

INSTITUTO DE FÍSICA/USP

4300156 — GRAVITAÇÃO

Notas de Aula

1ª parte

João Zanetic

2º semestre/2019

GRAVITAÇÃO/Notas de Aula
(Versão parcialmente revista em julho de 2017)

1ª parte

João Zanetic/IFUSP

Índice

Introdução geral	1
Capítulo 1. Da roda aos céus	5
Capítulo 2. Os sistemas de mundo dos Gregos	14
Capítulo 3. O tamanho do mundo grego	31
Capítulo 4. Algumas ideias sobre a mecânica na Idade Média	39
Capítulo 5. A revolução copernicana.....	49

4300156 GRAVITAÇÃO/ Notas de aula (1ª edição de 1995, revista em julho de 2017)

João Zanetic/IFUSP

"Só se pode entender a essência das coisas quando se conhecem sua origem e seu desenvolvimento."

Heráclito¹

Introdução geral

Nesta disciplina apresento uma introdução elementar a um importante tema da física, a **gravitação**. Nela pretendo trabalhar com os conceitos básicos, leis, princípios, evidências empíricas, descobertas, intuições, enfim, a variada gama de elementos que compuseram os diversos modelos teóricos que já foram desenvolvidos na tentativa de explicar o que se entende por gravitação e os diferentes alcances de suas aplicações.

Esta apresentação seguirá uma abordagem que, ao mesmo tempo, trabalhe com o algoritmo necessário para a solução de problemas clássicos associados a esse tema e sirva de exemplo de um modo de aplicação da **História e da Filosofia da Ciência no ensino de Física**, principalmente tendo em mente que isto será oferecido a alunos de Licenciatura, futuros professores de física do Ensino Médio.

Ilustrarei também o relacionamento de várias das visões de mundo, associadas aos conceitos físicos que surgiram em determinados momentos da história, à literatura como exemplo de uma interação entre duas áreas do conhecimento consideradas muitas vezes quase antagônicas.

Na busca das raízes do que se entende por **atração gravitacional**, procuro apresentar um breve histórico do desenvolvimento de algumas ideias relacionadas com o surgimento da **mecânica**, ramo da Física que foi fundamental para o desenvolvimento de toda a estrutura da Física teórica durante os séculos XVIII e XIX, como bem ilustram estas palavras de Albert **Einstein**, quando destaca o papel de **Newton** na consolidação da mecânica:

"A importância dos trabalhos de Newton consiste principalmente na criação e na organização de uma base utilizável, lógica e satisfatória para a

¹ Heráclito (cerca de 540-470 AC), filósofo grego nascido em Éfeso, cidade da Jônia, colônia grega da Ásia Menor, foi um eminente pensador pré-socrático que nos legou inúmeras frases isoladas que os historiadores apresentam como sequências de aforismos. Uma de suas frases mais conhecida é a seguinte: *"Não cruzarás o mesmo rio duas vezes, porque outras são as águas que correm nele"*.

*mecânica propriamente dita. Mas estes trabalhos permanecem até o fim do século XIX o programa fundamental de cada pesquisador, no domínio da física teórica. Todo acontecimento físico deve ser traduzido em termos de massa, e estes termos são redutíveis às leis do movimento de Newton. A lei da força é a exceção. Em seguida era preciso alargar e adaptar este conceito ao gênero de fatos utilizados pela experiência. O próprio Newton tentou aplicar seu programa à ótica, imaginando a luz composta de corpúsculos inertes. A ótica da teoria ondulatória também empregará a lei do movimento de Newton, após ter sido aplicada a massas distribuídas de maneira contínua. A teoria cinética do calor também baseia-se exclusivamente sobre as equações do movimento de Newton. Ora, esta teoria não apenas forma os espíritos para o conhecimento da lei da conservação da energia, mas também serve de base para uma teoria dos gases, confirmada em todos os pontos, bem como uma concepção muito elaborada da natureza conforme o segundo princípio da termodinâmica. A teoria da eletricidade e do eletromagnetismo desenvolveu-se de igual maneira até nossos dias, inteiramente sob a influência diretriz das ideias fundamentais de Newton (substância elétrica e magnética, forças agindo a distância). Até mesmo a revolução operada por Faraday e Maxwell na eletrodinâmica e na ótica, revolução que constitui o primeiro grande progresso fundamental das bases da física teórica depois de Newton, mesmo esta revolução se realiza integralmente dentro do esquema das ideias newtonianas."*²

Dada essa ampla generalidade de aplicação, a história da evolução das ideias da mecânica, da qual o estudo da gravitação ocupa uma posição de destaque, acaba se confundindo com a história do nascimento da própria física clássica, assim denominada após o advento e vitória do paradigma³ newtoniano no século XVIII.

² Albert Einstein. **Como vejo o mundo**. Editora Nova Fronteira, 7ª edição, Rio de Janeiro, 1981, pág.186. Este é um livro de leitura fácil, agradável e instrutiva. Nele Einstein abordava temas culturais, políticos, judaicos e também alguns estudos científicos com comentários sobre alguns físicos e a física.

³ O termo **paradigma** é aqui utilizado no sentido que lhe dá Thomas S. Kuhn no seu livro **A Estrutura das revoluções científicas** (Ed. Perspectiva, São Paulo), que foi utilizado como referencial epistemológico destas Notas de aula. Pode se entender por paradigma uma determinada teoria científica, por exemplo, a mecânica de Newton, quando aceita de forma unânime por uma comunidade científica em determinado período histórico. Pode se englobar no termo paradigma, também, determinados conceitos isolados como, por exemplo, o conceito de força ou o de elétron. Os cientistas que fazem pesquisa, baseados nos paradigmas de sua ciência, estarão praticando, segundo Kuhn, a **ciência normal**, em oposição à **revolução científica**, episódio em que, para resolver determinado problema que não encontra solução adequada segundo os paradigmas vigentes, parte da comunidade científica acaba apelando para uma nova teoria antagônica às até então vigentes.

Este estudo tem como ponto de partida alguns antecedentes pré-históricos relevantes ao assim chamado pensamento científico presente na antiga civilização grega. Este procedimento oferece um pano de fundo contra o qual abordaremos alguns temas da ciência grega que levaram ao estabelecimento do paradigma aristotélico-ptolomaico, assim denominado em função das preciosas contribuições dos filósofos gregos Aristóteles (384-322 AC) e Cláudio Ptolomeu (século II DC). A razão deste itinerário prende-se ao fato de que a mecânica, nascida no século XVII, é o ponto culminante de uma revolução científica que teve seu início exatamente na tentativa de superação da visão de mundo aristotélico-ptolomaica.

Um dos pontos culminantes dessa revolução foi o livro **De revolutionibus orbium coelestium**, de Nicolau Copérnico, publicado em 1543, que pode ser considerado como legítimo herdeiro da pré-mecânica dos antigos gregos.

Uma pergunta poderia surgir aqui: se Aristóteles viveu no século IV AC e Ptolomeu no século II de nossa era, o que aconteceu com o desenvolvimento da ciência grega do movimento e da astronomia nos mais de mil anos que separam Copérnico da época da consolidação do paradigma aristotélico-ptolomaico? A resposta a essa questão também será abordada brevemente neste texto. Aqui surgirão alguns personagens normalmente ausentes nas disciplinas de mecânica, tais como Filopono, Buridan, Oresme, entre outros. Veremos como os conceitos e ideias da mecânica, desenvolvidos por esses pensadores, influenciaram os físicos do século XVII, particularmente a Galileu Galilei e René Descartes, também ilustres ausentes da abordagem tradicional da mecânica nos nossos cursos, inclusive os universitários.

Em seguida dedicaremos algum espaço para a apresentação do candidato a paradigma copernicano, a resistência dos opositoristas aristotélicos e a solução apresentada por Copérnico para alguns dos problemas que não eram bem explicados pelo geocentrismo.

Ao contrário do que se afirma normalmente, o sistema heliocêntrico de Copérnico, apesar de resolver problemas não solúveis anteriormente, não é imediatamente muito melhor que o sistema geocêntrico dominante nesse período. Desta forma, o candidato a paradigma copernicano teve que passar por um processo de articulação⁴ para poder se confrontar com as severas críticas dos opositores. Nesse trabalho de articulação se destacaram as figuras de Giordano Bruno, Galileu Galilei, Johannes Kepler e Isaac Newton, para nomear apenas os mais importantes.

⁴ O termo **articulação** também vem do acima citado livro de T.S. Kuhn. Ele se refere ao fato de que, para ser bem sucedido, um novo paradigma deve sofrer adaptações e mudanças que o habilitem a resolver novas situações que o confrontem ou superar críticas que lhe sejam feitas. Por exemplo, o uso do telescópio por Galileu e a consequente descoberta dos satélites de Júpiter vão significar um forte suporte empírico para o candidato a paradigma copernicano.

Assim, os séculos XVI e XVII registraram o nascimento da mecânica que se constituiu no mais poderoso sistema de mundo até os princípios deste século. Os séculos XVIII e XIX testemunharam um acabamento mais refinado do edifício da mecânica, como veremos na parte final.

Capítulo 1. Da roda aos céus

1.1. A revolução agrícola

A caminhada humana rumo ao conhecimento da natureza, isto é, ao diálogo inteligente com o mundo, certamente teve início de um modo que hoje podemos tão somente conjecturar. Dos nossos mais primitivos ancestrais, os hominídeos que distam mais de dois milhões de anos de nossa época, aos primeiros homo sapiens, temos apenas vestígios de como viviam. Dos mais recentes, que viveram há alguns milhares de anos, temos evidências que permitem esboçar um quadro do seu modo de vida.

As mais variadas motivações e necessidades levaram esses antigos ancestrais a utilizar uma característica não presente nos outros animais: a associação do pensamento com a ação, a elaboração abstrata e o fazer com as mãos. A necessidade de se alimentar, proteger-se das mudanças climáticas e de animais hostis, o nascimento dos filhos e seu crescimento, e outras motivações bem concretas, ao lado de razões mais sutis como o deslumbramento com a própria natureza, o firmamento celeste, a morte, a busca de comunicação com os outros, foram aos poucos sofisticando a espécie humana.

Muitos dos elementos que hoje são utilizados pela física fazem parte da história das habilidades primárias humanas, predecessoras da técnica, e são muito anteriores a qualquer tentativa sistemática de explicação. Como afirma J. D. Bernal

"As habilidades humanas surgiram antes do conhecimento humano. Por exemplo, o arremesso de objetos é uma habilidade que deve ter surgido naturalmente, mas os homens devem ter logo notado que a capacidade de arremessar dependia do comprimento do braço, assim a primeira ideia pode ter sido a de "aumentar" o braço pela utilização de uma vara propulsora. (...) esta seria o primeiro estágio para um tipo mecânico de propulsão e o primeiro instrumento de propulsão mecânico conhecido teria sido o arco de flecha."⁵

É muito difícil imaginar como se processou a evolução das habilidades de construção de utensílios domésticos e de caça, o uso e domínio do fogo, da alavanca, de arremessar, soprar, utilizar velas em embarcações, o uso de roupas, etc.

Há certamente centenas de milhares de anos que o cérebro humano tem uma estrutura semelhante ao atual. Isto significa que a capacidade de pensar, resolver problemas, apelar para o imaginário, há muito são características presentes na espécie humana.

⁵ J. D. Bernal. **The extension of man**. Paladin, London, 1972, págs. 40/41. Trata-se de um livro em que o físico e historiador da ciência Bernal abordava a física até o final do século XIX segundo a concepção de que ela simplesmente era uma extensão dos sentidos humanos.

Era só uma questão de acoplar o pensar ao agir, frente a desafios concretos ou imaginários. Portanto, a necessidade de se proteger de animais hostis, de lidar com as variações climáticas, de se adequar a vida ao aumento populacional, provocaram o avanço na produção de utensílios e implementos cada vez mais sofisticados, que se constituíram na base material de uma comunidade.

Assim, o ser humano foi construindo uma cultura associada à sua capacidade de aprender e, portanto, de transformar. Essa cultura incipiente aos poucos foi se tornando mais dinâmica com o surgimento da linguagem, que se constituiu num dos primeiros elementos de uma base social.

Além das questões mais próximas ao cotidiano, parece claro que os animais e plantas despertaram um vivo interesse de nossos ancestrais pré-históricos. John D. Bernal destaca que são testemunhas disso as pinturas primitivas encontradas em cavernas espalhadas em diferentes partes do planeta, como as de Lascaux, na França, e as de Altamira, na Espanha. Essas imagens sugerem as mais variadas interpretações: ligação mística particular com os animais, oferendas para dar boa sorte na caça ou um ato inteligente de produzir algo - uma obra de arte? - por simples prazer.

Bernal chega a afirmar que a **arte primitiva** desempenhou um importante papel em direção à sofisticação do pensamento humano, pois:

*"(...) todo esse conjunto de técnicas de representação pictórica são as fontes das artes visuais, como também, do simbolismo gráfico, da matemática, da escrita, que tornaram possível a ciência racional."*⁶

E assim caminha a humanidade.

No período neolítico situado aproximadamente entre 8000 e 3000 AC, ocorreram mudanças fundamentais que marcaram definitivamente a entrada do homem numa forma de organização social e de relação com a natureza extremamente complexa.

"O passo revolucionário e decisivo consistia em que o homem, em essência, em vez de alimentar-se de forma parasitária dos dons da natureza, em vez de coletar ou capturar seu alimento, passava a produzi-lo. Com a domesticação de animais e o cultivo de plantas, com a criação de animais e a agricultura, o homem começava sua marcha triunfal sobre a natureza e se tornava um pouco mais independente da veleidade do destino, da sorte e do acaso. Iniciava-se, assim, a era da previsão organizada da vida; o

⁶ J. D. Bernal. **Science in history**. Penguin, London, 1969, vol.1, pág. 72. Há tradução desta obra para o português, editada em Portugal pela Editorial Presença. A biblioteca do IFUSP dispõe também de uma versão espanhola com o título **Historia social de la ciencia**. Neste livro, Bernal apresentava a ciência dentro da história, envolvendo todas as áreas do conhecimento desde a pré-história.

*homem começava a trabalhar e a economizar. (...) Com estes rudimentos - posse da terra, de animais domesticados, de ferramentas e provisão de alimentos - tinha início também a diferenciação da sociedade em extratos e classes.”*⁷

Esse acontecimento descrito por Hauser é conhecido como revolução agrícola. Ele provocou o surgimento das primeiras cidades e de uma complexa infraestrutura: construção de casas, tecelagem, cerâmica, troca de produtos, propriedade privada, etc.

