não pode ser nem um planeta interno nem externo⁵⁶⁴.

c) Através do sétimo princípio de Copérnico, conclui-se que o movimento retrógrado dos planetas era causado pelo movimento da Terra em redor do Sol. Se a Lua fosse um planeta, ela deveria apresentar um movimento retrógrado como os demais planetas internos ou externos. Como não se observava esse movimento para a Lua, ela deveria pertencer a um orbe em redor da Terra e não do Sol.

c) Seria possível pensar em um modelo com a Terra girando em 365,25 dias ao redor do Sol e a Lua com período de 27,32 dias, também, em redor do Sol. Podendo-se obter, assim, o período sinódico da Lua de 29,53 dias (este fato poderia ser observado). Com a Lua e a Terra nas posições L1 e T1, da Figura 7.1, teríamos sempre uma Lua Nova, durante o dia, e isso, também, seria natural. Contudo, com a Lua e a Terra nas posições L2 e T2 teríamos uma Lua cheia, também durante o dia, em oposição ao Sol, o que seria inconsistente com as observações. Conclusão: se a Lua fosse um planeta, mais próximo ao Sol do que a Terra, lamentavelmente nunca teríamos as belíssimas noites de Lua Cheia, mas sim os dias de Lua Cheia (ver a Figura 7.1).

7.6 O MOVIMENTO RETRÓGRADO

Para Eudoxo, Hiparco, Ptolomeu, e todos os astrônomos que adotam uma teoria geocêntrica, qualquer as paradas e retrogradações apresentadas pelos astros errantes são seu movimento real em relação à esfera das estrelas fixas.

⁵⁶⁴ Haveria, em princípio, outra possibilidade: a de que a Lua tivesse uma trajetória que não fosse nem totalmente interna nem totalmente externa à órbita da Terra, passando assim algumas vezes entre a Terra e o Sol e outras vezes ficando a Terra entre a Lua e o Sol. Mas essa não era uma possibilidade imaginável na época, porque um orbe não poderia cruzar outro orbe.

Para Copérnico, contudo, cada planeta se move sempre no mesmo sentido, em relação às estrelas. Observamos paradas e retrogradações porque o movimento observável de qualquer errante é composto por dois movimentos: o seu próprio movimento em torno do Sol e as influências causadas, no movimento do errante, pelo movimento da Terra, também em torno do Sol. Assim,

Há dois movimentos em longitude nos planetas, completamente diferentes. Um é provocado pelo movimento da Terra atrás mencionado e o outro é o movimento próprio de cada um. Decidimos chamar, com toda a propriedade, ao primeiro, um movimento paraláctico, pois é ele que dá origem às estações, progressões e regressões em todos eles, não porque o planeta, que sempre se move para a frente, com seu movimento próprio, assim ande errante, mas porque uma espécie de paralaxe é produzida pelo movimento da Terra, [...] ⁵⁶⁵

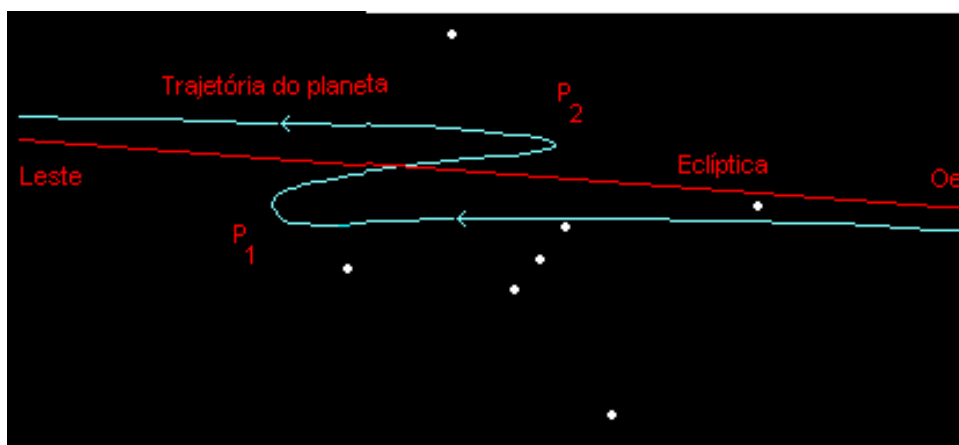


Figura 7.2: O planeta descreve seu movimento retrógrado entre os pontos P_1 e P_2 , em relação ao orbe das estrelas fixas.

Devido à rotação diária da Terra em torno de seu eixo de rotação, embora o orbe das estrelas esteja em repouso, tem-se a impressão que são as estrelas que se movimentam no sentido Oeste: ⁵⁶⁶

⁵⁶⁵ Copérnico, *As Revoluções dos Orbes Celestes*, liv. V, cap. I, 431.

⁵⁶⁶ *Ibid.*, 25.

[...]. Por esta rotação todo o universo parece deslocar-se de Oriente para Ocidente, exceto a Terra. Esta rotação é considerada como a medida comum de todos os movimentos porque também medimos o próprio tempo pelo numero de dias. [...]

O movimento aparente descrito por um errante, em relação as estrelas fixas (note que no sistema de universo de Copérnico o orbe das estrelas fixas permanece estacionário), se realiza, na maior parte do tempo, de Oeste para Leste (o planeta "perde a corrida"⁵⁶⁷ com as estrelas). Há momentos em que o planeta permanece estacionário em relação às estrelas (ponto P₁ da Figura 7.2, em relação às estrelas) e, após isso, se movimenta de Leste para Oeste, "ganhando a corrida" com as estrelas, estaciona, novamente (ponto P₂ da Figura 7.2, em relação às estrelas), retomando, finalmente, seu movimento de Oeste para Leste. Cada vez que o planeta pára, retrocede, pára de novo e retoma o movimento direto, ele realiza uma "volta" ou "laçada", e esse fenômeno é cíclico, mas não exatamente periódico: o tempo sofre variações, mantendo no entanto um certo valor médio.

Os antigos astrônomos procuravam medir tanto o tempo médio que cada planeta demorava a voltar ao mesmo ponto do céu, em relação ao zodíaco (período sideral⁵⁶⁸) e o tempo médio entre dois ciclos de retrogradação ou ciclos de anomalia (período sinódico), contando o número total de ciclos siderais e ciclos de retrogradação em um grande número de anos. A Tabela 7.1 abaixo indica os dados utilizados por Ptolomeu. O modo de apresentar os dados foi adaptado para a notação decimal, para se tornar mais fácil de compreender a um leitor moderno.

⁵⁶⁷ No sistema heliocêntrico, o orbe das estrelas fixas permanece estacionário. Contudo, devido ao movimento de rotação da Terra em torno de seu eixo, no sentido de Oeste para Leste, com período médio de 23h 56min, tem-se a impressão que é o orbe das estrelas que gira de Leste para Oeste, com o mesmo período. Portanto não há nenhum inconveniente em se afirmar que a Lua, o Sol e os planetas "perdem a corrida" aparente com as estrelas.

⁵⁶⁸ Vamos chamar a partir de agora esse tempo de "período sideral geocêntrico", para diferenciá-lo do período que será calculado por Copérnico.

Tabela 7.1: Ciclos dos movimentos dos planetas, de acordo com Ptolomeu⁵⁶⁹

Planeta	Ciclos de anomalia	Ciclos siderais geocêntricos	Tempo (anos solares)
Saturno	57	2 + 1,72°	59 anos + 1,75 dias
Júpiter	65	6 – 4,83°	71 anos – 4,84 dias
Marte	37	42 + 3,17°	79 anos + 3,22 dias
Vênus	5	8 – 2,25°	8 – 2,30 dias
Mercúrio	145	46 + 1°	46 + 1,03 dias

No caso de Saturno, por exemplo, os dois ciclos se completam *quase* juntos, depois de *quase* 59 anos. Ou seja, em 59 anos e quase dois dias, há exatamente 57 ciclos de retrogradação no movimento de Saturno, e ao mesmo tempo Saturno completa quase exatamente duas voltas em relação ao Zodíaco (na verdade, além de completar duas voltas, ele passa quase 2° do ponto inicial).

Para cada planeta, dividindo-se o tempo total (última coluna) convertido em dias pelo número de cada tipo de ciclo, obtém-se os períodos sinódico e sideral (geocêntrico), indicados na Tabela 7.2 abaixo (em notação decimal):

Tabela 7.2: Períodos dos movimentos dos planetas, de acordo com Ptolomeu

Planeta	Período sinódico	Período sideral (geocêntrico)
Saturno	378,0965 dias	10.750,07 dias = 29,432 anos
Júpiter	398,8909 dias	4.331,00 dias = 11,857 anos
Marte	779,9451 dias	686,95 dias = 1,881 anos
Vênus	583,94 dias	365,25 dias = 1,000 ano
Mercúrio	115,88 dias	365,25 dias = 1,000 ano

Desde que as observações sejam feitas em um intervalo de tempo longo, o resultado final pode ser muito preciso. No caso de Saturno, por exemplo, consideremos uma imprecisão de um dia em 59 anos: isso corresponderá a um erro de $4,6 \times 10^{-5}$, em notação moderna.

⁵⁶⁹ Ptolemy, *Almagest*, 470.