1.2. Conhecimento: diálogo com o mundo

A relação homem-natureza tornou-se intensamente dinâmica. Bernal sugere que, por essa época, o conceito de causa e efeito deve ter desempenhado uma função básica para a compreensão das necessárias observações humanas, principalmente no que se referia às plantas e aos animais. Ele adianta também que, provavelmente, a fabricação de cestos, a tecelagem e a divisão das terras, entre outros, devem ter levado ao nascimento da **geometria** (forma, número). O mesmo é compartilhado por Bento de Jesus Caraça quando relaciona a divisão de terras no antigo Egito com as primeiras unidades de medida de comprimento e às figuras geométricas.⁸

A concentração de grupos humanos em cidades provocou um aumento da densidade populacional. A necessidade de mais alimentos forçou esses grupos humanos a procurarem terras mais férteis, que foram encontradas às margens dos grandes rios. Essa mudança aos poucos produziu novos impactos tecnológicos gerados pela necessidade da construção de diques e canais, que podem ser comprovados por vestígios deixados nas ruínas dessas antigas cidades. Surgiram, desse modo, as antigas civilizações da Mesopotâmia, do Egito, da Suméria, etc.

A partir de 3000 AC, com o início da chamada idade dos metais, mudanças profundas ocorreram nessas antigas civilizações. Os metais, inicialmente utilizados apenas como ornamentos, passaram logo a alterar a produção de implementos agrícolas, ferramentas e armas. Isso provocou impactos na carpintaria, alvenaria, transportes, construção de barcos e no surgimento da roda.

O transporte marítimo, além de ter provocado a construção de melhores embarcações, levou à necessidade de precisar sua localização na água quando a terra não era

⁷ Arnold Hauser. **Historia social de la literatura y del arte**. Ed. Guadarrama, Espanha, 1976, pág. 23.

⁸ Bento de Jesus Caraça. **Conceitos fundamentais da matemática**. Lisboa, 1975. Livro escrito em 1941 por esse professor de matemática português que, em muitos aspectos, foi precursor da utilização da história da ciência no ensino.

mais visível. Inicialmente os povos navegantes utilizaram um método bastante original: pássaros famintos a bordo! Mais tarde, começaram a olhar para os céus para determinar seu caminho pelos mares e rios. Essa necessidade, como também a curiosidade e o encantamento despertado pelos céus, levou Platão, filósofo grego que será comentado mais adiante, a escrever o seguinte:

*"Se nunca tivéssemos visto as estrelas, o Sol e o céu, nenhuma das palavras que pronunciamos sobre o universo teria sido dita. Mas a visão do dia e da noite, e dos meses, e as revoluções dos anos, criaram um número e nos deram uma concepção do tempo, e o poder de indagar sobre a natureza do universo. A partir daí deduzimos a filosofia (...)"*⁹

Por essa época as diversas civilizações começaram a utilizar elementos e técnicas mais apuradas: balança de braços, plano inclinado, alavanca, tração animal, entre outros. Teve início também o uso de escalas, por exemplo, desenhos de construção com escala bem definida foram utilizados na Mesopotâmia por volta de 2400 AC. No Egito, por volta de 1500 AC, era utilizada a unidade de comprimento cúbito (comprimento médio do antebraço).

Mais uma novidade com inúmeras implicações: nas cidades antigas havia lugares de destaque que consistiam nos templos habitados por algum deus. Os sacerdotes, intermediários entre os deuses e os homens, além das questões relacionadas ao espírito, aos poucos começaram a incorporar características e funções de uma primeira classe administrativa. Isso porque os templos passaram a ser também, devido a suas grandes proporções, o lugar de armazenamento de mercadorias.

Bernal sugere que quando os sacerdotes tornaram-se responsáveis pelo armazenamento de mercadorias não podiam mais confiar apenas na memória. Foram obrigados a registrar o tipo e a quantidade de mercadorias depositadas no templo. Além dos números, devem ter utilizado também a balança na quantificação de mercadorias. Daí deve ter-se originado também o primeiro sistema de contagem. O registro inicial pode ter sido a figura do próprio produto seguida de traços designando a contagem.

Esses símbolos figurativos, além dos desenhos em cavernas já mencionados, deram origem à lenta construção da escrita e dos números. A aritmética provavelmente surgiu antes da escrita. No antigo Egito existiam sistemas numéricos que não só envolviam contagens como também frações e suas respectivas notações hieroglíficas.

Carl B. Boyer, faz os seguintes comentários sobre a matemática dos antigos egípcios e babilônios:

⁹ Citado por Timothy Ferris. **O despertar da via Láctea**. Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1990, pág. 3.

"Pode ser verdade que a geometria ainda não se havia cristalizado a partir de uma matriz tosca de experiência espacial que incluía toda espécie de coisas que podiam ser medidas; mas é difícil não perceber na preocupação babilônia e egípcia com os números e suas aplicações algo muito próximo do que usualmente, em épocas posteriores, chamou-se álgebra.

(...) havia no Egito e na Babilônia problemas que têm as características de matemática de recreação. Se um problema pede a soma de gatos e medidas de trigo, ou de um comprimento e uma área, não se pode negar a quem o perpetrou ou um certo humor ou uma procura de abstração."¹⁰

1.3. Medida do tempo e calendário

Paralelamente a essa evolução das habilidades de contar, de resolver problemas algébricos e de trabalhar com figuras geométricas, seja na solução de problemas práticos seja por puro lazer ou satisfação intelectual, que trazia consigo uma capacidade de abstração cada vez maior, havia outros elementos presentes nessas antigas civilizações e que também devem ter contribuído para a elaboração de um pensamento abstrato cada vez mais sofisticado. Citam-se como exemplos: os rituais relacionados com a morte, evidenciados pelas urnas mortuárias sempre encontradas nessas antigas civilizações; os temores do desconhecido; a misteriosa relação com os corpos celestes. Um pouco disso tudo aparecia nos desenhos, nas construções e nos vestígios de escrita. Essa trajetória de evolução do pensamento deve ter dado origem ao misticismo, à religião, ao pensamento abstrato/filosófico, ao imaginário livre, etc.

Por outro lado, essa capacidade múltipla associada aos problemas gerados pelo desenvolvimento de comunidades mais populosas, levou à criação de um modo de produção que exigia a solução de problemas cada vez mais complexos. Um deles, vinculado ao controle da fertilidade da terra, levou à necessidade de se estabelecer **medidas do tempo** que permitissem prever as épocas da sementeira e da colheita, nomes das primeiras estações do ano definidas por esses povos antigos.

A solução do problema de medir a duração do tempo aos poucos foi levando o homem antigo a associar o fluir do tempo com o movimento dos corpos celestes que, certamente, tanto os maravilhava. Assim, a repetição do dia e da noite, as fases da Lua, o movimento do Sol, das estrelas e das estrelas errantes ou planetas forneceram para diferentes civilizações diversos modos de realizar essa medida do passar do tempo.

¹⁰ Carl B. Boyer. **História da matemática**. Ed. E. Blucher e Ed. da USP, São Paulo, 1974, pág. 31. Ótimo livro para quem deseja se aprofundar na história da matemática. Escrito numa linguagem simples porém sem perder sua boa erudição e precisão conceitual.

Tudo estava pronto para o surgimento de um elementantíssimo para o posterior nascimento da ciência: o **calendário**. Os primeiros calendários foram baseados no movimento regular da Lua. Os sumérios, por volta de 2500 AC, desenvolveram o calendário lunar que foi utilizado por seus sucessores na Mesopotâmia. As civilizações agrícolas, como a egípcia, fizeram uso do calendário solar, por conta de serem povos agrícolas e, portanto, os eventos anuais eram muito mais vitais para eles que os mensais.

Portanto, fenômenos naturais periódicos, como as cheias dos rios e o ciclo de fertilidade do solo, foram associados ao movimento periódico do Sol, levando à criação do calendário solar. Os egípcios, por exemplo, utilizavam um calendário solar de doze meses de trinta dias. Mais tarde acrescentaram mais cinco dias nesse calendário. Isso ocorreu pela observação cuidadosa de Sirius: os astrônomos egípcios notaram que as cheias do rio Nilo ocorriam mais ou menos coincidentemente com a época em que Sirius nascia ao fim do crepúsculo. O intervalo de tempo entre duas repetições sucessivas do fenômeno durava 365 dias. Eles dividiram o período de um ano em três estações: enchente, semeadura e colheita.¹¹

Temos assim uma razão socioeconômica para a origem do calendário. Porém, motivações místicas ou mágicas também influenciaram na construção de calendários e a correspondente observação sistemática dos corpos celestes. As fases da Lua não estariam de algum modo relacionadas com as fases da vida humana? Os corpos celestes não determinariam características dos seres humanos e dos acontecimentos? É com base nesse tipo de questões que nasceu a **astrologia**.

Portanto, a **astronomia** nasceu da combinação de interesses socioeconômicos e místico-mágicos. A construção de calendários e o desenvolvimento da astrologia produzem a astronomia.

1.4. O movimento dos corpos celestes

As diferentes religiões que se desenvolveram nesses povos também influenciaram no estudo dos corpos celestes. O Sol, a Lua e os planetas foram transformados em deuses por babilônios, egípcios, gregos, etc.

Esse duplo interesse com relação à observação dos corpos celestes atingiu inclusive civilizações pouco conhecidas. Um exemplo dessa fusão é o conjunto de grandes pedras Stonehenge, pesando dezenas de toneladas, localizadas a cerca de cem quilômetros de Londres, na Inglaterra, dispostas segundo certa regularidade. Essas pedras

¹¹ Muitos outros povos também criaram seus calendários e sua forma de representação, como os calendários criados pelos Maias que habitavam o México ainda antes da invasão européia da América. Nestas Notas de aula não me preocupei em procurar detalhes dessas civilizações por conta da preocupação em narrar a pré-história do geocentrismo construído pelos antigos gregos.

poderiam constituir, ao mesmo tempo, um ponto de encontro, um templo e um observatório astronômico das comunidades que habitavam aquela região.

Ao lado da curiosidade inata ao homem, do desejo de alimentar seu imaginário e da necessidade de resolver problemas práticos, esses povos começaram também a conjecturar sobre possíveis explicações a respeito da forma do mundo físico visível, da regularidade do movimento dos corpos celestes e de outros fenômenos intrigantes.

Arthur Koestler esboçava o seguinte quadro:

"O mundo dos babilônios, egípcios e hebreus era uma ostra, com água por baixo e por cima, suportada pelo firmamento sólido. (...) A ostra dos babilônios era redonda, a terra não passava de uma montanha oca posta no centro, flutuando nas águas do fundo; em cima havia uma cúpula sólida coberta pelas águas superiores. As águas superiores filtravam-se através da cúpula em forma de chuva, e as águas inferiores erguiam-se em fontes e nascentes. (...) O universo dos egípcios era uma ostra mais retangular (...) o Sol e a Lua conduziam os seus barcos entrando e desaparecendo através de várias portas. As estrelas fixas eram lâmpadas suspensas nas abóbadas (...)"¹²

Nessas civilizações pré-helênicas foi inventado um instrumento rudimentar para ajudar nas observações e na divisão do dia em intervalos mais curtos. Os babilônios e os egípcios utilizavam uma espécie de relógio de Sol, o **gnômon**, que nada mais era que uma pequena haste fincada no chão e que projetava uma sombra passível de ser medida ao longo do decorrer do dia. Heródoto menciona em suas *Historias*, escritas cerca de 450 AC, que os gregos teria aprendido o uso do gnômon com os babilônios¹³.

Como a posição aparente do Sol, a ponta da haste e a ponta da sombra estão sobre uma mesma linha reta, as medidas do comprimento e da direção da sombra determinavam a posição do Sol. O conjunto desse tipo de observações permitiu um conhecimento mais preciso e sistemático da variação da posição do Sol ao longo do dia e ao longo do ano.

Assim, os antigos habitantes da Terra, séculos antes da era cristã, já tinham uma boa descrição do movimento aparente dos corpos celestes. Mas, apesar da grande

¹² KOESTLER, Arthur. **Os sonâmbulos**. Ibrasa, 1961, págs. 4 e 5. Existe uma edição mais recente desse livro, de 1991, inexplicavelmente com um novo título em português: **O homem e o universo**. Trata-se de um livro muito interessante que aborda a aventura da construção do conhecimento tendo como tema central os trabalhos e a vida de Kepler. É muito rico em citações dos clássicos não encontrados muitas vezes em português.

¹³ EVANS, James. **The history & practice of ancient astronomy**. Oxford University Press. 1998, p.27.

precisão das suas informações, muitos historiadores relutam em afirmar que hajam constituído uma ciência. Desenvolveram, por certo, uma incrível capacidade de contar, de calcular, uma aritmética muito sofisticada e uma astronomia aritmética, mas ainda não possuíam uma ciência, com o sentido que entendemos hoje. Isto é, não conseguiam criar modelos que lhes permitissem fazer previsões ou reproduzir os fenômenos que observavam.

O historiador da ciência Derek de Solla Price fazia a seguinte comparação entre babilônios e gregos, que estudaremos brevemente a seguir:

*"É inevitável que nos vejamos levados a comparar a refinada ciência babilônia com a dos gregos. Em um e outro caso percebemos como que uma tradição razoavelmente contínua que se transmite até os últimos séculos anteriores a Cristo, quando ambas, a ciência grega e a babilônia, se enfrentam com o problema do movimento - enlouquecedoramente quase regular - dos planetas (...) Apesar de toda a maestria dos babilônios no que se refere a cálculos, não se encontra, na Babilônia, elemento algum daquele método de argumentação lógica próprio do grego Euclides."*¹⁴

O processo de evolução do conhecimento parece sofrer uma aceleração quando nos aproximamos do século VI AC. Nesse século ocorreram grandes movimentos intelectuais em diferentes partes da Terra. Era o século de Buda, Confúcio, Lao-Tsé, Tales, Zaratustra, Pitágoras, entre outros. A este respeito, Arthur Koestler afirmava o seguinte:

*"O sexto século antes de Cristo constituiu o ponto crítico da espécie humana. (...) Era o início da grande aventura: a indagação prometiana das explicações naturais e causas racionais, que, nos dois mil anos seguintes, transformaria a espécie mais radicalmente do que havia feito os duzentos mil anos anteriores."*¹⁵

É claro que o que acabou de ser dito não pode ser tomado literalmente. A aventura da espécie humana muito deve a inumeráveis homens e mulheres que viveram nos séculos anteriores ao acima mencionado. Permanecerão para sempre anônimos os descobridores e inventores fantásticos que nos deram os primeiros sons significativos, os primeiros desenhos, a primeira roda, o domínio do fogo, o gnômon, o relógio de água, a

¹⁴ DE SOLLA PRICE, Derek. **A ciência desde a Babilônia**. Ed. Itatiaia e Ed. da USP, 1976, pág. 26. Neste livro, Solla Price tratava de uma série de temas pertinentes à discussão das características de uma civilização científica. Para tanto aborda temas sobre o mecanicismo e as relações entre ciência e tecnologia. O último capítulo trata com bom humor das "enfermidades da ciência".