Copérnico não fez observações relevantes para a determinação desses períodos, mas utilizando observações seculares do movimento aparente de cada planeta, pôde calcular o período sinódico de cada planeta, que representou da seguinte forma:⁵⁷⁰

Saturno, 378 dias, 5 minutos de um dia, 32 segundos de um dia e 11/60 segundos de um dia. Júpiter, 398 dias, 23 minutos de um dia, 2 segundos de um dia e 56/60 segundos de um dia. Marte, 779 dias, 56 minutos [de um dia]⁵⁷¹, 19 segundos de um dia, 7/60 segundos de um dia. Vênus, 583 dias, 55 minutos [de um dia], 17 segundos de um dia, 24/60 segundos de um dia. Mercúrio, 115 dias, 52 minutos [de um dia], 42 segundos de um dia, e 12/60 segundos de um dia⁵⁷².

Os valores apresentados por Copérnico são essencialmente os mesmos que os calculados acima a partir dos dados de Ptolomeu.

Observa-se que os períodos sinódicos dos planetas não são medidos conforme a nossa maneira usual de se medir o tempo: em horas, minutos e segundos. Copérnico se refere a minutos de um dia (ou seja, 1 dia dividido em 60 partes) e segundos de um dia (= 1 dia / 3.600), empregando o sistema de numeração sexagesimal que era usualmente empregado pelos astrônomos desde Hiparco e Ptolomeu.

Note-se que para Saturno, por exemplo, Copérnico parece acreditar que seu resultado tem a precisão de 1/60 de segundo de dia em 378 dias, ou seja, um erro de apenas $1,2 \times 10^{-8}$. Na verdade, o erro era muito maior do que isso. O período astronômico conhecido com maior precisão na época era a duração do ano trópico, que era de 365 dias, 14 minutos [de um dia], 48 segundos [de um dia] ou 365 dias, 5 horas, 55 minutos e 12 segundos⁵⁷³, onde se supunha ter a precisão

⁵⁷⁰ Copérnico, 433.

⁵⁷¹ Esses colchetes foram inseridos por nós.

⁵⁷² Curiosamente, em todos esses períodos Copérnico não se refere à unidade de tempo em horas.

⁵⁷³ Copernicus, *On the Revolutions of the Heavenly Spheres*, book 3, 647.

de 1 segundo de dia em 1 ano, ou seja, $7,6 \times 10^{-7}$. Os períodos dos movimentos dos planetas não eram conhecidos com precisão comparável a esta.

A partir dos períodos sinódicos dos planetas, Copérnico podia calcular os seus períodos de rotação em torno do Sol. O método de cálculo depende de uma interpretação das observações no modelo heliocêntrico, como será mostrado mais adiante.

7.7 EXPLICAÇÃO DO MOVIMENTO RETRÓGRADO PARA UM PLANETA COM "ÓRBITA EXTERNA"

Considere-se, inicialmente, um planeta com orbe externo ao da Terra, que poderia ser qualquer um dos planetas externos, Marte, Júpiter ou Saturno. Vamos considerar, por simplicidade, que os movimentos dos planetas em torno do Sol são circulares e com velocidade angular constante. Na Figura 7.3, representa-se a Terra com uma velocidade angular um pouco maior que o planeta externo. As posições ocupadas, em instantes consecutivos, pela Terra, planeta e posição projetada no fundo estrelado, são unidas por segmentos de retas, representados por: (1, 1, 1), (2, 2, 2), (3, 3, 3), etc.

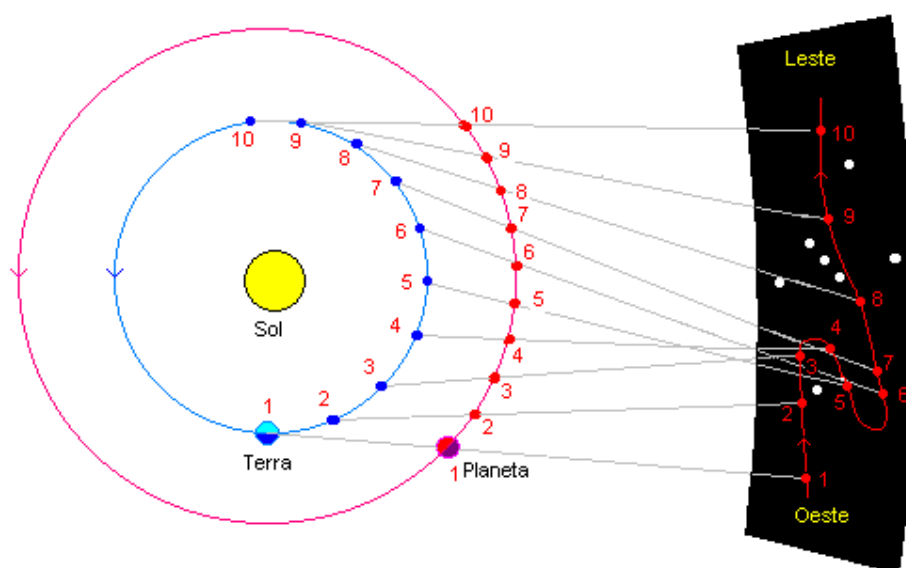


Figura 7.3: A figura mostra o movimento observado de um planeta, externo ao orbe da Terra, em relação ao orbe das estrelas fixas⁵⁷⁴.

Devido ao movimento anual de translação da Terra em redor do Sol, combinado com o movimento próprio do planeta, também em torno do Sol, resulta o movimento relativo do planeta em relação ao fundo estrelado:⁵⁷⁵

[...]. Depois vemos outras revoluções em sentido contrário, isto é, de Ocidente para Oriente, por exemplo do Sol, da Lua e dos cinco planetas. [...] E enquanto o Sol percorre o seu caminho direto, os planetas vagueiam de vários modos, andando errantes, umas vezes para o Norte, outras para o Sul, pelos que lhes chamam astros errantes. Acrescente-se também que umas vezes estão mais perto da Terra, e diz-se que estão no perigeu, e outras vezes estão mais afastados, isto é, no apogeu. [...]

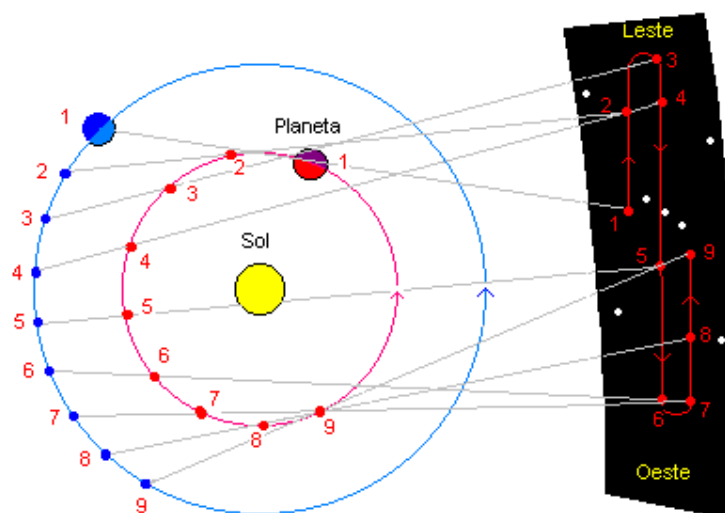


Figura 7.4: A figura mostra o movimento observado de um planeta interno ao orbe da Terra, em relação ao orbe das estrelas fixas⁵⁷⁶.

⁵⁷⁴ Crowe, 93; Cohen, 49.

⁵⁷⁵ *Ibid.*, 26.

⁵⁷⁶ Cohen, 51.

Verifica-se, pela figura, que, até muito próximo da posição (3, 3, 3), o planeta se dirige para Leste das estrelas. Pouco depois da posição (3, 3, 3) o planeta estaciona e na posição (4, 4, 4) o planeta já inverteu o sentido do movimento para Oeste, em relação às estrelas, ou seja, está realizando o movimento retrógrado. Pouco depois da posição (5, 5, 5), o planeta estaciona e, na posição (6, 6, 6) já retomou seu movimento para Leste.

Um fato notável é que o planeta externo retrograda sempre nas proximidades de sua posição de oposição ao Sol. Na Figura 7.3, a posição de oposição ao Sol, acontece, aproximadamente, entre (4, 4, 4) e (5, 5, 5), quando Sol – Terra – planeta externo estão alinhados. Portanto, a retrogradação de um planeta externo, à órbita terrestre, pode ser observada, comodamente, durante à noite, .

7.8 EXPLICAÇÃO DO MOVIMENTO RETRÓGRADO PARA UM PLANETA COM "ÓRBITA INTERNA"

Considere-se um planeta com orbe interno ao da Terra, que poderia ser qualquer um dos planetas inferiores: Mercúrio ou Vênus,⁵⁷⁷

[...] que prevalece uma relação diferente. Com efeito, eles estão encobertos, quando se encontram no periélio, e são visíveis apenas quando executam as suas elongações para um e para outro lado do Sol, de modo que nunca se encontram, sem a sua paralaxe. [...]

Na Figura 7.4, representa-se a Terra com uma velocidade angular menor do que a do planeta interno. As posições ocupadas, em instantes consecutivos, pelo planeta interno, Terra e posição projetada no fundo estrelado, são unidas, como no caso anterior, por segmentos de retas, representados por: (1, 1, 1), (2, 2, 2), (3, 3, 3), etc.