¹⁵ KOESTLER, Arthur, **op.cit.**, nota 12, pág. 5.

alavanca, a balança, a escrita cuneiforme, os canais de irrigação, os deuses, as pirâmides, as pedras misteriosas, o círculo e o triângulo, a busca do desconhecido.

Porém, os gregos, particularmente nos trezentos anos em torno do século III AC, deixaram uma marca tão profunda na civilização ocidental que não podemos deixar de concordar com o filósofo Bertrand Russell quando afirma:

"Em toda a história não há nada tão surpreendente nem tão difícil de explicar como o repentino aparecimento da civilização na Grécia. Muito do que constitui uma civilização já havia existido, milhares de anos antes, no Egito e na Mesopotâmia, estendendo-se aos países vizinhos. Mas faltavam certos elementos que foram fornecidos pelos gregos. O que estes realizaram na arte e na literatura é conhecido de toda a gente, mas o que realizaram no campo puramente intelectual é ainda mais excepcional. Inventaram as matemáticas (a aritmética e algo de geometria já existiam entre os egípcios e babilônios, mas principalmente em formas rudimentares. O raciocínio dedutivo, partindo de premissas gerais, foi uma inovação grega.), a ciência e a filosofia; foram os primeiros a escrever histórias, em lugar de meros anais; especulavam livremente sobre a natureza do mundo e as finalidades da vida, sem que se achassem acorrentados a qualquer ortodoxia herdada. Foi tão espantoso o que ocorreu que, até recentemente, os homens se contentavam em ficar boquiabertos e a falar misticamente do gênio grego. É possível, porém, compreender o desenvolvimento da Grécia em termos científicos, e vale bem a pena fazê-lo."¹⁶

¹⁶ RUSSELL, Bertrand. **História da filosofia ocidental**. Cia. Ed. Nacional, 1967, livro I, pág. 5.

Capítulo 2. Os sistemas de mundo dos Gregos

2.1. Algumas características gerais da cultura grega

É necessário esclarecer que o breve contato que agora iniciaremos com o conhecimento dos antigos gregos, objetivando captar um panorama da sua física/astronomia, vai fornecer apenas uma pálida e incompleta visão de um conhecimento que começou a se estruturar por volta do século VI AC e se completou ao redor do século II de nossa era.

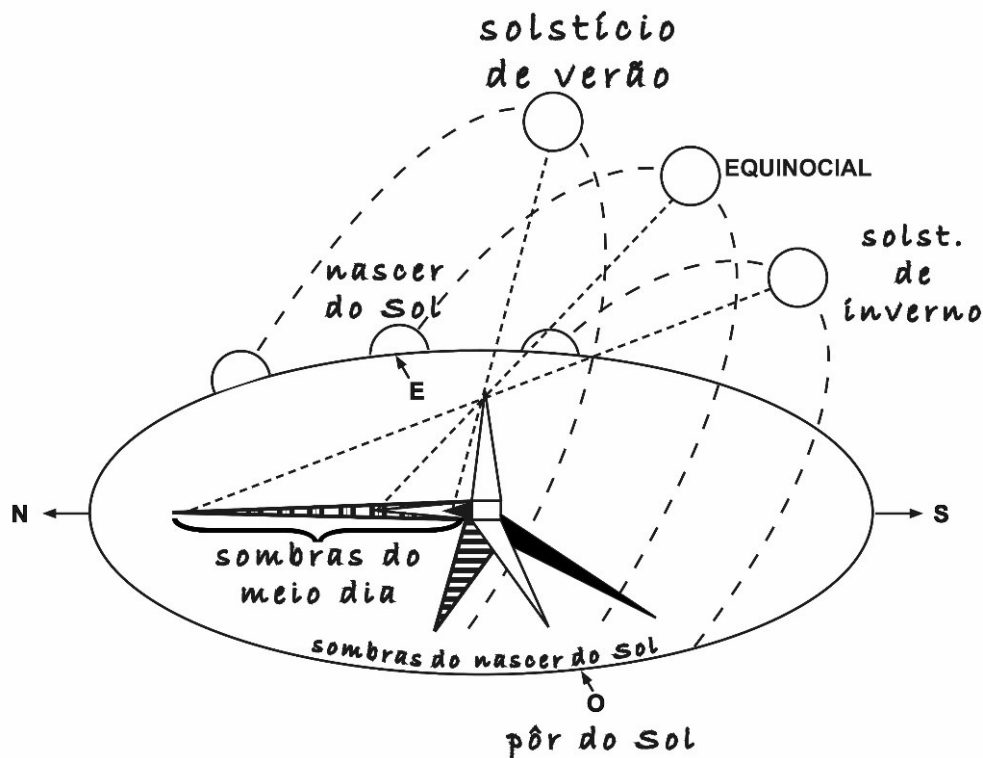


Figura 1. Exemplos de figuras obtidas pela utilização do gnômon e que deram subsídios para os modelos geocêntricos dos gregos. A figura mostra a sombra do gnômon ao nascer do sol, nas elevações do meio dia e na sua variação sazonal. Como os antigos gregos viviam no hemisfério norte, a figura representa as construções que eles conheciam (Figura extraída do livro de T.S. Kuhn¹⁷).

A civilização grega foi desenvolvida por gregos descendentes de povos nômades que, durante suas inúmeras viagens, assimilaram o conhecimento desenvolvido pelas civilizações egípcia, babilônia e, provavelmente, hindu.

Foi uma assimilação dinâmica que transformou o conhecimento acumulado em material mais simples, mais abstrato e mais racional. Aliás, foi através dos gregos que

¹⁷ KUHN, Thomas S. **The Copernican revolution**. Harvard University Press, USA, 6ª impressão, 1974, pág. 10.

herdamos a cultura de povos mais antigos, cujos vestígios quase desapareceram totalmente. J. D. Bernal comenta que

*"O real conhecimento das civilizações mais antigas afetou o nosso conhecimento apenas através dos gregos. O que sabemos sobre as realizações intelectuais dos egípcios e babilônios, através de suas próprias escritas, chegou até nós muito tarde para afetar diretamente a nossa civilização."*¹⁸

No seu diálogo com a natureza, os gregos introduziram duas características de pensamento e ação bastante originais: a **racionalidade**, explicitada através da utilização de argumentos interpretativos, e o **realismo**, que se traduz pelo uso de experiências comuns. Essas duas características tiveram maior ou menor importância no desenvolvimento do conhecimento grego dependendo da particular organização social reinante.

Houve uma influência inusitada no desenvolvimento do conhecimento: a política, ou seja, a discussão e execução da administração das polis, ou cidades, gregas. A intensa atividade política que marcou a vida grega, nos seus diferentes estágios, desempenhou um papel fundamental na utilização da argumentação sistemática que levou a um grande domínio do discurso. Isso provocou um grande impulso na literatura e na oratória.

Bernal salientava vantagens e desvantagens deste tipo de desenvolvimento: se de um lado ele propiciou o aparecimento de um discurso científico competente, de outro separou o estudo formal do manuseio direto com os objetos e fenômenos do cotidiano, seria a separação entre ciência e técnica. Alguns historiadores destacam uma razão mais social para esta separação: no início da civilização grega encontrávamos o artesão e o intelectual numa mesma pessoa, havendo, portanto, uma integração uma entre o trabalho manual e o intelectual. Porém, a forma dominante de organização social, que incluía a presença de um grande contingente de escravos, propiciou a separação entre os que trabalhavam e produziam e os que tinham o privilégio de ficar meditando, observando, calculando, criando conhecimento abstrato, forçando assim uma dissociação entre o pensar e o fazer.

"À medida que o escravagismo foi se impondo como modo de produção dominante, a ciência foi paulatinamente se desligando dos trabalhos manuais, tornando-se cada vez mais abstrata e contemplativa. Embora o filósofo retirasse as suas ideias básicas sobre o funcionamento da natureza,

¹⁸ J. D. Bernal. **Op. cit.**, nota 6, pág. 161.

observando o trabalho dos artífices, pouco conhecia de primeira mão sobre estas atividades"¹⁹

2.2. Os períodos da civilização grega

Existem várias formas de divisão dos períodos da civilização grega. Uma delas, adotada por Benjamin Farrington²⁰, e que toma por motivo temático o desenvolvimento da ciência grega, apresenta a seguinte divisão de períodos:

1. **Jônico** (c. 600/480 AC): correspondente à época do nascimento da ciência grega. Alguns personagens importantes: Tales, Anaximandro, Pitágoras e Heráclito.
2. **Ateniense** (c. 480/330 AC): ápice da cultura grega. Destacam-se, entre outros, os filósofos: Sócrates (469/399 AC), Demócrito, Platão e Aristóteles.
3. **Helênico** (c. 330/60 AC): corresponde à fase mais importante para a história da ciência grega. Personagens centrais: Euclides (c. 300 AC), Arquimedes, Epicuro, Aristarco de Samos e Hiparco (190/120 AC).
4. **Romano** (até c. século II DC): é o período da decadência. Destaque para Ptolomeu (c. 120 DC).

2.3. Os primeiros filósofos/cientistas gregos

No século VI AC, numa região denominada Jônia, nas costas do mar Egeu, à época da versão definitiva da **Odisseia** e da **Iliada** de Homero, a cosmologia passou por um momento inédito: a busca de **explicações** naturais e causas racionais. Era o início de uma grande caminhada que, nos vinte séculos seguintes, transformaria o homem e seu mundo de forma definitiva. A ciência grega começava a nascer.

Tales de Mileto (624-546 AC), muitas vezes citado como o primeiro cientista, acreditava que a Terra era um disco circular que flutuava sobre a água. Ele foi o introdutor da geometria abstrata na Grécia. Fazia previsões muito precisas de eclipses baseado em tabelas astronômicas elaboradas pelos babilônios. Tales formulou uma pergunta revolucionária que influenciou no pensamento grego: de que matéria prima fundamental era constituído o universo?

Tales considerava a **água** o **elemento** básico do universo e responsável por tudo que nele existe. A água serviria também para dividir o universo, separando a **terra** e o **ar**. O filósofo Bertrand Russell fez o seguinte comentário sobre esse filósofo grego:

¹⁹ Alexandre J. G. Medeiros. **Condicionantes históricos e sociais no surgimento da física**. Dissertação de mestrado, IFUSP/FEUSP, 1984, pág.40.

²⁰ Benjamin Farrington. **A ciência grega**. Ibrasa, São Paulo, 1961.

"Foi um dos Sete Sábios da Grécia, cada um dos quais se tornou famoso por haver proferido um dito sábio; o seu foi, como erroneamente se supõe, "a água é melhor". Segundo Aristóteles, Tales achava que a água é a substância original da qual são formadas todas as outras; e afirmava que a Terra descansa sobre a água. Aristóteles também diz que Tales acreditava que o ímã tinha alma, porque fazia mover o ferro; e, ainda, que todas as coisas estavam cheias de deuses...

A afirmação de que tudo é feito de água deve ser encarada como uma hipótese científica e, de modo algum, como uma tolice. Há anos, a ideia geralmente aceita era a de que tudo era feito de hidrogênio, que é dois terços de água."²¹

Anaximandro (610-547 AC) foi outro importante filósofo da cidade de Mileto e que apresentava um pensamento bem mais complexo que o acima esboçado. Na sua visão o universo não se limitava a uma superfície fechada, tipo caixa, ostra ou esfera, mas possuía extensão e duração infinitas. Entendia que esse universo não constituía apenas um único mundo, era uma combinação de um grande número de mundos.

Anaximandro considerava que a matéria prima fundamental que constituía todas as coisas desse universo, animadas e inanimadas, não era nem a água nem outra qualquer substância conhecida. O elemento fundamental seria uma substância (infinita, indestrutível, eterna e sem propriedades definidas) que, por transformação contínua, daria origem a todas as substâncias conhecidas. Anaximandro interpretava os **quatro elementos** conhecidos (terra, água, ar e fogo), como diferentes formas daquela substância primária indeterminada, envolvidos numa luta contínua e eterna.

A citação seguinte representa um breve exemplo significativo da complexa descrição do universo de Anaximandro:

"(...) em certa época, os quatro elementos que formam o mundo foram dispostos um sobre o outro: a terra, que é a mais pesada, no centro; a água, cobrindo-a; a névoa, sobre a água, e, o fogo, envolvendo tudo. O fogo, ao aquecer a água, fez com que ela se evaporasse, determinando o aparecimento da terra enxuta. Aumentou o volume da névoa, a pressão atingiu o limite máximo. As camadas do universo arderam em torvelinhos de fogo e, rodeadas de tubos de névoa, envolveram a terra e o mar. Assim se fez o universo. Os corpos celestes que vemos são orifícios feitos nos tubos,

²¹ Bertrand Russell, nota 15, pág. 30.

através dos quais brilha o fogo, e os eclipses são obturações parciais ou totais desses orifícios."²²

Que imaginação fantástica! Anaximandro descreve, para olhos e mentes contemporâneos, um estranho universo. Arthur Koestler dizia que essa descrição assemelha-se muito mais a um quadro pintado por Picasso que a um universo imaginado por alguém como o físico Isaac Newton. Certamente seria também extremamente estranha para Anaximandro a descrição do universo feita pela ciência contemporânea.

Várias outras interpretações da natureza surgiram nesse período, associadas ao trabalho intelectual de diferentes filósofos. Heráclito, por exemplo, autor da epígrafe deste capítulo, conhecido como o filósofo da mudança, acreditava no contínuo fluir das coisas por um processo de tensão de forças opostas em constante busca de equilíbrio. Para ele o motor desta contínua transformação, ou o elemento básico do universo, seria o fogo. Alguns autores vêm em suas ideias relativas à interação e transformação dos opostos o nascimento do pensamento dialético.

Como já foi alertado inicialmente, não se pretende aqui explorar as várias escolas de pensamento gregas, mas tão somente destacar parte daquelas que influenciaram a ocorrência da revolução científica dos séculos XVI e XVII.

Assim, não se pode deixar de mencionar os trabalhos do pitagórico Aristarco de Samos (320-250 AC) que propunha uma concepção de universo diferente da defendida por Platão e Aristóteles. Aristarco imaginou o Sol situado no centro do universo e os demais corpos celestes, inclusive a Terra, em movimento orbital ao seu redor. Poucos de seus escritos chegaram até nossa época, mas os testemunhos de Arquimedes (280-212 AC) e Plutarco registram sua concepção heliocêntrica. Plutarco escrevia que:

*"Aristarco de Samos supunha que o céu permanecia imóvel e que a terra se movia num círculo oblíquo, girando ao mesmo tempo sobre o seu eixo."*²³

Essa concepção foi derrotada pela visão geocêntrica dominante e a astronomia de Aristarco foi repelida e esquecida por quase dois mil anos. Deve-se frisar que certamente um dos motivos da rejeição se baseia em algo bem calcado no realismo, pois, contrariando tudo aquilo que era indicado pelos sentidos na experiência cotidiana, Aristarco afirmava que a Terra estava em movimento. Mas tudo indicava que ela estava parada!

Deve-se também a Aristarco um elegante método para calcular distâncias astronômicas como, por exemplo, a distância entre o Sol e a Terra. No próximo capítulo

²² Citado por Benjamin Farrington. **Op. cit.**, nota 19, pág. 29.

²³ Plutarco. Citado por Tymothy Ferris, **op. cit.**, nota 9, pág. 15.

serão apresentados alguns dos cálculos efetuados por Aristarco e outros astrônomos gregos, procurando enfatizar o incrível alcance dessa astronomia construída dois mil anos antes do advento do telescópio.

Arquimedes foi outro filósofo grego que deu contribuição significativa à física e à geometria. Ele procurou a solução matemática de alguns problemas mecânicos, particularmente aqueles relacionados com o equilíbrio dos corpos, equilíbrio dos fluidos, de onde nasceu o **princípio de Arquimedes**, e a determinação do centro de gravidade. Arquimedes observou que o peso de um corpo *diminui* quando este é mergulhado na água. Seu tratado sobre o **Equilíbrio dos planos** teve forte influência no desenvolvimento da mecânica do século XVII, como veremos mais adiante.

2.4. Os pitagóricos e a Terra em movimento

Uma mudança qualitativa importante na cultura grega ocorreu a partir dos trabalhos desenvolvidos por Pitágoras (580-500 AC) e seus seguidores que, em oposição ao **naturalismo** jônico, introduziram uma linha de pensamento mais mística e abstrata. Para eles a chave do enigma do universo estava na matemática e na geometria: o universo seria um modelo de números e formas geométricas associadas aos fenômenos. A **harmonia geométrica** deveria prevalecer e comandar os fenômenos terrestres e celestes.

Algumas das importantes contribuições dos pitagóricos ao desenvolvimento do conhecimento científico podem ser assim sumarizadas:

1. Foram os primeiros a considerar esférica a forma da Terra, iniciando o predomínio dos círculos e esferas na descrição dos corpos celestes e seus movimentos;
2. Foram os primeiros a imaginar a Terra em movimento;
3. Introduziram a medida como modo importante de entender a natureza; por exemplo, estudando a harmonia musical teriam descoberto a relação entre o som e o comprimento da corda de um instrumento musical; associaram, deste modo, números à escala musical;
4. Intuíram uma importância cósmica na utilização dos poliedros regulares por eles conhecidos: cubo, tetraedro e dodecaedro.

Portanto, os pitagóricos, pela primeira vez na história, ligaram a matemática à física, dando margem ao que Bernal lhes atribuisse à criação da **física-matemática**.

Conta-se entre os seus feitos a imposição do número dez na descrição dos corpos celestes então conhecidos. O filósofo Filolau, que viveu em meados do século V AC, teria imaginado que a Terra estaria girando em torno de um fogo central, responsável pelo calor que a aquece. Nessa época eram conhecidos os seguintes elementos celestes: Terra, Lua, Sol, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter, Saturno e a esfera das estrelas fixas.

Assim, seriam nove esses elementos conhecidos. Para completar a década, ele imaginou a existência de uma contra-Terra que se movimentaria juntamente com o nosso planeta e que, a fim de impedir que este fosse torrado, estaria posicionada entre ele e o fogo central. Por isso esse fogo central não seria visível da Terra.

Aristóteles, muitos anos mais tarde, chegou a utilizar essa invenção de Filolau para ridicularizar os pitagóricos pelos quais não nutria nenhuma simpatia.

Filolau teria afirmado que:

*"Todas as coisas que podem ser conhecidas têm número; pois não é possível que sem número qualquer coisa possa ser concebida ou conhecida."*²⁴

Dessa escola pitagórica originaram-se várias linhas de pensamento. Duas são relevantes para o que aqui estamos estudando. Uma, defendida por Parmênides (cerca de 530-460 AC), enfatizava aspectos abstratos, lógicos e místicos na descrição dos fenômenos da natureza; deu origem ao **idealismo** de Platão. Outra, que contava com a argumentação de Leucipo (~500 - ? AC), Demócrito (c.460-370 AC) e Epicuro (342-271 AC), dava importância a um conteúdo **materialista** representado pela hipótese da existência de átomos.

Parmênides tinha uma visão conservadora e estática, muitas vezes sintetizada numa frase como esta: *o que é, é; o que não é, não é*. Ele se opunha à ideia de transformação contínua de Heráclito.

Demócrito, por outro lado, foi responsável pela introdução de dois elementos revolucionários no pensamento grego: a ideia de **átomo** e a existência do **vácuo**. Os átomos estariam em movimento no vácuo originando as mudanças visíveis. Teriam diferentes formas que se combinariam para constituir as diferentes substâncias conhecidas.

Embora os pitagóricos imaginassem a Terra em movimento, por exemplo, por meio da hipótese de Filolau, essa não era uma visão dominante naquela época. Ou, como diria Thomas Kuhn, a Terra em movimento não era um paradigma daquele período. Ao contrário, o paradigma dominante era o que imaginava a Terra imóvel no centro do Universo tendo os demais corpos celestes conhecidos girando ao seu redor. Era o famoso paradigma **geocentrista**, como teremos oportunidade de analisar a seguir.

2.5. A forma e o movimento dos corpos celestes: Platão

Uma pergunta dominava o pensamento dos gregos geocentristas interessados no movimento dos demais corpos celestes: **que tipo de movimento eles descrevem?**

²⁴ Carl B. Boyer, **Op.cit.**, nota 10, pág.40.

No século IV AC, Platão (427-347 AC) lançou a concepção de um mundo esférico em que os movimentos dos corpos celestes deviam ser realizados em círculos perfeitos e com velocidade uniforme. Essas concepções se deram em razão da visão de mundo idealista, das formas geométricas e dos movimentos perfeitos e uniformes.

Ao descrever a construção desse mundo, na parte dos seus **Diálogos** conhecida por **Timeu**, Platão refere-se, deste modo, ao criador e criatura:

*"Quanto ao céu inteiro, ou mundo, ou se houver qualquer outro nome mais apropriado, temos de começar por formular a questão inicial em todas as coisas. Existiu sempre, sem ter nenhum começo de geração, ou nasceu e teve um começo? Nasceu porque é visível, tangível e corpóreo, e todas as coisas deste gênero são sensíveis, e as coisas sensíveis, apreensíveis para a opinião acompanhada pela sensação, estão sujeitas ao devir e ao nascer, como vimos. Por outro lado, dizemos que aquilo que nasceu deve necessariamente o seu nascimento a alguma coisa. Quanto ao autor e pai deste universo, é difícil encontrá-lo e, depois de tê-lo encontrado, dá-lo a conhecer a toda a gente."*²⁵

Platão descrevia também como o arquiteto utilizou inteiramente os **quatro elementos**, terra, água, ar e fogo, na composição do mundo, sem deixar nenhuma porção deles fora e sem utilidade.

Platão tratava também da forma e do movimento que esse mundo deveria possuir. Na citação seguinte ele introduzia a concepção de mundo esférico e de movimento circular:

"Para a forma deu-lhe a que lhe convinha e que tinha afinidades com ele. Ora, a forma que convinha ao animal que devia conter todos os animais é a que encerra todas as outras formas. Por isso o deus deu ao mundo a forma esférica, cujas extremidades estão todas a igual distância do centro, sendo esta forma circular a mais perfeita de todas e a mais semelhante a si mesma, pois ele pensava que o semelhante é infinitamente mais belo que o dessemelhante. Além disso, arredondou e poliu toda a sua superfície externa por várias razões. (...) Atribui-lhe um movimento ao seu corpo, o dos sete movimentos²⁶, que melhor se ajusta à inteligência e ao pensamento. Consequentemente, fê-lo girar uniformemente sobre si mesmo no mesmo

²⁵ Platão. **Diálogos IV, Timeu**. Publicações Europa-América, Portugal, págs. 260/261.

²⁶ Esses **sete movimentos** seriam os seguintes: o movimento circular e os movimentos da direita para a esquerda e da esquerda para a direita, da frente para trás e de trás para frente, de cima para baixo e de baixo para cima.

*lugar e impôs-lhe o movimento circular; quanto aos outros seis movimentos proibiu-os e impediu-o de errar como eles. Como não eram precisos pés para esta rotação, criou-o sem pernas e sem pés."*²⁷

É interessante também citar um breve trecho da obra de Platão em que ele descreve como teria sido introduzido o conceito de **tempo** acoplado à construção do mundo pelo grande arquiteto:

*"Então ele lembrou-se de fazer uma imagem móvel da eternidade e, ao mesmo tempo em que organizava o céu, fez da eternidade que resta na unidade esta imagem eterna que progride segundo o número, e a que nós chamamos o tempo. Com efeito, as noites, os meses, os anos não existiam antes do nascimento do céu, e foi construindo o céu que ele se lembrou de criá-los (...)"*²⁸

Essa descrição elaborada por Platão inseria-se na sua concepção idealista de conceber a realidade do mundo. Coube a Aristóteles (384-322 AC), inicialmente um discípulo de Platão, encaixar essas ideias platônicas num sistema mais completo, coerente e com base empírica, que se firmou como o grande paradigma da ciência grega.

2.6. A esfericidade da Terra: Aristóteles

Aristóteles introduziu uma concepção de esfericidade da Terra muito mais sofisticada que aquela apresentada por Platão. Na citação seguinte tomamos conhecimento da gênese da esfericidade terrestre e da origem da ideia de **lugar natural** presente na descrição do movimento natural de queda dos graves:

"(...) este mundo é único, solitário e completo. É claro que não há nada, nem lugar, nem vácuo, além dos céus. (...) O movimento natural da Terra como um todo, como de todas as suas partes, está dirigido para o centro do universo; esta é a razão de porque ela está no centro (...) assim, a Terra e o Universo têm o mesmo centro, (...) os corpos pesados movem-se para o centro da Terra apenas porque seu centro está no centro do Universo. (...) Por isso, a Terra não se move (...) e o motivo dessa imobilidade é claro. (...) É natural que o elemento terra mova-se para o centro, como as observações mostram, assim como é natural que o elemento fogo mova-se para fora do centro (...) É impossível que uma porção de Terra se mova

²⁷ Platão. **Op. cit.**, nota 25, págs.263/264.

²⁸ Platão. **Op. cit.**, nota 25, pág. 266.

*para fora do centro sem a ação de um agente externo (...) Como porções iguais de terra provém de todos os lados, as extremidades ficam à mesma distância do centro, por isso a forma da Terra só pode ser esférica (...)*²⁹

Com base nesta citação poderíamos atribuir a Aristóteles a inauguração da utilização da concepção de simetria esférica na descrição dos fenômenos físicos. Nessa citação também aparece explicitada uma primeira "ideia gravitacional", ou seja, a concepção de que o centro da Terra, que se confunde com o centro do Universo, seria o lugar natural dos graves.

Thomas Kuhn afirma que foi dessa forma dada sustentação a um universo de duas esferas:

*"Para a maioria dos astrônomos e filósofos gregos, a partir do século IV AC, a Terra era uma pequena esfera suspensa estacionária no centro geométrico de uma esfera girante muito maior que transportava as estrelas. O sol se moveria no vasto espaço entre a Terra e a esfera das estrelas. Fora da esfera externa não havia nada - nem espaço, nem matéria, nada. (...) Este é o universo de duas esferas: uma esfera interior para o homem e uma esfera exterior para as estrelas. Sua origem é obscura, mas seu poder de persuasão não é."*³⁰

No que diz respeito ao pensamento científico grego, Aristóteles foi o filósofo que deixou marcas mais profundas. Uma das razões talvez seja o fato de que a maior parte dos seus escritos chegou quase inteiramente até nós. Além do mais, ele escreveu sistematicamente sobre lógica, filosofia, teologia, física, astronomia, biologia, psicologia, política e literatura. Como vários outros filósofos, esteve sempre próximo ao poder, sendo preceptor de Alexandre Magno e tutor de seus filhos.

Aristóteles teve o privilégio de conviver com Platão, seu mestre, que, à época do seu nascimento, estava trabalhando na sua obra **República**. Quando Aristóteles ingressou na Academia como estudante, Platão trabalhava no **Timeu**, parte fundamental de seus **Diálogos**, e que exerceu forte influência nos trabalhos científicos de Aristóteles.

²⁹ Aristóteles. **De caelo**. Edição de 1922

³⁰ KUHN, Thomas S. **op. cit.**, nota 17, pág. 27.

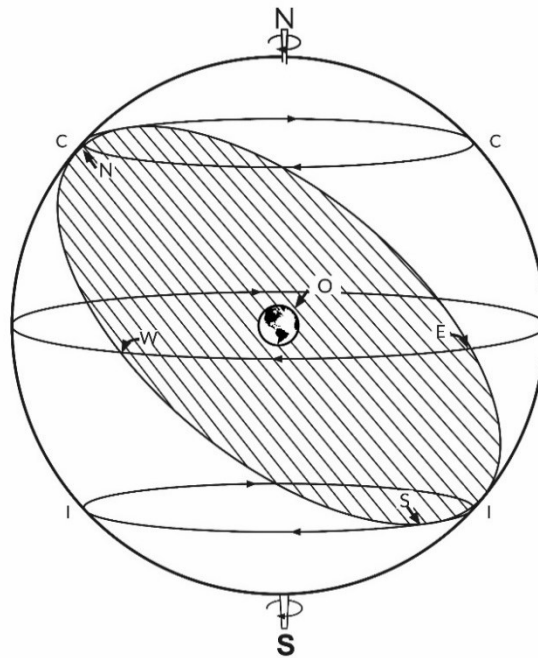


Figura 2. Algumas funções astronômicas do universo de duas esferas. O círculo externo é uma seção da esfera das estrelas. O observador em O pode ver todas as porções desta esfera que jazem no plano do horizonte sombreado SWNE. Os círculos horizontais são os caminhos traçados por pontos selecionados da esfera no seu movimento de rotação diário. (Figura e texto adaptados do livro de T. S. Kuhn, *op. cit.*, nota 16, pág. 31)

Com Aristóteles consagrava-se a hegemonia das esferas e dos círculos, na descrição e explicação do movimento e forma dos corpos celestes, que permaneceria dominante até o século XVII com o advento dos trabalhos de Kepler.