Devido ao movimento anual de translação da Terra em redor do Sol, combinado com o movimento próprio do planeta, também em torno do Sol, resulta

⁵⁷⁷ Copérnico, *As Revoluções dos Orbes Celestes*, 431.

o movimento relativo do planeta em relação ao fundo estrelado. Verifica-se, pela figura, que da posição (1, 1, 1) até um pouco antes da posição (3, 3, 3), em que o planeta estacionou, se deslocava para Leste, em relação ao fundo estrelado. Na posição (3, 3, 3) já realiza o seu movimento retrógrado que se verifica, aproximadamente, até pouco depois da posição (6, 6, 6). Na posição (7, 7, 7) já retomou seu movimento para Leste.

O máximo da retrogradação de um planeta interno acontece, também, nas proximidades do alinhamento entre Sol – planeta interno – Terra. Para o planeta Mercúrio, por exemplo, o máximo da sua retrogradação acontece quando ele está passando, praticamente, na frente do Sol (aproximadamente, na posição (5, 5, 5), da Figura 7.4), que representa um ponto muito difícil de ser observado, devido ao intenso brilho da superfície solar. Mesmo para as posições de elongações, de Mercúrio, menores que a máxima e que esteja ocorrendo o movimento retrógrado, sem o auxílio de um telescópio, é difícil de se observar a retrogradação desse planeta. Notemos os comentários de Copérnico sobre essas dificuldades:⁵⁷⁸

Porém, o mais maravilhoso dos movimentos celestes é o de Mercúrio, que percorre caminhos quase inescrutáveis, não permitindo por isso ser facilmente pesquisado. Adiciona-se a isso uma dificuldade, porque quase todo o seu percurso se torna invisível sob os raios solares e, assim, mostra-se visível por poucos dias. Contudo, também ele poderá ser compreendido se alguém ocupar-se dele com grande engenhosidade. [...]

7.9 PERÍODOS HELIOCÊNTRICOS DOS MOVIMENTOS DOS PLANETAS

A partir da análise apresentada nas seções anteriores é possível passar das observações (períodos sinódicos) ao período do movimento dos planetas em torno do Sol.

No caso dos planetas inferiores, como sua velocidade angular é maior do que a da Terra, eles ficam constantemente ultrapassando a Terra, de uma forma

⁵⁷⁸ Copérnico, 127.

cíclica. Em cada um desses ciclos, o planeta sofre um ciclo de retrogradação, quando visto da Terra. Portanto, em um tempo longo, o número de ciclos de retrogradação é igual ao número de vezes que o planeta ultrapassou a Terra, que pode ser calculado facilmente, como será indicado abaixo, utilizando notação moderna⁵⁷⁹.

Seja ω_P a velocidade angular do planeta, no sistema heliocêntrico, e ω_T a velocidade angular da Terra em torno do Sol, no mesmo sistema. A velocidade angular relativa será $\omega_{PT} = \omega_P - \omega_T$. O tempo T_{PT} entre duas ultrapassagens sucessivas da Terra pelo planeta será dada por $2\pi/\omega_{PT}$, e esse é exatamente o período sinódico. Representando as velocidades angulares do planeta e da Terra em função de seus períodos orbitais T_P e T_T e substituindo na relação acima, obtém-se após uma manipulação simples:

$$T_P = \frac{T_{PT} \times T_T}{T_{PT} + T_T} \quad (7.1)$$

Portanto, conhecendo-se o período sinódico do planeta e o período do movimento da Terra em torno do Sol (365,25 dias), pode-se calcular o período sideral heliocêntrico do planeta.

A fórmula acima vale para os planetas inferiores (Mercúrio e Vênus). Para o caso dos planetas superiores, há uma pequena modificação, porque suas velocidades angulares são menores do que a da Terra. Assim, esses planetas são ultrapassados pela Terra (e não o oposto), e em cada ciclo desses ocorre uma retrogradação. Portanto, o número de ciclos de retrogradação é igual ao número de vezes que a Terra ultrapassa o planeta, e o tempo entre duas ultrapassagens sucessivas é igual ao período sinódico.

Para o caso dos planetas superiores, seja ω_P a velocidade angular do planeta, no sistema heliocêntrico, e ω_T a velocidade angular da Terra em torno do Sol, no mesmo sistema. A velocidade angular relativa será $\omega_{PT} = \omega_T - \omega_P$. O tempo T_{PT} entre duas ultrapassagens sucessivas da Terra pelo planeta será dada por $2\pi/\omega_{PT}$, e esse é exatamente o período sinódico. Representando as velocidades

⁵⁷⁹ Kaufmann e Freedman, 78-79.

angulares do planeta e da Terra em função de seus períodos orbitais T_P e T_T e substituindo na relação acima, obtém-se após uma manipulação simples a fórmula que pode ser aplicada para os planetas superiores (Marte, Júpiter, Saturno):

$$T_P = \frac{T_{PT} \times T_T}{T_{PT} - T_T} \quad (7.2)$$

A partir dessas fórmulas, podemos utilizar os períodos sinódicos fornecidos por Copérnico e calcular os períodos siderais para os planetas. O resultado, em notação decimal, está na Tabela 7.3.

Tabela 7.3: Períodos sinódicos (S) e períodos siderais heliocêntricos (T) dos planetas

Planeta	S (dias)	T (dias)
Mercúrio	115,88	87,97
Vênus	583,92	224,70
Terra		365,25
Marte	779,94	686,95
Júpiter	398,38	4392,0
Saturno	378,09	10755

7.10 DISTÂNCIA AO SOL DE UM PLANETA INTERNO

Um ponto de muita importância, da teoria de Copérnico, foi permitir calcular a distância dos planetas ao Sol. No sistema geocêntrico ou geostático, não era necessário conhecer as distâncias dos planetas à Terra para calcular seus movimentos. Essas distâncias precisavam ser estabelecidas por argumentos adicionais, e como vimos havia muita discordância sobre a ordem de distância à Terra entre os astros: Sol, Mercúrio e Vênus. No entanto, no sistema de universo de Copérnico, não poderia haver mais nenhuma discordância nas distâncias dos planetas ao Sol, porque aquilo que observamos é o resultado conjunto do movimento do planeta em torno do Sol e do movimento da Terra em torno do Sol,

e portanto o movimento aparente nos permite comparar, indiretamente, a órbita da Terra com a órbita do planeta.

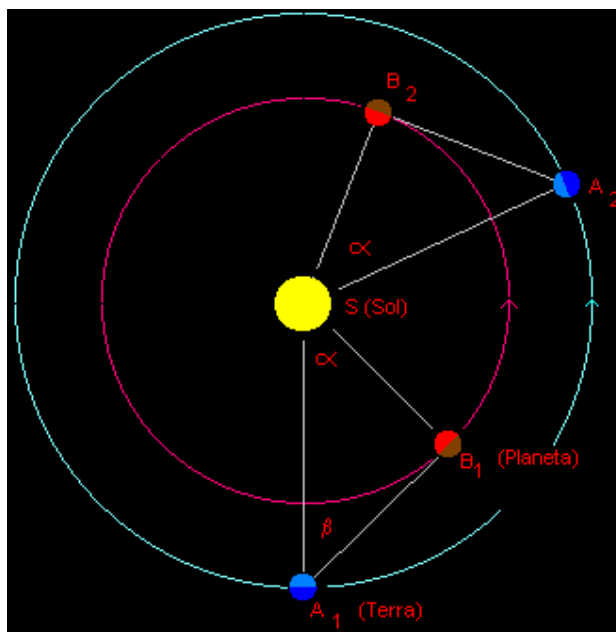


Figura 7.5: As configurações SA_1B_1 e SA_2B_2 se repetem, para um planeta interno, no período sinódico S , observadas da Terra. Mas, essas configurações estão afetadas pelo movimento da Terra.

De uma maneira simples, conhecendo-se o ângulo de máxima elongação do planeta interno, β , pode-se estimar o valor de α , no triângulo retângulo SA_1B_1 . Conhecendo-se β , que representa a altura do planeta logo que o Sol desaparece no horizonte do observador, determina-se a distância do planeta ao Sol através da equação:

$$SB_1 = SA_1 \cdot \sin \alpha \quad (7.3)$$

Para os planetas internos, o ângulo de elongação máxima ao Sol era bem conhecidos. Assumindo-se, para Mercúrio $\alpha = 23^\circ$ (23° é um valor médio da

elongação máxima)⁵⁸⁰, tem-se $SB_1 = 0,39$ (a distância Sol–Terra é assumida como unitária, isto: $SA_1 = 1$). Para Vênus, que⁵⁸¹

[...] jamais se opõe ao Sol, pois a Terra não pode ficar entre eles, mas se move de cada lado do Sol até certas distâncias que consistem nos pontos de tangência da circunferência com as linhas procedentes do centro da Terra: em ambos os casos, nunca supera 48 graus em nossas observações. [...]

Assumimos para a elongação máxima média de Vênus ao Sol $\alpha = 45^\circ$, portanto, a distância desse planeta ao Sol, será dada por: $SB_1 = 0,71$.