2.7. A física aristotélica

Entre as ideias sobre o movimento, desenvolvidas por Aristóteles, destaco as seguintes:

1. O movimento de queda dos corpos pesados, ou graves, é natural e dirigido para o centro do universo que coincide com o centro da Terra.
2. A taxa de queda de um corpo depende de dois fatores: seu peso e resistência do meio em que ele se desloca.

Sobre este ponto, é útil e educativo destacar algumas afirmações de Aristóteles que ilustram talvez algumas das primeiras argumentações a respeito da relação entre distância percorrida por um corpo e o intervalo de tempo decorrido:

"Um dado corpo move-se numa dada distância num dado tempo; um corpo mais pesado move-se na mesma distância em menos tempo, sendo este tempo inversamente proporcional aos pesos. Por exemplo, se um corpo

tem um peso que é o dobro de outro ele tomará a metade do tempo que este gasta para percorrer a mesma distância." (tradução livre)³¹

3. Os corpos celestes são dotados de movimento natural descrevendo uma trajetória circular perfeita.

4. Todos os corpos pertencentes a Terra, quando em movimento não dirigido para o centro do universo, seu lugar natural, são dotados de movimento violento provocado por algum agente externo a eles. A velocidade dos corpos aumenta com o aumento da intensidade do agente; quando o agente é removido ou cessa de atuar, o movimento para.

5. O ar deslocado por um corpo em movimento também é um agente secundário de movimento, por exemplo, no movimento de projéteis o ar deslocado tenderia a ocupar o vazio deixado pelo corpo transformando-se num motor de segunda ordem.

6. Não pode existir movimento não natural infinito; em consequência não pode existir o vácuo.

A este respeito Luis Pinguel li Rosa faz a seguinte observação:

"Aristóteles argumenta que não há necessidade de haver o vazio para haver movimento pela razão de que o lugar cheio pode sofrer mudança qualitativa. Logo, o vazio não é uma condição para a locomoção. Outra razão que ele levanta contra a existência do vazio é que, sendo infinito, nele não haveria em cima nem em baixo nem meio, pois não há diferença no que é nada e não há nada no vazio, pois o vazio seria a não existência e a privação de ser. O movimento natural se dá diferenciando em cima de em baixo. Como então poderia haver movimento natural através do vazio?"³²

Aristóteles considerava que os corpos celestes eram constituídos por um elemento diferente dos quatro elementos fundamentais. Ele imaginava que os corpos celestes eram feitos de uma matéria eterna e não sujeita a mudanças denominadas **éter**, que em grego significa eterno.

Os aristotélicos consideravam ainda que os corpos celestes, além da Terra, estavam associados a esferas concêntricas e transparentes, as esferas de cristal, centradas na Terra.

³¹ Aristóteles. **Op. cit.**, nota 27.

³² Luis Pinguelli Rosa. **Notas de aula**. Mimeografado.

2.8. O Sistema de mundo aristotélico-ptolomaico

A partir dessa concepção de universo, em que os corpos celestes giravam em torno de uma **Terra imóvel**, foram construídos modelos matemáticos que buscavam garantir a aparência do que era observado. Eudoxo, que também viveu no século IV AC, foi o introdutor de um complexo sistema de esferas homocêntricas que permitiam reproduzir o movimento celeste. Aristóteles chegou a construir um sistema com cinquenta e cinco esferas.

A versão mais moderna que conhecemos do modelo geocêntrico foi proposta por Claudio Ptolomeu de Alexandria, que viveu no século II D.C.. Tycho Brahe (1546 – 1601) também propôs posteriormente a Ptolomeu, no século XVI, um modelo geocêntrico em sua concepção, com o Sol orbitando a Terra e os demais planetas orbitando o nosso astro rei.

Cláudio Ptolomeu, que viveu no século II DC, realizou a grande síntese da astronomia grega que foi coletada no seu livro **Almagesto**, nome atribuído pelos árabes, que se transformou numa verdadeira bíblia da astronomia até o começo do século XVII. Ptolomeu desenvolveu o sistema de epiciclos iniciado por Hiparco. Ele dedicou-se à tarefa de resumir e articular o paradigma geocêntrico construindo figuras geométricas que reproduziam o movimento de todos os corpos celestes conhecidos à sua época. Para tanto ele utilizou outros artifícios geométricos como os excêntricos e equantes.

Ptolomeu utiliza no **Almagesto** alguns princípios físicos de Aristóteles para embasar sua ideia de modelo de Sistema Solar, que tem a Terra no centro dos movimentos de todos os planetas, do Sol e das estrelas fixas. Ele tratou de elaborar um modelo que desse conta de explicar os fenômenos cotidianos e os movimentos dos planetas conhecidos. Além da observação direta, as ideias aristotélicas de movimento natural inerente à natureza e corpo do objeto, sendo ele circular para os corpos supralunares e retilíneo para os objetos terrestres, o que também incluía o Sol, davam mais força e embasamento para o modelo Ptolomaico. A Terra no centro do Universo e o Sol fazendo um movimento circular significava corroborar também com o paradigma aristotélico.

Ptolomeu assume que o céu é uma esfera, girando ao redor de um eixo fixo, o que pode ser provado pelo movimento circular das estrelas polares, que já era conhecido; a Terra é uma esfera situada no centro dos céus, pois se isso não fosse verdade, um lado do céu apareceria mais próximo para nós aqui na Terra, do que o outro lado. A Terra não poderia estar em movimento porque deve haver algum ponto fixo para o qual os movimentos dos outros devem ser referenciados³³. Com estas concepções, Ptolomeu não se diferenciava de alguns predecessores.

³³ DREYER, J. L. E. **A history of astronomy from Thales to Kepler**, Dover, 2a. ed. 1953, p.192

Para preservar o modelo em que todos os corpos realizam movimento ao redor da Terra, Ptolomeu utilizou alguns artifícios geométricos, como os epiciclos, equantes e deferentes e a teoria dos movimentos aparentes do Sol e da Lua elaborada por Hipparchus. Ptolomeu chegou a aprimorar a teoria de Hipparchus para o movimento aparente da Lua, mostrando que ela se movimentava não somente em um deferente ou epiciclo (como Hipparchus explicara), mas sim que o centro do epiciclo se move também em um excêntrico, para assegurar que a velocidade angular da Lua seja uniforme, não para o centro do círculo, mas para a Terra³⁴.

Embora Ptolomeu não tenha feito grandes contribuições originais, foi o responsável pela grande síntese da astronomia geocêntrica ou **geostática**, como denominada por Roberto Martins que faz a seguinte avaliação da obra de Ptolomeu:

*"Quem nunca sequer folheou o Almagesto de Ptolomeu dificilmente poderá imaginar o esforço titânico que encerra. Enorme número de dados cuidadosamente selecionados; um rigoroso tratamento matemático (com o uso de trigonometria esférica); uma genial intuição para vislumbrar arranjos geométricos simples capazes de descrever os fenômenos; o uso desses arranjos para fazer previsões astronômicas. (...) A proposta de Ptolomeu é ciência, do mais alto nível. Os astrônomos que o seguiram não eram também idiotas dobrados sob o jugo da autoridade e do passado. Eram pessoas que adotavam a proposta geocêntrica de Ptolomeu por perceberem seu enorme valor e por não conhecerem uma alternativa que estivesse a seus pés."*³⁵

Na época de Ptolomeu, havia questões observacionais que até então não tinham solução, como o movimento retrógrado de Marte e a variação do brilho de Marte e Vênus. Estas questões não foram completamente resolvidas pelo modelo heliocêntrico proposto por Nicolau Copérnico (1473-1543).

Para concluir esta breve apresentação da ciência grega é preciso deixar claro que o paradigma aristotélico-ptolomaico resolvia uma série de problemas básicos.

³⁴ DREYER, **Op.cit. nota 33**, p.193 – 194.

³⁵ Roberto de Andrade Martins na sua rica introdução ao COPÉRNICO, Nicolau. **Commentariolus**. Nova Stella Editorial, São Paulo, 1990, págs. 58/59.

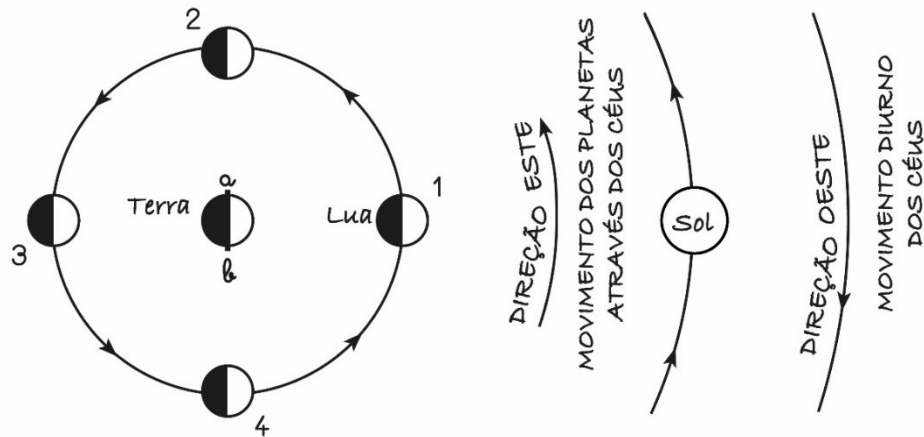


Figura 5. A explicação antiga (e moderna) das fases da lua. O diagrama mostra que apenas metade da esfera lunar é iluminada pelos raios do distante sol. A posição 1 corresponde à lua nova; 2 é a meia lua crescente; 3 é a lua cheia; e 4, a meia lua decrescente. (Extraída de parte de uma figura do livro de T. S. Kuhn, *op. cit.*, nota 16, pág. 272)

Eram explicadas as fases da Lua, como pode ser observado na **figura 5**. O sistema permitia a previsão de eclipses do Sol e da Lua, como também era muito utilizado na localização de navios em alto mar através da posição das estrelas.

As estações do ano encontravam também uma explicação simples no sistema ptolomaico. A solução dada foi a de considerar o plano da órbita do Sol inclinado de um ângulo de cerca de 23° com relação ao equador celeste.

2.9. Salvando as aparências

O termo “*Saving the phenomena*” (*Salvando os fenômenos*, ou *Salvando as aparências*) foi introduzido pelo físico e filósofo da ciência francês Pierre Duhem (1861 – 1916) em seu livro *To save the phenomena: an essay on the idea of physical theory from Plato to Galileo*, publicado em 1908 na sua primeira versão em francês³⁶. Neste livro, Duhem faz um resgate histórico das contribuições dos medievais que contribuíram para a construção da mecânica e faz uma defesa da interpretação instrumentalista dos modelos antigos para salvar as aparências.

No contexto do conhecimento astronômico e dos sistemas de mundo elaborados pelos gregos, *Salvar as Aparências* se refere aos modelos que procuravam descrever fielmente os fenômenos e movimentos do cosmos de acordo com aquilo que é observado. Esta expressão foi enunciada e esclarecida posteriormente em alguns livros de

³⁶ DUHEM, Pierre. **To save the phenomena: an essay on the idea of physical theory from Plato to Galileo**. Trans. By Edmund Doland and Chaninah Maschler. Chicago: University of Chicago Press. 1969.

escritores e historiadores da astronomia antiga, como J.L.E. Dreyer (1953), S. Sambursky (1962) e A. Koestler (1961).

Provavelmente a ideia da possibilidade de movimento da Terra para “salvar as aparências” dos fenômenos observados já estava presente na época de Alexandre o Grande, com a tentativa de resolver os problemas das anomalias dos movimentos planetários³⁷.

Algo que perturbou os astrônomos gregos geocentristas era o que acontecia com os planetas que, ao contrário da expectativa de movimento circular e uniforme ao redor da Terra, apresentavam um movimento irregular em determinadas partes de sua órbita, como ilustra a **figura 3**. Essa estranha dança dos planetas foi denominada de **movimento retrógrado**.