No *Commentariolus*, Copérnico obtém para os raios dos deferentes de Vênus e Mercúrio, respectivamente, os valores; 0,720 e 0,376 (tomando o raio do deferente da Terra como unidade).⁵⁸²

7.11 DISTÂNCIA AO SOL DE UM PLANETA EXTERNO

Para os planetas externos, Copérnico obtém para os raios de seus deferentes: 1,52 para Marte, 5,22 para Júpiter e 9,21 para Saturno.⁵⁸³

De uma maneira simples, o período sideral de um planeta externo, poderá ser calculado com a equação (7.2), onde $T = 365,25$ dias é o período sideral da Terra e S_{ex} é o período sinódico do planeta externo.

Com relação à distância do planeta externo ao Sol, é possível fazer a análise partindo de uma posição em que o planeta externo, a Terra e o Sol estão alinhados⁵⁸⁴ (posição A_1C_1S na Figura 7.6). Esse ângulo mede 180° na posição A_1 (visto da Terra, planeta – Terra – Sol estão alinhados, isto é: quando o planeta está nascendo do lado Leste, o Sol está se pondo do lado Oeste) e diminui até o

⁵⁸⁰ Segundo Hanson, as alturas angulares de Mercúrio variam de 18° a 28° , e 23° representa o valor médio. Hanson, 262.

⁵⁸¹ Copérnico, 125.

⁵⁸² Copérnico, *Commentariolus*, 77.

⁵⁸³ Ibid., 76.

⁵⁸⁴ Hanson, 264.

ângulo de 90° , na posição A_2 , da mesma figura (quando o planeta está cruzando o meridiano do observador, o Sol está se pondo do lado Oeste). Essa posição é representada no triângulo retângulo A_2C_2S . Seja Δt , medido em dias, o intervalo de tempo entre essas duas configurações, A_1C_1S e A_2C_2S . Assim, nesse intervalo de tempo Δt , a Terra varreu o ângulo $\alpha_T = 360^\circ \cdot \Delta t / T_T$ e o planeta externo $\alpha_P = 360^\circ \cdot \Delta t / T_{ex}$.

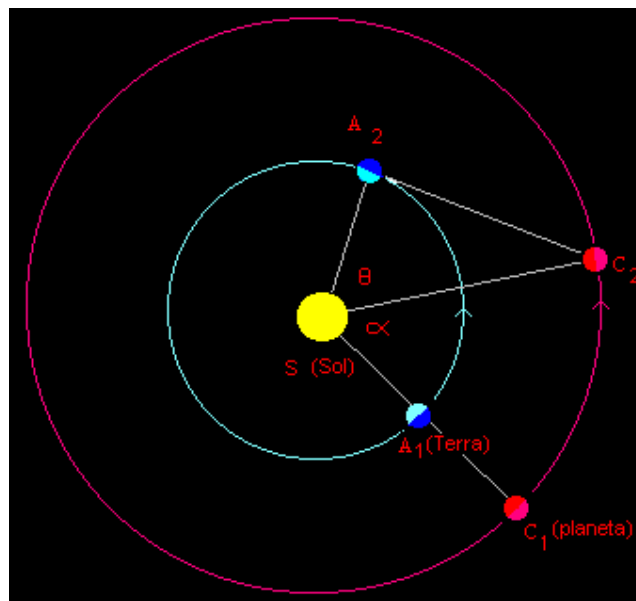


Figura 7.6: Deve-se medir o intervalo de tempo Δt para que o sistema Sol-Terra-planeta passe da configuração SA_1C_1 para SA_2C_2 .

Portanto, o ângulo de interesse para se estimar a distância do planeta externo ao Sol, é dado por:

$$\begin{aligned}\theta &= \alpha_T - \alpha_P \\ &= 360 \cdot \Delta t (1/T_T - 1/T_{ex}) \\ &= 360 \cdot \Delta t (T_{ex} - T_T) / (T_T \cdot T_{ex})\end{aligned}\quad (7.4)$$

Conhecendo-se o ângulo θ , determina-se a distância do planeta externo ao Sol, com a seguinte equação:

$$SC_2 = 1/\cos\theta \quad (7.5)$$

onde a distância Sol-Terra é tomada como uma unidade, $SA_2 = 1$.

Para os planetas externos⁵⁸⁵, por exemplo Marte, o intervalo de tempo entre configurações SA_1C_1 e SA_2C_2 é $\Delta t = 106$ dias⁵⁸⁶. Portanto, para esse planeta $\theta = 48,9^\circ$ e a distância $SC_2 = 1/\cos(48,9^\circ) = 1,52$.

Embora esse fosse um método *possível* para determinar essas distâncias, sabe-se que Copérnico não fez observações astronômicas originais que permitissem esses cálculos. Ele se baseou no modelo de Ptolomeu, e fez uma reinterpretação daquela teoria. Considere inicialmente apenas os planetas externos. No modelo geocêntrico, as retrogradações são produzidas pelo epiciclo. No modelo de Copérnico, as retrogradações são produzidas pelo movimento da Terra em torno do Sol. Assim, o epiciclo de Ptolomeu representa, essencialmente, o movimento da Terra (do modelo de Copérnico). A razão entre o raio do epiciclo e o raio do deferente determinados por Ptolomeu é igual à razão entre o raio da órbita terrestre e o raio da órbita do planeta, na teoria de Copérnico.

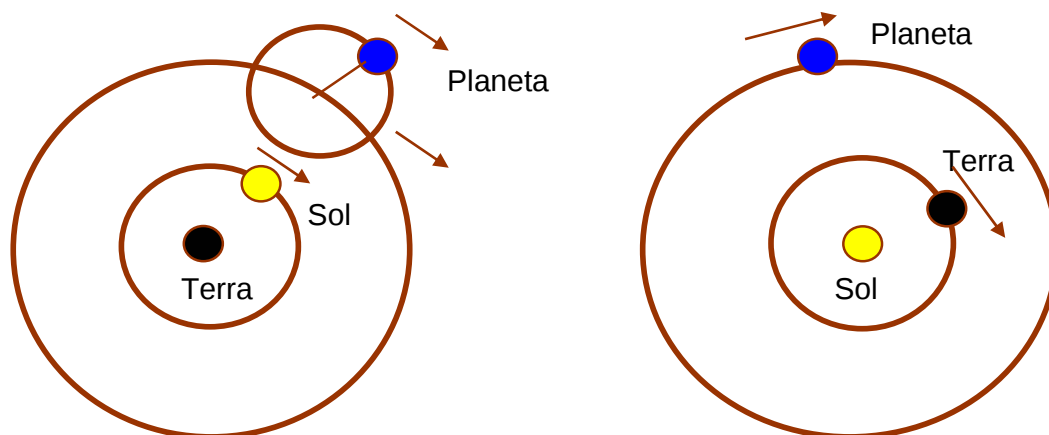


Figura 7.7: Correspondência entre o modelo geocêntrico (esquerda) e heliocêntrico (direita)

⁵⁸⁵ Para Júpiter e Saturno, os intervalos de tempo são, respectivamente: $\Delta t = 87,37$ dias e $\Delta t = 87,97$ dias. Com esses intervalos de tempo, para esses planetas, os ângulos e suas distâncias ao Sol, são: para Júpiter, $\theta = 78,95^\circ$ e $SC_2 = 5,22$ e para Saturno, $\theta = 83,76^\circ$ e $SC_2 = 9,20$ (também nessas medidas, $SA_2 = 1$).

⁵⁸⁶ Hanson, 265.

Por exemplo: utilizando-se os parâmetros da teoria de Ptolomeu, encontramos que o epiciclo de Saturno tem raio igual a 0,108 do seu deferente, ou seja, o deferente é 9,2 vezes maior do que o epiciclo. Na teoria de Copérnico, o deferente de Saturno é 9,2 vezes maior do que o deferente da Terra. Para os outros planetas superiores, Copérnico também utilizou parâmetros da teoria geocêntrica e, através de um simples processo de reinterpretação, determinou a distância dos mesmos ao Sol.

7.12 OS EPICICLOS DA TEORIA DE COPÉRNICO

As distâncias dos planetas internos e externos ao orbe terrestre, obtidos acima, supõem o Sol no centralizado nos deferentes dos planetas e não levam em conta a existência de epiciclos no modelo heliocêntrico. No entanto, na teoria de Copérnico os planetas não possuem um simples movimento circular em torno do Sol. Eles se movem em deferentes excêntricos com epiciclos. Para poder calcular o movimento dos planetas, era necessário conhecer portanto mais detalhes do que os indicados acima.

Noel Swerdlow conseguiu mostrar conclusivamente, na década de 1970, que Copérnico se baseou nas *Tabelas Alfonsinas* para determinar todos os parâmetros de sua teoria⁵⁸⁷. Ele encontrou notas manuscritas de Copérnico encadernadas em um volume que continha também as cópias das tabelas de Regiomontanus (de 1490) e as *Tabelas Alfonsinas* (de 1492), e mostrou que essas anotações manuscritas eram cálculos feitos por Copérnico para obter os parâmetros da teoria heliocêntrica, a partir dos parâmetros alfonsinos.

Os raios dos deferentes e epiciclos, para todos os planetas, apresentados nas *Tabelas Alfonsinas*, baseados no *Almagesto* de Ptolomeu, são comparados, na Tabela 7.4, com os valores obtidos por Copérnico no *Commentariolus*. Nessa tabela, R é o raio do deferente (ou da esfera do planeta) e r_1 e r_2 são os raios,

⁵⁸⁷ Noel M. Swerdlow, "The derivation and first draft of Copernicus's planetary theory: a translation of the *Commentariolus* with commentary," *Proceedings of the American Philosophical Society* 117 (1973): 423-512; Noel M. Swerdlow, "A Summary of the Derivation of the Parameters in the *Commentariolus* from the Alfonsine Tables," *Centaurus* 21, no. 3-4 (1977):201-213.

respectivamente, dos epiciclos maior e menor.⁵⁸⁸ Tanto Copérnico como os redatores das *Tabelas Alfonsinas*, a fim de obterem uma melhor concordância com os registros das observações, tiveram que se utilizar de três epiciclos para Mercúrio e dois epiciclos para os demais planetas.

Esses valores podem ser interpretados, por exemplo para o planeta Saturno, da seguinte maneira:

$$\textit{Tabelas Alfonsinas: } R = 230;50,24 = 230 + 50/60 + 24/60^2 = 230 + 0,84 = 230,84$$

$$r_1 = 19;40,52 = 19 + 40/60 + 52/60^2 = 19 + 0,68 = 19,68$$

$$r_2 = 6;33,37,20 = 6 + 33/60 + 37/60^2 + 20/60^3 = 6 + 0,56 = 6,56$$

$$\textit{Commentariolus: } R = 230;50 = 230 + 50/60 = 230 + 0,83 = 230,83$$

$$r_1 = 19;41 = 19 + 41/60 = 19 + 0,68 = 19,68$$

$$r_2 = 6;34 = 6 + 34/60 = 6 + 0,57 = 6,57$$

Na Tabela 7.4, a distância Sol – Terra, representada por R, está sendo dividida em 25 partes iguais. Por outro lado, considerando-se a distância Sol –Terra como sendo unitária, tem-se, para o planeta Saturno: $R = 230,83/25 = 9,23$ raios terrestres; $r_1 = 19,68/25 = 0,787$ e $r_2 = 6,57/60 = 0,263$. Observe que o raio do deferente de Saturno, de 9,23, se aproxima do valor encontrado pela equação (7.5).

Tabela 7.4: Comparação entre raios de deferentes e epiciclos obtidos nas *Tabelas Alfonsinas* e valores publicados no *Commentariolus*

Planeta	Tabelas Alfonsinas	Commentariolus	Diferença
Saturno R	230; 50, 24	230; 50	
r_1	19; 40, 52	19; 41	
r_2	6; 33, 37, 20	6; 34	
Júpiter R	130; 24, 43	130; 25	

⁵⁸⁸ *Ibid.*

r_1	10; 6, 3	10, 6	
r_2	3; 22, 1	3, 22	
Marte R	37; 58, 35	38; 0	0; 3, 53
r_1	5; 37, 53	5; 34	0; 1, 37, 40
r_2	1; 52, 37, 40	1; 51	
Sol R	26; 38	25; 0	
Vênus R	17; 58, 39	18; 0	
r_1	0, 42, 30	0; 45	
r_2	0; 14, 10	0; 15	
Mercúrio R	9; 24	9, 24	
r_1	1; 48	1; 41	0; 7
r_2	0,36	0; 34	0; 2
r_3	0; 14, 30	0; 14, 30	
Lua r_1/R	1/10 + 0; 10/18	1/10 + (1/10)/18	
r_2/r_1	1/4; 44	1/4; 45	

Comparando-se os valores dos raios dos deferentes e dos epiciclos, de acordo com a Tabela 7.4, obtidos com os sistemas heliocêntrico e geocêntrico, verifica-se que as diferenças são desprezíveis. Daí se conclui que Copérnico construiu uma astronomia muito semelhante àquela construída por Ptolomeu, permutando a antiga posição da Terra pelo Sol, como havia sugerido por Aristarco.

7.13 OUTROS ASPECTOS DA TEORIA DE COPÉRNICO

A teoria apresentada no *Commentariolus* é mais simples do que a versão final da teoria de Copérnico publicada no *Sobre as Revoluções dos Orbes Celestes*. Ao escrever o *Commentariolus*, Copérnico queria utilizar apenas movimentos circulares uniformes. No *Sobre as Revoluções*, ele se rendeu à mesma tentação que havia desviado Ptolomeu dos movimentos simples: o desejo de salvar os fenômenos com grande precisão.

O recurso ptolomaico dos equantes permitia explicar variações de velocidade sem introduzir novos movimentos circulares. Copérnico rejeitou os equantes, pois não podia conceber movimentos circulares que não fossem uniformes em relação

a seus próprios centros. Isso fez com que ele precisasse aumentar o número de movimentos circulares do seu modelo, para obter resultados semelhantes aos de Ptolomeu. Por isso, a crença popular de que o sistema heliocêntrico de Copérnico é uma grande simplificação em relação à teoria geocêntrica de Ptolomeu, é falsa⁵⁸⁹. Em muitos pontos Copérnico precisou utilizar o dobro do número de círculos do que Ptolomeu, e sua teoria pode ser considerada menos elegante e menos adaptável em vários aspectos. Nota-se que a eliminação do equante e o uso de movimentos circulares uniformes por Copérnico segue as mesmas linhas já adotadas por astrônomos islâmicos anteriores, como Tusi e al-Shatir⁵⁹⁰.

Ao desenvolver o modelo para o movimento de Mercúrio, Copérnico afastou-se da idéia de excêntricos móveis com epiciclos. Ptolomeu havia introduzido um mecanismo que fazia o centro do excêntrico girar, de modo a produzir um movimento resultante mais complexo. Em vez de adotar o mesmo recurso, Copérnico utilizou o par de círculos rolantes de Tusi, de modo a obter oscilações que melhoravam a concordância entre a teoria e a observação.

O modelo desenvolvido por Copérnico para o movimento de Mercúrio é idêntico ao de Ibn al-Shatir, exceto pela escolha heliocêntrica e pelo valor dos parâmetros⁵⁹¹. No entanto, Copérnico não citou em sua obra nem o nome de Tusi, nem o de al-Shatir.

No caso da teoria da Lua, é evidente que não faz diferença nenhuma supor que a Terra está parada no centro do universo ou supor que ela é um planeta: nos dois casos, supõe-se que a Lua gira em torno da Terra. Podia assim ter ocorrido que Copérnico mantivesse a teoria lunar de Ptolomeu, sem alterações. Porém, como já vimos, a teoria de Ptolomeu para a Lua, embora previsse muito bem sua posição, levava à consequência indesejável de que o diâmetro da Lua devia mudar significativamente durante o mês. Esse aspecto da teoria de Ptolomeu incomodou muito Copérnico, que desenvolveu um novo modelo para a Lua, utilizando um segundo epiciclo, em vez do excêntrico móvel. Com esse novo modelo ele foi capaz de explicar tão bem quanto Ptolomeu os movimentos em

⁵⁸⁹ Neugebauer, 204.

⁵⁹⁰ Kennedy, cap. 12, 23.

⁵⁹¹ *Ibid.*, cap. 12, 22.

longitude, com a vantagem de que a distância entre a Lua e a Terra não variava muito (apenas cerca de 10%), sendo assim compatível com as observações. É curioso que o modelo da Lua utilizado por Copérnico é idêntico à teoria desenvolvida anteriormente por Ibn Al-Shatir⁵⁹². Não se sabe se Copérnico estudou os trabalhos desse astrônomo. É pouco provável que ele chegasse, independentemente, a modelos tão semelhantes ao do astrônomo islâmico.

7.14 A MOTIVAÇÃO DO TRABALHO DE COPÉRNICO

No “Prefácio” do *Sobre as Revoluções dos Orbes Celestes*, Copérnico explica alguns dos motivos que teriam motivado sua proposta⁵⁹³:

- A falta de concordância entre os diversos astrônomos sobre o melhor modo de dar conta dos movimentos celestes
- O uso de certos princípios para explicar os movimentos do Sol e da Lua e outros diferentes para dar conta dos movimentos dos 5 planetas
- Os astrônomos que conseguem dar conta dos movimentos dos planetas com círculos concêntricos fazem uso de muitas hipóteses que contradizem os primeiros princípios de regularidade dos movimentos circulares
- Falta uma harmonia e comensurabilidade entre as várias partes da teoria, como se tentássemos encaixar membros de animais diferentes uns nos outros

De certa maneira, os problemas apontados por Copérnico eram semelhantes aos que o neo-platônico Proclus havia criticado. Provavelmente Copérnico subscreveria a frase abaixo:

Os Pitagóricos exigiam que se devia utilizar o menor número de hipóteses, e as mais simples, para relacionar a irregularidade aparente dos corpos celestes à regularidade e à ordem⁵⁹⁴.

⁵⁹² Neugebauer, 197; Kennedy, cap. 12, 22.

⁵⁹³ Copernicus, *On the revolutions of heavenly spheres*, 507.

⁵⁹⁴ Proclus, *Commentaire sur la République*, dissert. XVI, 230.3-6; vol. 3, 185.