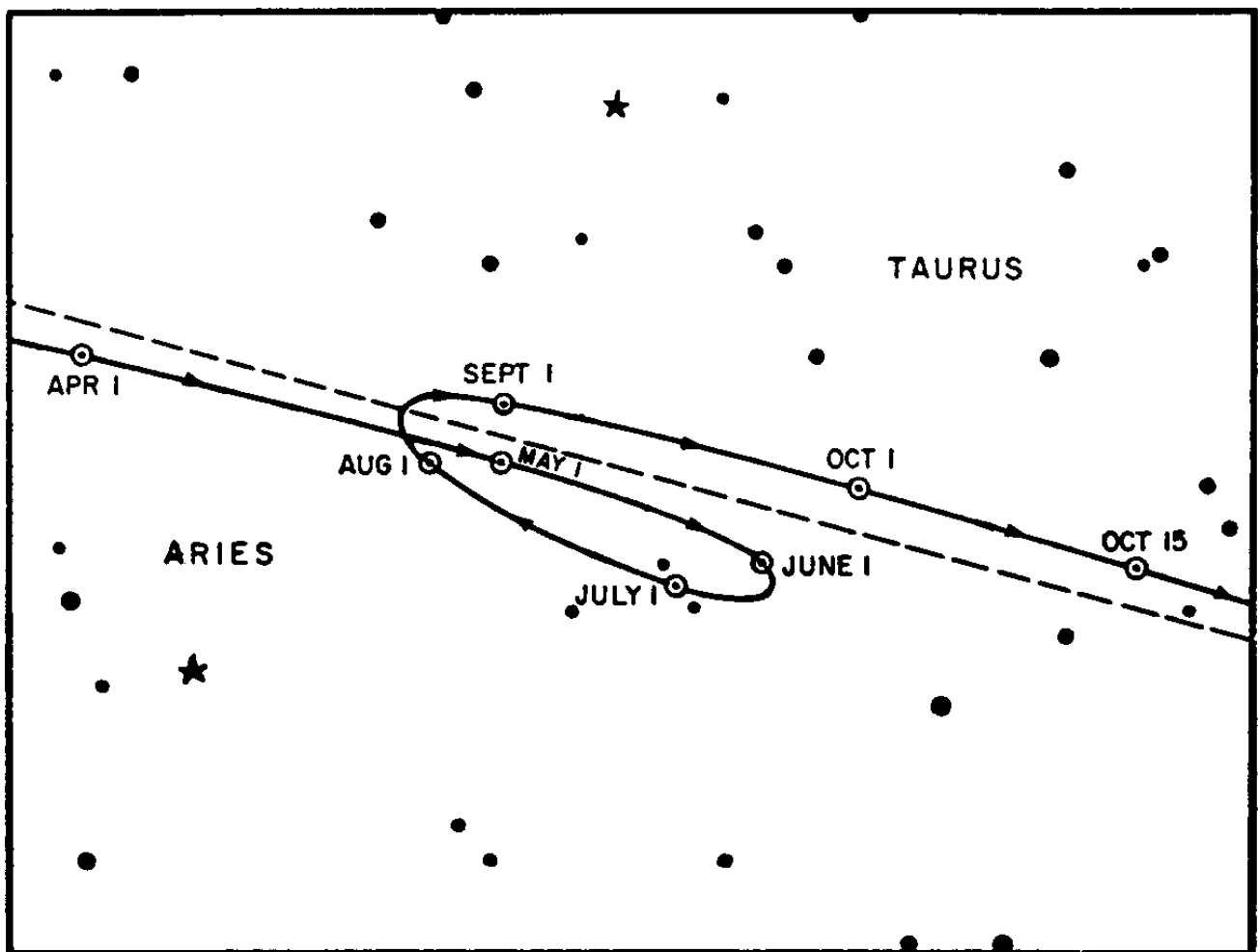


Figura 3. O movimento de retrogressão do planeta Marte em uma seção do céu³⁸.

³⁷ DREYER, *Op.cit.* nota 33.

³⁸ Figura extraída de Thomas S. Kuhn, *Op. cit.*, nota 17, pág. 48.

Assim, no século II AC, com o intuito **salvar as aparências** do movimento desses planetas, Hiparco introduziu um artifício geométrico que considerava um círculo centrado na Terra, o **deferente**, sobre o qual estava centrado um outro círculo em movimento, o **epiciclo**, no qual estava localizado o planeta também em movimento. Arranjos desse tipo, ou envolvendo um número maior de epiciclos, com velocidades de movimentos determinadas por ensaio e erro, permitiam reproduzir o movimento dos planetas vistos da Terra. A **figura 4** ilustra esse artifício.

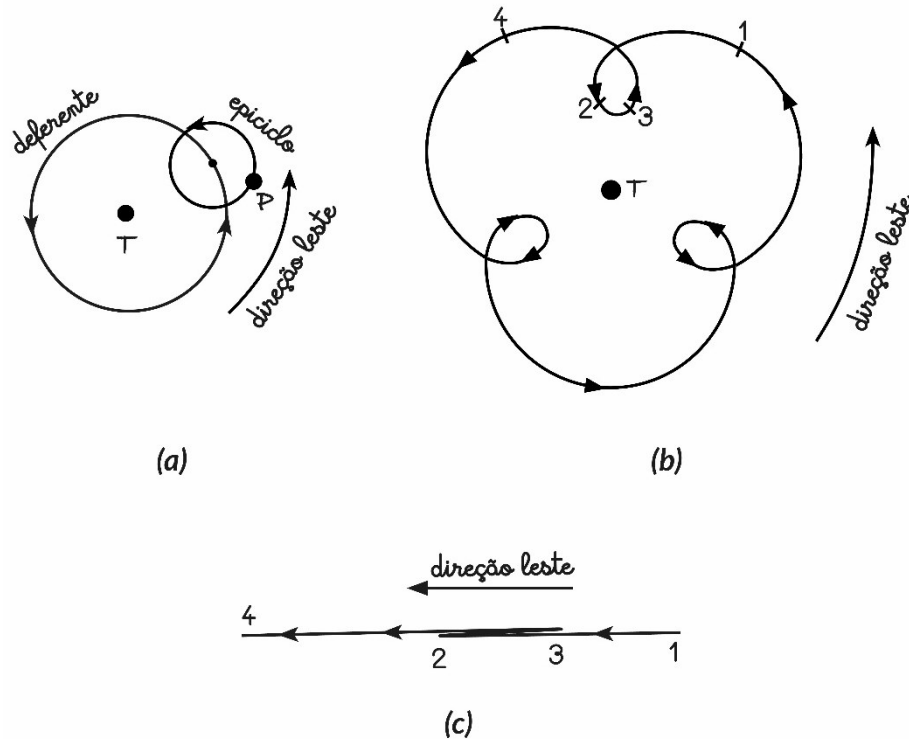


Figura 4. (a) O sistema básico deferente-epiciclo. (b) O movimento aparente por ele gerado no plano da eclíptica. (c) Uma porção (1 - 2 - 3 - 4) do movimento como visto por um observador situado na terra central³⁹.

³⁹ (Figura extraída do livro de T. S. Kuhn, **op. cit.**, nota 16, pág. 61.

Capítulo 3. O tamanho do mundo grego

A forma da Terra passou por diferentes concepções ao longo da história das civilizações antigas. Ora era uma montanha oca localizada no centro de um universo em forma de ostra, ora era um disco flutuando sobre a água. Finalmente, através dos gregos pitagóricos no século VI AC, adquiriu a forma esférica. Platão e Aristóteles muito contribuíram para que a hegemonia da esfera dominasse o cenário astronômico por muitos séculos.

Mas, e quanto ao tamanho da esfera terrestre?

E quanto à distância entre os diversos corpos celestes?

Teriam os gregos medido o tamanho do mundo?

É disso que trataremos nesta seção.⁴⁰

Os babilônios e egípcios possuíam uma representação para os números e unidades de medida. Assim, tinham condições de realizar medidas diretas de objetos, edifícios e terrenos. Porém, não se aventuraram a realizar medidas indiretas como as que são necessárias para se determinar as distâncias entre os corpos celestes e a Terra, por exemplo.

Mais uma vez essa tarefa coube aos gregos. A astronomia grega mostrou-se apropriada para a determinação de distâncias astronômicas. Vamos exemplificar algumas delas.

3.1. Determinação da circunferência da Terra

Embora a forma da Terra não influísse na descrição do movimento aparente dos corpos celestes, a ideia de se medir a circunferência da Terra só cabia se esta fosse considerada esférica.

Aristóteles mencionou a primeira referência de uma medida da circunferência da Terra. Esta teria sido realizada em meados do século IV AC. Não há registro do método que teria sido utilizado.

O primeiro registro mais ou menos completo da medida da circunferência da Terra, descrito por Cleômedes no livro **Do movimento circular dos corpos celestes**, data de cerca de 50 AC.⁴¹

⁴⁰ A maior parte dos exemplos de medidas astronômicas aqui apresentados foram extraídos do Apêndice 4 do livro de Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 17, págs. 273/278.

⁴¹ Romildo P. Faria (org.). **Fundamentos de Astronomia**. Papirus, Campinas, 1982, pág. 29.

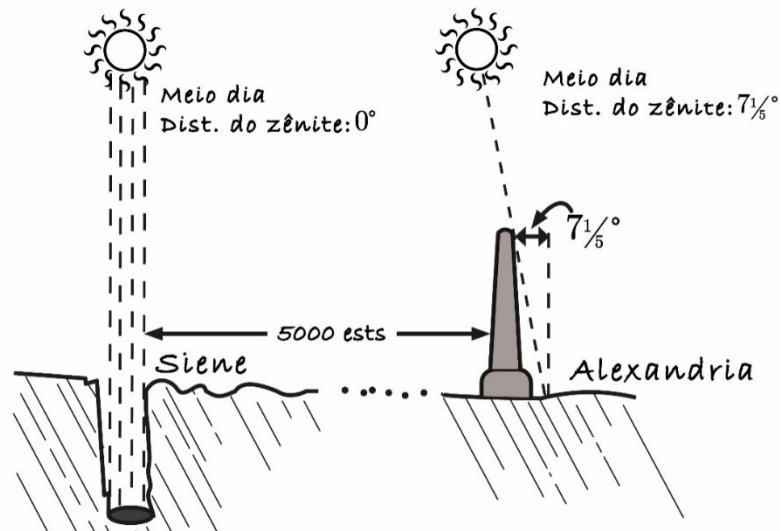


Figura 6. Ilustração do procedimento de Eratóstenes para medir a circunferência da Terra.

Essa medida é uma referência ao trabalho de Eratóstenes que viveu no século III AC. Nessa época observou-se que nos dias correspondentes à metade do verão, no seu solstício, portanto, exatamente ao meio dia, o Sol estava no zênite⁴², isto é, não havia sombra ao pé do gnômon. Isso provocava um fenômeno que causava admiração nos moradores de Siene, no Egito, onde ocorria: nesses dias, o Sol podia ser visto totalmente refletido na superfície da água de poços profundos. Em outras palavras, o Sol fazia um ângulo de 0° com a vertical. Eratóstenes observou que nessa mesma hora, em Alexandria, cidade que se encontrava no mesmo meridiano⁴³ e a uma distância de 5000 estádios ao norte de Siene, o Sol fazia um ângulo equivalente a $1/50$ do círculo ou, em termos modernos, cerca de 7° . A **figura 6** ilustra a situação aqui descrita.

Observando-se a **figura 7** pode-se notar que da igualdade dos ângulos $S'OZ$ e $S''AZ$, conclui-se que a distância AS , isto é, a distância entre as cidades de Alexandria e Siene, é $1/50$ da circunferência da Terra. Assim, a circunferência da Terra deve valer 50 vezes 5000 estádios, ou seja, 250000 estádios.

⁴² **Zênite** é o ponto da esfera celeste cortado pela vertical do lugar.

⁴³ **Meridianos** são círculos máximos, que dividem a Terra em hemisférios, perpendiculares ao Equador terrestre.

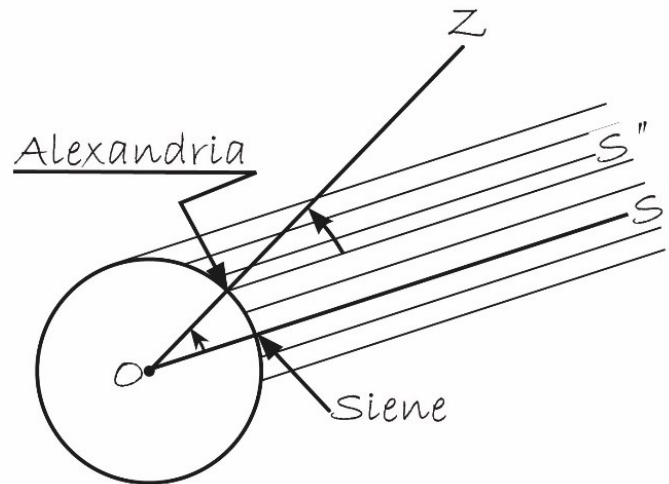


Figura 7. Os ângulos.

Não se sabe ao certo o valor da unidade estádio. Algumas estimativas sugerem que a medida de Eratóstenes estaria entre 37000 e 45000 quilômetros, bem próxima do valor de 40000 quilômetros aceito atualmente. Desta forma, os gregos conseguiam ter uma boa estimativa do tamanho da Terra.

3.2. Distâncias relativas do Sol e da Lua à Terra

Outro pensador grego de muita importância no que diz respeito a determinações de distâncias astronômicas foi Aristarco de Samos que, como já foi mencionado anteriormente, ficou mais conhecido como um precursor das ideias heliocêntricas. Ele também viveu no século III AC, sendo cerca de 30 anos mais velho que Eratóstenes.

Seus escritos, onde ele apresentava a hipótese do sistema heliocêntrico, não chegaram até nós, porém seu tratado sobre os tamanhos e distâncias do Sol e da Lua, provavelmente escrito por volta de 260 AC, onde ele apresentava suas medidas astronômicas, sobreviveu.

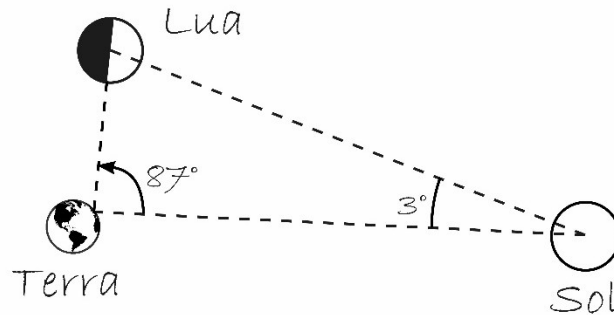


Figura 8: Inicialmente Aristarco determinou uma estimativa relativa das distâncias do Sol e da Lua e de seus tamanhos. Ele conseguiu isso medindo o ângulo LTS, subtendido pelos centros do Sol e da Lua, vistos da Terra, quando a Lua está exatamente meio-cheia. Nessa situação, Aristarco observou que o ângulo TLS é um ângulo reto, e que o ângulo LTS difere de aproximadamente 1/30 de um quadrante.⁴⁴

Em termos de graus isso significava um ângulo de 87°. Assim, na **figura 8**, no triângulo indicado teríamos a seguinte razão:

$$\frac{T_L}{T_S} = \frac{1}{19} \text{ } ^{45}$$

Aristarco concluiu que a distância da Terra ao Sol era 19 vezes a distância da Terra à Lua.

3.3. Tamanhos relativos do Sol e da Lua

No tratado de Aristarco, acima mencionado, eram apresentados também os tamanhos relativos do Sol e da Lua baseados no fato de ambos aparentarem o mesmo tamanho quando vistos da Terra, conforme está indicado na **figura 9**. Há controvérsias entre os historiadores e divulgadores da ciência sobre qual teria sido o ângulo determinado por Aristarco. Nessa obra, Aristarco considerava o ângulo subtendido como sendo de 2°; Carl Boyer afirma que Arquimedes atribuiu a Aristarco a medida de 1/2°, muito mais próxima ao valor atualmente aceito.⁴⁶

⁴⁴ Esta forma de medida é um indicativo de que o círculo de 360° ainda não era utilizado nessa época. (Cf., Carl Boyer, **op. cit.**, nota 10, pág. 116).