Não estando satisfeito com a teoria existente, Copérnico diz que procurou encontrar outras hipóteses e mencionou ter tomado conhecimento da hipótese de Hicetas de que a Terra se move, através da leitura de Cícero; e depois, lendo Plutarco, encontrou menção às teorias de Filolau, Heracleides e Ecfanto⁵⁹⁵. No capítulo 5 do livro I, ele também menciona Heracleides, Ecfanto e Hicetas e Filolau⁵⁹⁶.

Assim, também eu, quando encontrei uma ocasião adequada, comecei a meditar sobre a mobilidade da Terra. E embora essa opinião parecesse absurda, no entanto, porque eu sabia que outros antes de mim haviam tido a liberdade de construir os círculos que mais lhes agradassem para demonstrar os fenômenos dos astros, pensei que me seria também permitido testar se seria possível ou não encontrar demonstrações menos duvidosas do que as de meus predecessores para as revoluções dos globos celestes, assumindo que a Terra tivesse algum movimento.⁵⁹⁷

Muitos princípios utilizados por Copérnico eram aceitos desde Platão. Ele admite que o movimento adequado a uma esfera é o movimento circular; e admite que os movimentos celestes apresentam fenômenos periódicos, e que mesmo as irregularidades observadas ocorrem de acordo com leis constantes, repetindo-se periodicamente. Esses fenômenos só podem ser explicados por movimentos também periódicos, e por isso devem ser explicados por combinações de muitos movimentos circulares⁵⁹⁸.

Para justificar a validade de colocar a Terra em rotação, Copérnico invoca, em defesa de sua teoria, o princípio da relatividade dos movimentos: quando um navio se afasta de um porto, as pessoas do navio sentem como se fosse o porto

⁵⁹⁵ Copernicus, 508.

⁵⁹⁶ *Ibid.*, livro I, cap. 5, 515.

⁵⁹⁷ Copernicus, 508.

⁵⁹⁸ *Ibid.*, livro I, cap. 4, 513-514.

que estivesse se movendo⁵⁹⁹. Como vimos, esse princípio já era bem conhecido, durante a Idade Média.

A partir dos fatos de que as velocidades aparentes dos planetas é variável, e que seus tamanhos e brilhos também variam, Copérnico conclui que suas distâncias à Terra variam e que, portanto, a Terra não é o centro de seus movimentos⁶⁰⁰. Isso poderia ser explicado de duas maneiras: ou eles se aproximam e afastam da Terra, ou a Terra se aproxima e afasta deles – e, aqui, Copérnico menciona a teoria de Filolau, indicando que esse importante matemático havia sustentado que a Terra era um dos planetas e se movia em um círculo.

Ao discutir as distâncias e os movimentos dos planetas, Copérnico tratou inicialmente do problema apresentado por Mercúrio e Vênus. Primeiramente ele descreveu as diversas opiniões e os tipos de argumentos utilizados, referindo-se inclusive a uma observação de Averroes, que teria visto a passagem de Mercúrio na frente do disco solar. Depois de discutir os argumentos e mostrar que são inconclusivos, Copérnico se referiu à teoria descrita por Martianus Capella e alguns outros autores [a teoria de Heraclides] segundo a qual Mercúrio e Vênus circulam em torno do Sol. Então, Copérnico passa a defender essa teoria como sendo a mais adequada, e logo em seguida passa aos outros planetas, sugerindo que é possível aplicar-lhes o mesmo princípio e supor que todos eles circulam em torno do Sol. Admitindo-se isso, verifica-se que a Terra e a Lua estariam compreendidas entre o orbe de Vênus e o orbe de Marte. Como estes dois orbes giram em torno do Sol, seria natural supor também que a Terra (juntamente com a Lua) também giram em torno do Sol⁶⁰¹.

Pode ser que este tenha sido o raciocínio seguido pelo próprio Copérnico e que o levou ao modelo heliocêntrico: talvez ele tenha partido da teoria de Heraclides, e visto que os outros planetas (além de Vênus e Mercúrio) também poderiam girar em torno do Sol (como na teoria posterior de Tycho Brahe) e só

⁵⁹⁹ *Ibid.*, livro I, cap. 8, 519.

⁶⁰⁰ *Ibid.*, livro I, caps. 4-5, 514-515.

⁶⁰¹ *Ibid.*, livro I, cap. 10, 521-525.

depois tenha imaginado que a própria Terra precisaria também se mover em torno do Sol.

No *Sobre as Revoluções dos Orbes Celestes*, Copérnico procura justificar filosoficamente a posição central do Sol:

O Sol está no centro de todos os outros [astros]. Pois quem colocaria esta lâmpada de um belo templo em outro lugar melhor do que este de onde ele pode iluminar tudo ao mesmo tempo? Realmente, foi de forma feliz que alguns o chamaram de lanterna; e outros de mente, e outros ainda, de piloto do mundo. Trimegisto o chama de “deus visível”, e a Electra de Sophocles “aquele que cuida de todas as coisas”. E assim o Sol, como se estivesse descansando em um trono real, governa a família das estrelas que giram em volta dele.⁶⁰²

Esse tipo de argumento é muito semelhante ao encontrado em Proclus:

Se, portanto, é vencedora a tese de que o Sol deve ser colocado no meio dos sete [planetas], como dizem os ensinamentos dos Teurgos e dos deuses, e logo após a Lua, Mercúrio, observem como essa ordem convém aos deuses que presidem toda a criação. De fato, o Sol, como Rei de todo o visível e reproduzindo as forças do Demiurgo pelos raios de sua luz, tem por guardas pessoais todos os Cosmocratas, sendo ele que engendra, que enche de vida e que renova as gerações⁶⁰³.

Nota-se assim, em muitos pontos, uma afinidade entre a motivação de Copérnico e a de pensadores anteriores.

⁶⁰² Copernicus, *On the revolutions of heavenly spheres*, 526-528.

⁶⁰³ Proclus, *dissert. XVI*, 220.22-221.19; vol. 3, 173.

Comentários finais

Da Antigüidade grega a Copérnico, as teorias astronômicas representaram sucessivas tentativas de dar conta dos fenômenos e, ao mesmo tempo, encontrar uma perfeição invisível regendo os movimentos celestes. A explicação do movimento dos planetas e as variações de seus brilhos, se constituiria num dos grandes desafios que a Astronomia deveria superar.

O orbe das estrelas fixas, observado da Terra, girava em torno de seu eixo, de leste para oeste em, aproximadamente, 24 horas, com a mais perfeita regularidade. A Lua, o Sol e cinco "estrelas" com seus movimentos diferentes das demais, também giravam em torno da Terra, na estreita faixa inclinada dos signos do zodíaco. Essas "estrelas", de certa forma, se movimentavam, em relação ao observador, de leste para oeste, contudo, quando observadas em relação às estrelas fixas, na maior parte do tempo, o faziam de oeste para leste, da mesma maneira como a Lua e como o Sol. A Lua que competia nessa corrida com as estrelas fixas, perdia, aproximadamente, 13° por dia e o Sol da ordem de 1° por dia.

As cinco "estrelas", além de se deslocarem de oeste para leste, em relação às estrelas fixas, às vezes estacionavam, e em breves períodos realizavam seus movimentos retrógrados, deslocando-se no sentido oeste, ganhando a corrida com as estrelas fixas. Depois estacionavam novamente e, após isso, retomavam os seus movimentos normais, para leste. Por essas características de movimento, essas cinco "estrelas" foram diferenciadas das demais e receberam o nome de *planetas*.

Os astrônomos babilônicos desenvolveram métodos numéricos para registrar alguns pontos do movimento dos planetas que eles achavam importantes: oposição, conjunção, pontos estacionários onde o planeta invertia o sentido de seu movimento em relação às estrelas fixas; contaram o número de ciclos de retrogradação (anomalias) e o número de rotações siderais (retorno ao mesmo ponto do zodíaco), relacionados a um certo número de anos. Contudo, mesmo fazendo observações precisas do movimento planetário que mais tarde seriam usadas por Hiparco e Ptolomeu, parece que os astrônomos babilônicos não se

dedicavam a uma compreensão mais profunda do universo, discutindo as causas do movimento dos astros através da criação de um modelo de universo.

Talvez um dos primeiros filósofos a propor um modelo de universo teria sido Anaximandro. No modelo desse filósofo, a Terra tem forma cilíndrica, é cercada pela sua atmosfera, e por anéis invisíveis, cheios de fogo. Cada um desses anéis gira em torno da Terra e apresenta uma abertura por onde a luz escapa. As aberturas de dois dos anéis correspondem ao lugares onde se vêem o Sol e a Lua. Anaximandro fixou os tamanhos para esses anéis: o tamanho do anel do Sol seria 27 ou 28 vezes maior que a Terra e o da Lua 18 ou 19 vezes o tamanho da Terra. Por outro lado, Anaxímenes, teria se referido aos planetas, como se fossem semelhantes a folhas de fogo, executam suas voltas [movimento retrógrado?] em consequência de serem desviados de seu caminho pelo ar, que resiste ao seu movimento.

Parece não haver dúvidas que entre os pitagóricos, da época de Parmênides, aceita-se que a Terra tem forma esférica e ocupa uma posição central no universo, em torno da qual, giram os astros.

Com o pitagórico Filolau o modelo de universo já é bem diferente dos modelos anteriores. O centro do universo é ocupado por um fogo central e a Terra gira em redor desse fogo. Da posição habitada da Terra não se pode ver o fogo central, isto é, os habitantes estão sempre em oposição ao fogo central. Do ponto de vista astronômico, esse fato somente teria uma explicação se a Terra se transladasse em torno do Sol em 24 horas e descrevesse um movimento de rotação, em torno de um eixo de rotação, também em 24 horas. Como consequência dessa cosmologia, o orbe das estrelas fixas poderia se encontrar em repouso. Segundo Filolau, a estrutura de universo e a ordem de distâncias seria: a esfera das estrelas fixas que é o limite desse universo; depois (de fora para dentro) Saturno, Júpiter, Marte, Vênus, Mercúrio, Sol, Lua, Terra, Anti-Terra e, por fim, o fogo central, localizado no centro do universo. A importância desse sistema de universo reside no fato de ter-se atribuído à Terra os movimentos de rotação e de translação. Após Filolau, alguns pitagóricos faziam coincidir o *fogo central* com o centro da Terra: outra vez o universo era suposto geocêntrico.

Platão, na Academia, parece encaminhar seus discípulos, entre outras coisas, para o estudo do movimento planetário que, já nessa época, é muito bem

conhecido observacionalmente, incluindo-se as retrogradações dos planetas, em relação às estrelas fixas. E, entre eles, parece haver um princípio fundamental: por mais complexo que seja o movimento de um planeta, deverá ser explicado por uma combinação de movimentos circulares e uniformes.

Na época de Platão, Eudoxo oferece uma explicação a respeito dos movimentos dos planetas, que ficaria conhecida como sistema das esferas homocêntricas à Terra. Com um total de 27 esferas, Eudoxo consegue dar conta, com razoável aproximação, do movimento da Lua, do Sol e dos cinco planetas conhecidos, incluindo-se as retrogradações. Esse sistema foi complementado por Cálipo, que lhe adicionaria mais movimentos, a fim de melhorar a concordância de algumas previsões teóricas com aquilo que se observa, totalizando 34 esferas homocêntricas à Terra. Depois, a teoria ganha uma fundamentação física por parte de Aristóteles, ficando com um total de 56 esferas homocêntricas à Terra. Nessa época, embora a teoria proposta por Eudoxo explicasse de uma maneira razoável o movimento retrógrado dos planetas e outros aspectos de seus movimentos, tropeçava quando se interpretava que as variações dos diâmetros angulares da Lua e do Sol representavam um afastamento ou aproximação desses astros à Terra. O planeta Marte, por exemplo, apresentava um intenso aumento de brilho no momento da retrogradação. Quando o planeta se encontra, aproximadamente, no ponto médio de seu movimento retrógrado, apresenta-se com o máximo brilho e nesse momento Sol, Terra e Marte estão alinhados. O modelo das esferas encaixadas de Eudoxo, no entanto, não podia prever qualquer aproximação ou afastamento do planeta à Terra.

Platão já havia ensaiado os primeiros passos na estimativa de distâncias dos planetas à Terra e Aristóteles se refere aos comprimentos do equador terrestre. Na época de Platão, os gregos ordenavam os planetas através de seus períodos siderais. Do ponto de vista de um sistema geocêntrico, os períodos do Sol, Mercúrio e Vênus são, praticamente, iguais a 1 ano, o de Marte 2 anos aproximadamente, o de Júpiter 12 anos e o de Saturno 30 anos. Devido aos períodos siderais do Sol, Mercúrio e Vênus serem, praticamente, iguais a 1 ano, há debates sobre a ordem de distâncias desses astros à Terra. Autores como Platão, seguindo idéias astronômicas que a tradição atribuiu aos egípcios,

colocavam a esfera do Sol logo após a esfera da Lua; Cícero, seguindo idéias atribuídas aos Caldeus, colocava Mercúrio e Vênus entre a Lua e o Sol.

Heráclides ensaia um novo modelo de universo, colocando os planetas Mercúrio e Vênus girando em torno do Sol, enquanto este último, e os demais planetas girando em torno da Terra. Para Heráclides, o universo ainda é geocêntrico, mas o Sol já não é um astro comum: ele se apresenta com dois "satélites", e a Terra gira em torno de seu eixo de rotação em, aproximadamente, 24 h, permanecendo em repouso o orbe das estrelas fixas. A partir de Heráclides, a semente da idéia dos epiciclos estava plantada, e a idéia de colocar alguns planetas girando em torno do Sol começava a se tornar plausível, abrindo o caminho para uma teoria heliocêntrica.

Aristarco, muitos séculos antes de Copérnico, trocou a Terra central pelo Sol. No entanto, sua proposta não foi aceita. Não se sabe se ele construiu um modelo matemático detalhado de sua proposta. Os mais destacados astrônomos posteriores a Aristarco, Apolônio e Hiparco, baseando-se na não observação da paralaxe estelar, ainda eram partidários do sistema geocêntrico. Um dos mais citados astrônomos geocentristas foi Ptolomeu, que soube usar os deferentes, excêntricos e epiciclos introduzidos por Hiparco e Apolônio, adicionando um dispositivo chamado equante e com a Terra muito próxima ao centro do universo.

Tanto Apolônio como Hiparco conseguiram explicar os movimento retrógrados dos planetas e outros fenômenos celestes, mas Ptolomeu fez isso com muito mais precisão que seus antecessores. Embora o sistema de Ptolomeu previsse muito bem as datas em que um determinado planeta poderia ser encontrado em determinada posição no céu, o sistema ficava cada vez mais complicado: para cada planeta havia um sistema diferente de deferentes excêntricos com epiciclos e ponto equante. Para conseguir dar conta do movimento de cada planeta era instituído um sistema todo particular. Não se hesitava em adaptar a teoria para que se adequasse às observações, fosse mudando os parâmetros ou introduzindo novos movimentos em seu modelo.

Parece que uma solução um pouco mais simples para o universo seria aquela proposta por Aristarco e caberia a Copérnico o privilégio de desenvolvê-la: levando-se o Sol para o centro do universo, e a Terra ocupando o antigo lugar do Sol, fazia com que os movimentos dos planetas se tornassem combinações de

movimentos circulares entre o movimento próprio do planeta, em torno do Sol, modificado pelo movimento do centro de observação, a Terra, que também se movimentava em torno do Sol.

No sistema heliocêntrico, a Lua deve ser um satélite da Terra e esta última, por sua vez, descreve seu movimento em torno do Sol. Embora Copérnico não tenha deixado nenhuma explicação, a respeito de ter transformado a Lua num "satélite da Terra", por achá-la, talvez, trivial, acreditamos que havia argumentos simples que ele poderia ter utilizado para justificar esse passo.

A teoria de Copérnico proporciona uma nova interpretação para o movimento retrógrado dos planetas externos e internos à órbita terrestre. Para os planetas externos, como Marte, Júpiter e Saturno, o ponto médio do movimento retrógrado (poder-se-ia dizer que é o ponto onde o planeta assumiu a maior velocidade angular para oeste das estrelas) acontece quase no alinhamento entre Sol – Terra – planeta externo. Esse movimento é de fácil observação porque pode ser visto à noite pelo observador terrestre. Para os planetas internos à órbita da Terra, como Mercúrio e Vênus, o ponto médio do movimento retrógrado acontece muito próximo do alinhamento entre Terra – Planeta – Sol. Esse movimento é de difícil observação porque somente pode ser visto pelo observador terrestre logo após o pôr-do-Sol ou um pouco antes do nascer do Sol (as dificuldades deverão ser maiores para Mercúrio que se encontra mais próximo ao Sol).

Para o sistema geocêntrico, assumido por grandes astrônomos da Antigüidade, o período sideral, era observado através de duas passagens consecutivas de um planeta por uma estrela de referência. E esses astrônomos, que ordenavam os planetas por ordem de distância à Terra, através dos períodos siderais, não encontravam nenhuma dificuldade na ordem dos planetas Marte, Júpiter e Saturno. Contudo, em relação a Mercúrio, Vênus e Sol, essa ordem, muitas vezes, foi alterada ao longo de séculos de observações, porque os três astros apresentavam um "período sideral", praticamente, de 1 ano. No sistema heliocêntrico, pode-se estimar os períodos siderais dos planetas internos e externos. Através desses períodos foram estimadas as distâncias dos planetas ao Sol. Copérnico não precisou realizar observações astronômicas novas para estabelecer os parâmetros de sua teoria. Ele se baseou nos parâmetros da teoria

geocêntrica e a partir daí calculou os raios dos deferentes dos planetas, de seus epiciclos e os períodos siderais.

Copérnico, no *Commentariolus* ou no *As Revoluções dos Orbes Celestes*, não consegue demonstrar que o sistema de universo de Ptolomeu esteja errado, mas realiza algo de fundamental quando permuta as posições da Terra e do Sol, reduzindo a Terra a um simples planeta. Copérnico questionou diversos aspectos da obra de Ptolomeu, ao elaborar o sistema heliocêntrico, porém seus argumentos não foram conclusivos. Embora tivesse proposto uma solução diferente para explicar o movimento dos planetas, principalmente no período de retrogradação, as previsões feitas com a sua teoria não eram mais precisas que as realizadas com o sistema de Ptolomeu.