⁴⁵ É preciso notar que $\text{sen } 3^\circ = 1/19$.

⁴⁶ Carl Boyer. **Op. cit.**, nota 10, pág. 117.

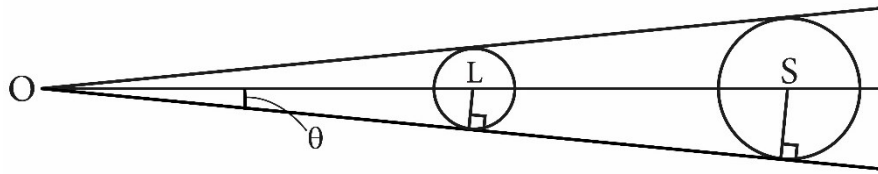


Figura 9. Tamanhos aparentes do Sol e da Lua, em uma situação de um eclipse solar total⁴⁷

Com uma argumentação ainda mais engenhosa, Aristarco conseguiu determinar essas medidas em estádios.

De qualquer forma, usando a percepção de que o Sol e a Lua tem o mesmo diâmetro angular, claramente observado num eclipse lunar total, Aristarco concluiu que o diâmetro do Sol seria entre 18 e 19 vezes o diâmetro da Lua.

3.4. Tamanhos absolutos do Sol e da Lua

Assim, Aristarco teve que analisar uma configuração específica de um eclipse lunar total, como indicada na **figura 10**. Nessa figura, assumimos os valores $19d$ (19 vezes o diâmetro da Lua) para o tamanho relativo do Sol, e $19R$ (19 vezes a distância entre a Terra e a Lua), para a distância relativa entre o Sol e a Terra, determinadas por Aristarco e brevemente exposta nas sessões anteriores. De forma bastante simplificada, e levando em consideração as medidas acima descritas, eis alguns passos de seu raciocínio:

1. Aristarco observou e mediu um eclipse lunar de máxima duração, isto é, um eclipse no qual a Lua está situada no plano da eclíptica, passando pelo centro da sombra da Terra. Nessa situação a Lua, a Terra e o Sol estão perfeitamente alinhados.
2. Ele mediu o intervalo de tempo t que começa no instante em que a Lua começa a desaparecer e termina no instante em que a Lua desaparece integralmente na sombra.
3. Mediu também o intervalo de tempo durante o qual a Lua permaneceu totalmente obscurecida. Aristarco encontrou aproximadamente o mesmo valor t anterior.
4. Daí concluiu que a largura da sombra, na posição ocupada pela Lua, deveria ser de aproximadamente duas vezes o diâmetro da própria Lua.

⁴⁷ Figura extraída de Evans, James, **Op. cit.**, nota 13, pág. 69.

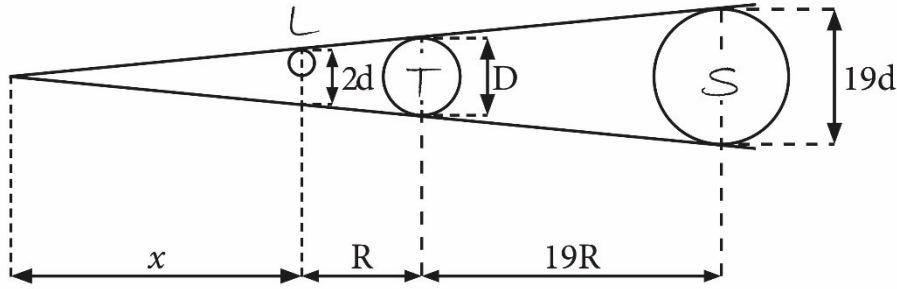


Figura 10. Um eclipse lunar de máxima duração onde d = diâmetro da Lua; D = diâmetro da Terra; R = distância da Terra à Lua; x = distância da Lua ao extremo da sombra

6. A **figura 10** torna clara a presença de três triângulos cujas bases medem $2d$, D e $19d$ e cujas alturas são, respectivamente, x , $x + R$ e $x + 20R$. É claro que esses valores são apenas aproximados, como fica evidente a partir das considerações anteriores.

7. Comparando o triângulo menor com o maior, obtém-se a seguinte razão entre suas alturas:

$$\frac{x}{2d} = \frac{x + 20R}{19d}$$

Resolvendo, obtém-se: $x = \frac{40R}{17}$.

8. Comparando os triângulos menor e médio, obtém-se:

$$\frac{x}{2d} = \frac{x + R}{D}$$

Substituindo-se aqui o valor de x e resolvendo para d , obtém-se:

$$d = \frac{20}{57}D \text{ ou } d \cong 0,35D.$$

Assumindo que o diâmetro do Sol é 19 vezes o diâmetro da Lua, obtém-se:

$$d_S \cong 6,6D.$$

Desta forma, conhecendo-se o diâmetro da Terra, por exemplo, o valor calculado por Eratóstenes, era possível calcular os tamanhos do Sol e da Lua.

3.5. Distâncias do Sol e da Lua a Terra

As distâncias do Sol e da Lua à Terra podem ser obtidas da seguinte maneira: como ambos subtendem um mesmo ângulo de cerca de $1/2^\circ$ e como a circunferência toda tem 360° , considerando-se que suas órbitas sejam circulares são necessários 720 de seus diâmetros para cobrir inteiramente suas respectivas circunferências, isto é:

$$2\pi d_{TL} = 720d.$$

Como $d \cong 0,35D.$, obtém-se:

$$d_{TL} \cong 40D.$$

Analogamente,

$$2\pi d_{TS} = 720d_S.$$

Como $d_S \cong 6,6D.$, obtém-se:

$$d_{TS} \cong 764D.$$

A tabela abaixo permite que comparemos os valores obtidos por Aristarco com os valores atualmente conhecidos:

Tabela 1: Valores das distâncias relatados por Aristarco comparados aos valores atuais⁴⁸

Valores de Aristarco	Valores Atuais
$d \cong 0,35D$	$d \cong 0,27D$
$d_{TL} \cong 40D$	$d_{TL} \cong 30D$
$d_S \cong 6,6D$	$d_S \cong 109D$
$d_{TS} \cong 764D$	$d_{TS} \cong 11728D$
$d_{TS} \cong 19d_{TL}$	$d_{TS} \cong 389d_{TL}$

Aristarco nessas determinações cometeu uma série de erros de medida por limitações técnicas. É preciso não esquecer que suas observações eram realizadas sem o auxílio do telescópio. Assim, na determinação do ângulo correspondente à posição da Lua meio-cheia, um erro de $1/2$ grau, extremamente pequeno para observações a olho nu, acarretaria um erro muito grande na determinação das distâncias relativas entre o Sol e a Lua. Além do mais, é muito difícil precisar exatamente quando a Lua está meio-cheia, como também é difícil determinar com exatidão os centros do Sol e da Lua.

Thomas Kuhn faz as seguintes observações:

"Os métodos empregados nestes cálculos são brilhantes, tipificam os melhores esforços dos cientistas gregos, mas os resultados numéricos, particularmente aqueles relativos ao Sol, são uniformemente pouco precisos"

⁴⁸ Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/ssolar.htm>. Acessado em 20 de julho de 2017.

por causa do erro inicial na determinação da separação angular do Sol e da meia Lua. (...) A possibilidade de fazer medidas astronômicas ilustraram a grande utilidade do universo Aristotélico-Ptolomaico. (...) Finalmente, e mais importante, a medida da distância da Lua forneceu uma régua astronômica que, durante a Idade Média, foi utilizada para dar uma medida indireta do tamanho de todo o universo."⁴⁹

⁴⁹ Thomas Kuhn. **Op. cit.**, nota 17, págs. 277/278.

Capítulo 4. Algumas ideias sobre a mecânica na Idade Média

4.1. O "esquecimento" do conhecimento grego

Vimos até aqui o estabelecimento de uma visão do mundo físico que considerava a Terra esférica e imóvel num centro ao redor do qual circulavam todos os demais corpos celestes. O sistema aristotélico-ptolomaico, paradigma dessa visão de mundo, conseguia **salvar as aparências dos fenômenos** observados, isto é, reproduzia com construções geométricas sofisticadas o que era possível observar desde a terra imóvel.

Estudamos também brevemente a concepção de movimento local, desenvolvida por Aristóteles, subdividido nas categorias natural e violento. Foi também exemplificada a possibilidade que a ciência grega oferecia de efetuar medidas astronômicas.

Nas seções seguintes vamos abordar o que ocorreu com o conhecimento científico dos gregos no período que vai das últimas contribuições dos filósofos gregos, no início da era cristã, até o nascimento da mecânica, nos séculos XVI e XVII.

De novo é necessário frisar que será uma abordagem limitada a alguns eventos que darão apenas uma pálida ideia deste período. Não estaremos também, certamente, fazendo justiça às diferentes interpretações relativas a este período da história da ciência. De qualquer forma, creio que será suficiente para contrastar com a revolução científica iniciada por Nicolau Copérnico no século XVI.

O conhecimento grego havia se espalhado por todo o mundo ocidental de então, toda a Europa, parte da Ásia e parte da África. Com o declínio do império romano, já nos primeiros séculos da era cristã, a influência da cultura grega começou a diminuir rapidamente, principalmente devido ao fato de que os cristãos condenavam o conhecimento que teria sido produzido por um povo pagão.

Embora a ideia, presente em muitas interpretações históricas, de que o mundo ocidental teria entrado num período histórico que ficou conhecido como **Idade das Trevas**, esteja hoje sendo abandonada devido a um melhor conhecimento produzido pela moderna história medieval, não se pode deixar de reconhecer que houve uma espécie de declínio do conhecimento no ocidente. Podemos reconhecer que esses séculos que antecederam o **Renascimento**, as grandes navegações, as mudanças sociais que se desenharam na Europa a partir do século XIV, foram responsáveis pela gestação de todas essas mudanças. Porém, aquela explosão cultural grega realmente ficou um tanto quanto *congelada* nesse período.

Não só as populações, as construções das cidades, as técnicas em geral, sentiram essa decadência, mas também os trabalhos dos grandes filósofos gregos foram alvo de perseguição, destruição e mutilação, principalmente por parte dos cristãos. Por exemplo, em 389, a grande e importante biblioteca de Alexandria foi incendiada perdendo a maior

parte do seu acervo que era constituído, principalmente, por originais dos trabalhos dos filósofos gregos.⁵⁰

Apenas para situar esse período com alguma data significativa para a história da ciência, basta mencionar o ano de 415 que marca o assassinato, por uma turba cristã, da última grande matemática grega, Hipatia. Nessa época, era comum acontecerem lutas entre os pagãos gregos e os cristãos. A morte dessa matemática serve como exemplo desses acontecimentos.

"(...) Hipatia, uma jovem culta que escreveu comentários sobre Diofante, Ptolomeu e Apolônio. Devota ardente da cultura pagã, Hipatia atraiu a inimizade de uma fanática multidão cristã em cujas mãos sofreu uma morte cruel em 415. O impacto dramático de sua morte em Alexandria fez com que esse ano fosse tomado por alguns como marco do fim da matemática antiga, mas um fecho mais adequado se acha um século depois."⁵¹

Nessa época, portanto, envolvendo todos os povos europeus, houve um choque entre a concepção de mundo dos gregos e aquela baseada na interpretação da Bíblia. Duas cosmologias que não tinham, nesse momento, um denominador comum que seria descoberto bem mais tarde. Assim, a descrição do mundo produzida pelos gregos não combinava com a descrição das águas supracelestiais mencionadas no Gênesis. Esta se aproximava mais das cosmologias babilônicas e egípcias. Nessa disputa, os cristãos levaram a melhor...

O conhecimento grego passou por um momento de censura. A Europa, a partir do século IV, perdeu sua herança cultural mais importante. A astronomia grega foi particularmente visada nesse processo. Para impor sua fé os cristãos combateram o paganismo e seu conhecimento nas artes e nas ciências.

Como o conhecimento do idioma grego foi desaparecendo, e como a Igreja não estimulava nem apoiava a tradução para o latim das obras dos filósofos gregos, seu conhecimento foi realmente banido da Europa. Mas, mesmo assim, grande parte desse conhecimento foi preservada, principalmente devido ao cuidadoso tratamento dado pelos povos árabes que não só traduziram inúmeras obras dos filósofos gregos como acrescentaram algumas importantes contribuições. Veremos algo sobre esse papel dos árabes na seção 4.2.

Apenas algumas das obras menos polêmicas e mais adaptáveis às concepções bíblicas ganharam traduções latinas. Isso ocorreu, por exemplo, com algumas partes da

⁵⁰ Creio que o livro **O nome da Rosa**, de Umberto Eco, que narra uma aventura medieval envolvendo os livros de Aristóteles, tenha sido inspirado nesse tipo de acontecimento.

⁵¹ Carl B. Boyer. **Op. cit.**, nota 10, pág. 139.

obra de Platão que, como vimos, apresentava estrutura e conteúdo de fundo idealista mais propício para uma reinterpretação religiosa. A obra de Platão influenciou, entre outros, a Santo Agostinho que foi, provavelmente, o mais influente pensador do período inicial do domínio cristão.

Thomas Kuhn defende a ideia de que Santo Agostinho, apesar de ter sido um importante filósofo, colaborou para o esquecimento e desprezo do conhecimento grego. Kuhn cita, como exemplo, o seguinte trecho de um trabalho de Agostinho, o **Enchiridion** ou manual para os cristãos:

*"Quando, então, pergunta-se no que devemos acreditar com relação à religião, respondo que não é necessário investigar a natureza das coisas, como faziam aqueles a quem os gregos chamavam de 'físicos'. Nem devemos ficar alarmados e amedrontados de que os cristãos ficariam ignorantes da força e número dos elementos, o movimento, ordem e eclipses dos corpos celestes; a forma dos céus; as espécies e a natureza dos animais, plantas, pedras, fontes, rios, montanhas; sobre cronologia e distâncias; os sinais que antecedem as tempestades; e um milhar de outras coisas que aqueles filósofos descobriram ou pensavam haver descoberto (...). Para o cristão é suficiente acreditar que a única causa de todas as coisas criadas, sejam celestes ou terrestres, sejam visíveis ou invisíveis, é a bondade do criador, o único Deus; e que nada existe, exceto Ele próprio, que não deva sua existência a Ele."*⁵²

Tal declaração de fé não impediu Santo Agostinho de estudar os trabalhos de alguns filósofos gregos, entre eles, Platão. Mas sua atitude era, como afirma Kuhn, no geral, anticientífica.⁵³

Com bases semelhantes às de Santo Agostinho, porém não tão bem elaboradas, outros pensadores cristãos depreciavam e ridicularizavam o valor espiritual da ciência grega. Eles rejeitavam também seu conteúdo, suas propostas teóricas e sua visão de mundo. A astronomia, que continuava a ser desenvolvida, foi combatida principalmente devido a suas ligações com a astrologia. O conteúdo determinista da astrologia era considerado incompatível com o ensinamento bíblico.