Muitos dos recursos utilizados por Copérnico na elaboração do seu sistema eram os mesmos empregados por Ptolomeu. Nos aspectos em que ele se afastou das técnicas ptolomaicas, seguiu autores medievais, principalmente islâmicos. A “revolução” realizada por Copérnico foi influenciada por pressupostos filosóficos pitagóricos e platônicos sobre a simplicidade e harmonia da natureza e pela busca de explicações para as irregularidades aparentes dos movimentos dos astros.

Referências Bibliográficas

- Abetti, Giorgio. *Historia de la Astronomia*. México: Fondo de Cultura Económica, 1992.
- Aristóteles. *The Works of Aristotle*. Ed. W. D. Ross. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 1952.
- Autolycos de Pitane. *La Sphère en Mouvement. Levers et Couchers Héliques. Testimonia*. Trad. Germaine Aujac. Paris: Belles Lettres, 1979.
- Capella, Martianus. *The Marriage of Philology and Mercury*. Trad. William Harris, Stahl, Richard Johnson e E. L. Burge. New York: Columbia University Press, 1977.
- Cicero, Marcus Tullius. *Aratea, Fragments Poétiques*. Trad. Jean Soubiran. Paris: Belles Lettres, 1993.
- Cohen, I. Bernard. *El Nacimiento de la Nueva Física*. Madrid: Alianza Editorial, 1989.
- Cohen, M. R.; Drabkin, I. E. *A Source Book in Greek Science*. New York: McGraw-Hill, 1948.
- Conches, William of [Guillaume]. *A Dialogue on Natural Philosophy*. Trad. e Notas Italo Ronca e Matthew Curr. Notre Dame: University of Notre Dame Press, 1997.
- Copérnico, Nicolau. *Commentariolus*. Com. e Trad. Roberto de Andrade Martins. São Paulo: Nova Stella, 1990.
- Copérnico, Nicolau. *As Revoluções dos Orbes Celestes*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1984.
- Copernicus, Nicolaus. *On the Revolutions of the Heavenly Spheres*. vol. 16. Great Books of the Western World. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 1952.
- Cornford, Francis MacDonald. *Plato's Cosmology. The Timaeus of Plato Translated with a Running Commentary*. London: Routledge and Kegan Paul, 1952.
- Corral, Marco Arturo Moreno. *La Morada Cósmica del Hombre: Ideas e Investigaciones Sobre el Lugar de la Tierra en el Universo*. México: Fondo de Cultura Económica, 1997.

- Crowe, Michael J. *Theories of the World from Antiquity to the Copernican Revolution*. New York: Dover, 1990.
- Dampier, William C. *Pequena História da Ciência*. São Paulo: IBRASA, 1961.
- Debus, Allen G. *Man and Nature in Renaissance*. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.
- Dreyer, J. L. E. *A History of Astronomy from Thales to Kepler*, 2. ed. New York: Dover, 1953.
- Duhem, Pierre. *Salvar os Fenômenos: Ensaio Sobre a Noção de Teoria Física de Platão a Galileo*. Trad. Roberto de Andrade Martins. In: *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 1984.
- Geminus. *Introduction aux Phénomènes*. Trad. Germaine Aujac. Paris: Belles Lettres, 1975.
- Gerd, A. B. *Os Filósofos Pré-Socráticos*. 15^a ed. São Paulo: Cultrix, 1997.
- Goldstein, Bernard R. "Theory and Observation in Medieval Astronomy," *Isis* 63 (1972): 39-47.
- Hanson, Norwood Russel. *Constelaciones y Conjecturas*. Madrid: Alianza Editorial, 1985.
- Heath, Thomas. *Aristarchus of Samos, the Ancient Copernicus*. New York: Dover, 1981.
- Heath, Thomas. *Greek Astronomy*. New York: Dover, 1991.
- Heródoto, Clio. *História*. vol. 1. Rio de Janeiro: W. M. Jackson, 1950.
- Homero, *Ilíada*. Rio de Janeiro: W. M. Jackson, 1950.
- Hoskin, Michael and Gingerich, Owen. "Islamic Astronomy," In: Michael Hoskin (ed), *The Cambridge Illustrated History of Astronomy*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- Hoskin, Michael. "Astronomy in Antiquity." In: Michael Hoskin (ed), *The Cambridge Illustrated History of Astronomy*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- Kaufmann, W. J. and Freedman, R. A. *Universe*. 5 ed. New York: W. H. Freeman and Company, 1999.
- Kennedy, Edward S. *Astronomy and Astrology in the Medieval Islamic World*. Aldershot, Ashgate, 1998.

- Kirk, S., Raven, J. E., Schofield, M. *The Presocratic Philosophers. A Critical History with a Selection of Texts*, 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- Koestler, Arthur. *O Homem e o Universo*. São Paulo: IBRASA, 1989.
- Kuhn, Thomas S. *A Revolução Copernicana*. Lisboa: Edições 70, 1990.
- Lalande, Jérôme de. *Bibliographie Astronomique*. Paris: Imprimerie de la République, 1803.
- Macrobius, Ambrosius Theodosius. *Commentary on the Dream of Scipio*. Trad. e notas William Harris Stahl. New York: Columbia University Press, 1952.
- Martins, Roberto de Andrade. "Galileo e o Princípio da Relatividade," *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* 9 (1986): 69-86.
- Martins, Roberto de Andrade. "O Vácuo e a Pressão Atmosférica, da Antigüidade a Pascal," *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* [série 2] 1 (1989): 9-48.
- Martins, Roberto de Andrade. "Em Busca do Nada: Considerações Sobre os Argumentos a Favor e Contra o Vácuo," *Trans/Form/Ação* 16 (1993): 7-27.
- Martins, Roberto de Andrade. *O Universo: Teorias Sobre Sua Origem e Evolução*. 5ª ed. São Paulo: Editora Moderna, 1997.
- Médici, Roberto Nogueira. *Astronomia de Posição*. Rio de Janeiro: Forence Universitária, 1989.
- Nasr, Seyyed Hossein. *An Introduction to Islamic Cosmological Doctrines*. Albany: State of New York University, 1993.
- Neugebauer, Otto. *A History of Ancient Mathematical Astronomy*. Berlin: Springer-Verlag, 1975. 3 vols.
- Neugebauer, Otto. *The Exact Sciences in Antiquity*. 2. ed. New York: Dover, 1969.
- Pedersen, Olaf. *Early Physics and Astronomy: a Historical Introduction*. Cambridge: Cambridge University, 1993.
- Platão. *The Dialogues of Plato*. Trad. Benjamin Jowett. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 1952.
- Plinius Secundus, Gaius. *Histoire Naturelle*. Trad. Jean Beaujeu. Paris: Belles Lettres, 1950.
- Proclus. *Commentaire sur la République*. Trad. A. J. Festugière. Paris: J. Vrin, 1970.

- Proclus. *Commentaire sur le Timée*. Trad. A. J. Festugière. Paris: J. Vrin, 1968.
- Ptolomeo, Claudio. *Las Hipotesis de los Planetas*. Edição e notas de Eulália Pérez Sedeño. Madrid: Alianza Editorial, 1987.
- Ptolemy, *The Almagest*. vol. 16. Great Books of the Western World. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 1952.
- Riddell, R. C. "Eudoxan Mathematics and the Eudoxan Spheres," *Archive for the History of Exact Sciences* 20 (1979): 1-19.
- Russell, Beltrand. *História da Filosofia Ocidental*. vol. 2. São Paulo: Editora Nacional, 1969.
- Sacrobosco, Johannes de. *Tratado da Esfera*. Trad. Pedro Nunes, Int. e notas de Carlos Ziller Camenietzk. São Paulo: Nova Estela, 1991.
- Sambursky, S. *El Mundo Físico de los Griegos*. Madrid: Alianza Editorial, 1990.
- Schiaparelli, Giovanni. *Scritti sulla Storia della Astronomia Antica*. Parte prima: scritti editi. Bologna: Nicola Zanichelli, 1926.
- Sedeño, Eulalia Pérez. *El Rumor de las Estrellas: Teoría y Experiencia en la Astronomía Grega*. Madrid: Siglo XXI de España Editores, 1986.
- Seeds, Michael A. *Fundamentos de Astronomía*. Barcelona: Edições Omega, 1989.
- Sverdlow, Noel M. "The Derivation and First Draft of Copernicus's Planetary Theory: a Translation of the *Commentariolus* with Commentary," *Proceedings of the American Philosophical Society* 117 (1973): 423-512.
- Sverdlow, Noel M. "A Summary of the Derivation of the Parameters in the *Commentariolus* from the Alfonsine Tables (with an Appendix on the Length of the Tropical Year in Abraham Zacuto's *Almanach Perpetuum*)," *Centaurus*: 21, no. 3-4 (1977):201-213.
- Vitruvius. *De l'Architecture*. Trad. Jean Soubiran. Paris: Belles Lettres, 1969.
- Vlastos, Gregory. *O Universo de Platão*. Trad. Maria Luiza Monteiro Salles Coroa. Brasília: Universidade de Brasília, 1987.
- Waerden, B. L. van der. "On the Motion of the Planets According to Heraclides of Pontus," *Archives Internationales d'Histoire des Sciences* 28 (1978):167-182.
- Wright, Rosemary. *Cosmology in Antiquity*. London: Routledge, 1995.