Ainda no século IV, São Lactâncio, que tinha certa influência por que era tutor dos filhos do imperador Constantino, havia se mostrado muito menos iluminado que Santo Agostinho. Ele combatia o conceito de Terra esférica pois isso implicava algumas consequências desagradáveis ou impossíveis, tais como a crença na existência de

⁵² Thomas S. Kuhn. **Op. cit.**, nota 17, pág. 106.

⁵³ Idem.

lugares onde as pessoas teriam seus pés acima de suas cabeças ou onde a chuva e a neve cairiam para cima!

No século VI, o monge Cosmas se perguntava como seria possível para a Terra flutuante emergir das águas no terceiro dia da criação ou, ainda, como a Terra poderia ter sofrido a inundação total à época de Noé. Ao invés da Terra esférica ele a concebia na forma de um tabernáculo. Arthur Koestler cita, como significativo, o seguinte trecho de sua obra **Topographica Christiana**:

"O Santo Tabernáculo, descrito no Êxodo, era retangular e duas vezes mais longo que largo; logo, a Terra possui a mesma forma, e está situada no sentido do comprimento de leste a oeste, no fundo do universo. Ela é circundada pelo oceano, como a mesa do pão, no ritual judaico, está rodeada pela franja ondulada; e o oceano está rodeado por outra terra, o lugar do Paraíso, e habitação do homem até o dia em que Noé atravessou o oceano, estando agora desabitada. Das extremidades dessa terra exterior e deserta erguem-se quatro planos verticais, que são as paredes do universo. O teto é um semicilindro repousando sobre as paredes do norte e do sul, o que dá ao universo o aspecto de barraca ou de baú de viagem com tampa curva. "

Contudo, o piso, isto é, a terra, não é chato; pelo contrário, inclina-se de noroeste a sudeste, pois está escrito no Eclesiastes i.5, que 'o sol desce e volta ao lugar onde nasceu'. Consequentemente, os rios, como o Eufrates e o Tigre, que correm para o sul, possuem corrente mais rápida que o Nilo que corre 'para cima'; e os barcos navegam mais depressa para o sul e leste do que os barcos que devem 'subir' para o norte e o oeste, sendo estes últimos chamados 'indolentes'. As estrelas são levadas por anjos pelo espaço abaixo do teto do universo, e ficam ocultas quando passam atrás da parte norte da terra, encimada por gigantesca montanha cônica, a qual oculta o sol da noite, sendo o sol muito menor que a Terra."⁵⁴

Embora hipóteses cosmológicas como essa nunca tenham sido elevadas à categoria de doutrinas da Igreja, constituíam candidatas a paradigma, substituindo o paradigma geocêntrico de terra esférica e imóvel dos gregos. Essas cosmologias ilustram a decadência da aprendizagem secular que caracterizou esse período da história.

⁵⁴ Arthur Koestler, **op. cit.**, nota 12, pág. 57.

4.2. Alguns físicos medievais

Mas, apesar de todas as dificuldades que deviam encontrar para poder desempenhar bem seu intento, existiram intelectuais que trabalhavam com as ideias gregas. Esse foi o caso, por exemplo, de João Filopono, um destacado crítico medieval que nasceu por volta de 475 e morreu em 565.

Filopono, criticando o que afirmava Aristóteles, acreditava que a velocidade de um móvel não seria proporcional à razão entre força e resistência, mas sim à diferença entre elas. Desta forma ele rejeitava a impossibilidade de movimento no vazio. Ele criticava também a **antiperístase** utilizada por Aristóteles na tentativa de explicar o movimento dos projéteis.

Filopono procurava explicar o movimento dos projéteis utilizando a ideia de **força impressa** ou **impetus** não permanente, isto é, que se esvai com o tempo, já idealizada por Hiparco no século II AC. Ele afirmava que:

"É necessário assumir que alguma força motora incorpórea é fornecida ao projétil pelo movente, e o ar colocado em movimento contribuirá muito pouco ou realmente nada para o movimento do projétil."⁵⁵

A partir dos séculos VIII e IX, quando o conhecimento pagão grego não se constituía mais numa ameaça à hegemonia intelectual da Igreja, os clérigos começaram a ter permissão para devotar parte de seu tempo de lazer na aquisição do conhecimento grego.

Assim, ao longo dos séculos seguintes uma série de pensadores ocidentais entrou em contato com o conhecimento dos gregos bem como dos eventuais comentadores medievais, principalmente os árabes. A natureza das coisas, incluindo os céus e a terra, novamente tornava-se objeto de estudo intensivo por parte dos intelectuais europeus, quase todos partem integrantes de diferentes irmandades da Igreja. Nesse processo, muitas das ideias de Platão, Aristóteles, Ptolomeu e de outros filósofos gregos foram redescobertas e, às vezes, aceitas, confrontando-se com as ideias então dominantes.

Koestler apresenta esse **renascimento** da cultura grega com estas palavras:

"A partir do século XII, os trabalhos, os fragmentos de trabalhos de Arquimedes e Heron de Alexandria, de Euclides, Aristóteles e Ptolomeu, começaram a flutuar na cristandade como destroços fosforescentes de naufrágio. Será fácil imaginar quão tortuoso foi o processo pelo qual a Europa recuperou a sua herança do passado, se refletirmos que alguns dos tratados científicos de Aristóteles, inclusive a Física, haviam sido

⁵⁵ Citado por Allan Franklin. **The principle of inertia in the middle ages**. Colorado Ass. Univ. Press, 1976, pág. 6.

*traduzidos do original grego para o sírio, do sírio para o árabe, do árabe para o hebraico e, finalmente, do hebraico para o latim medieval. O Almagesto de Ptolomeu era conhecido em várias traduções árabes através do império de Harum-al-Rachid, desde o Indo até o Ebro, antes que Gerardo de Cremona, em 1175, o retraduzisse do árabe para o latim. Os Elementos de Euclides foram redescobertos para a Europa por um monge inglês, Adelardo de Bath, o qual, por volta de 1120, achou uma tradução árabe em Córdoba. Recuperados Euclides, Aristóteles, Arquimedes, Ptolomeu e Galeno, a ciência podia recomeçar onde fora interrompida um milênio antes. ”*⁵⁶

Vale a pena apresentar brevemente algo da presença árabe na Idade Média. Os historiadores destacam o século VII como a entrada árabe na História da Ciência. A grande divulgação realizada pelos árabes a partir desse período estendeu a ciência grega muito além do que conseguira Alexandre Magno.

Os árabes tinham uma ciência organizada por meio de suas universidades e escolas. No século VIII, logo após sua fundação em 762, Bagdá tornou-se um centro literário e científico e, no califado de Al-Mansur, seu fundador, criou-se a **Escola de Bagdá**, com destaque para a Medicina e a Astronomia.

Por razões astrológicas e astronômicas a Astronomia tornou-se a ciência favorita dos árabes dos séculos VII e VIII. É desta época a primeira tradução do **Almagesto** de Ptolomeu, que teria sido realizada por iniciativa do califa Harun al Rasid (765-809).⁵⁷

Os árabes, como outros povos medievais, aceitaram a visão de mundo geocêntrica resumida no livro Almagesto. Utilizaram os epiciclos e os excêntricos e aprimoraram a forma e o conteúdo das observações celestes. Para tanto construíram muitos observatórios de grande porte e com maior precisão. Podemos destacar alguns astrônomos árabes que deram contribuições vitais para a eclosão da Revolução Científica no século XVII.

Al Farghani (c. 850) fez ótimas medidas astronômicas, apresentadas no seu **Compendio de Astronomia**, que ainda foi utilizado como manual na Europa do século XVII. Suas estimativas para as distâncias celestes, principalmente as relacionadas com a Lua e as estrelas fixas, deram força para o *universo das duas esferas* de Aristóteles.

Outro astrônomo árabe importante foi Al Battani (c. 858-929), da **Escola de Bagdá**, que também escreveu um tratado de astronomia, obteve valores mais precisos da obliquidade da eclíptica, da precessão dos equinócios e de posições do Sol e da Lua. Seus dados foram valorizados por vários estudiosos, com destaque para Copérnico. Al

⁵⁶ Arthur Koestler. **Op. cit.**, nota 12, pág. 67.

⁵⁷ Arthur Berry. **A short history of astronomy**. New York, Dover Paperbound, 1961, págs. 77/78.

Battani foi também responsável pela difusão do uso da trigonometria do seno, de influência hindu.

Abu'l Wafa (940-998), também um grande matemático, tratou a trigonometria como assunto independente além do seu uso sistemático na astronomia.⁵⁸

Vários outros astrônomos árabes poderiam ser mencionados, como Al Khwarismi (c. X-850) [autor da famosa *Álgebra*] e seus tratados sobre o astrolábio (que era utilizado para marcar o tempo preciso do dia e da noite pela observação da altura do Sol ou de uma estrela) e o relógio de Sol; Al Sufi (903-986) e seu *Livro das estrelas fixas*; Al Hazen (965-c. 1040) e seu estudo sobre os planetas. Os árabes mantiveram sem interrupção as observações astronômicas da antiguidade.

Muito ainda poderíamos acrescentar sobre o desenvolvimento astronômico e físico produzido pelos árabes. Creio que as seguintes palavras de Thomas Kuhn sirvam para estabelecermos uma ponte de volta à Europa, comentando a recuperação da herança grega:

*“Durante os séculos em que o ensino na Europa estava em plena decadência, ocorreu o grande renascimento da ciência no mundo muçulmano. [...] Os filósofos muçulmanos inicialmente reconstituíram a ciência antiga [...] E depois acrescentaram suas contribuições. Eles produziram avanços originais fundamentais em matemática, química e óptica [...]. [A Europa] cristã recuperou o ensino antigo a partir dos árabes e usualmente em traduções árabes.”*⁵⁹

Não podemos deixar de considerar que essa redescoberta do conhecimento grego, na Europa do século XII, é restrita a uma pequena parcela de intelectuais. A grande maioria das pessoas desse período da Idade Média, e dos três séculos seguintes, ainda vivia sob a crença dominante iniciada nos primeiros séculos da era cristã.

Uma visão dominada pelos ensinamentos religiosos, bíblicos, em que a terra tinha a forma de um tabernáculo, era plana e ficava, talvez, flutuando sobre águas profundas ou era sustentada por alguma artimanha mágica, cercada de monstros por todos os lados. Até o século XIV eram construídos mapas representando a Terra de forma retangular. Os anjos tinham também uma função específica: empurrar os corpos celestes nas suas órbitas!

Portanto, a volta da cultura grega não aconteceu da noite para o dia. Ao contrário, foi uma longa caminhada que envolveu aceitação e censura, obstinação e ousadia.

⁵⁸ John North. **The Fontana History of Astronomy and Cosmology**. London, Fontana Press, 1994, pág. 188.

⁵⁹ Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 17, págs. 100/101.

Mesmo no interior da própria Igreja havia posições antagônicas. Se de um lado havia aqueles que aceitavam parte das ideias gregas, de outro lado havia as proibições institucionais localizadas. Por exemplo, em 1210, um conselho provincial de Paris proibia o ensino da física e da metafísica aristotélicas.

No século XIII os religiosos pertencentes à ordem dos Dominicanos defendiam o sistema de Aristóteles. Entre esses dominicanos destacava-se a figura daquele que foi considerado o maior teólogo desse período, São Tomás de Aquino (1225-1274). Ele procurou acomodar a física aristotélica com os ensinamentos contidos no gênese cristão. Por outro lado, os Franciscanos não aceitavam a obra aristotélica. A disputa entre essas duas ordens religiosas refletia as diferentes formas de conceber o mundo, decorrentes dos papéis sociais desempenhados por cada uma delas. Daí originaram-se também duas concepções distintas de interpretação dos fenômenos físicos: uma totalmente apoiada em Aristóteles e no **Almagesto** de Ptolomeu e outra com críticas mais ou menos severas a essa concepção.

Assim, por intermédio de São Tomás de Aquino a **hegemonia do círculo** retomou sua trajetória europeia interrompida por volta do século IV ganhando, além do status pré-paradigmático de caráter científico, a força de um dogma da Igreja. Pois, como dizia São Tomás de Aquino:

*"O material dos corpos celestes é, por sua natureza intrínseca, não susceptível à geração e corrupção (...) A única espécie de mudança que os corpos celestes experimentam é o movimento (...) Além do mais, entre os tipos de movimentos que podem experimentar, o deles é circular."*⁶⁰

Desta forma, o século XIII testemunhou o ressurgimento do paradigma aristotélico-ptolomaico agregado aos comentários dos físicos medievais, os árabes aí incluídos. A Europa redescobriu sua herança intelectual. A Igreja, que dez séculos antes combatia a propagação pela Europa das ideias aristotélicas, agora não só as defendia como as elevava à categoria de doutrina. **A imobilidade da Terra passava a ser santificada pela Igreja!**

Porém, como já foi afirmado antes, além da física aristotélica ressurgiu também aquilo que alguns historiadores chamaram de notas de rodapé críticas a essa física.

A física aristotélica era essencialmente não inercial, isto é, só poderia haver movimento na presença de um movente. O historiador da física Allan Franklin afirma o seguinte:

⁶⁰ Citado por Thomas Kuhn. **Op. cit.**, nota 17, pág. 109.

"(...) embora as ideias de Avempace, Filopono, e seus seguidores não são inerciais, desde que ainda é necessária uma força para ter movimento, elas constituem um importante primeiro passo. Elas removem a necessidade do meio e sua resistência para o movimento e consideram a possibilidade do movimento no vazio, sem resistência."⁶¹

Assim, a teoria da **força imprimida**, ou **impetus**, era incompatível com uma física inercial, isto é, não cabia nela um princípio da inércia.

No século XIV, João Buridan (1300-1358) adotou uma versão modificada da física do impetus. Para ele o impetus não era algo que se esvaía, que durava apenas um certo tempo, como imaginava Filopono. Ele considerou um impetus permanente, isto é, que agiria até o instante em que surgisse resistência ou forças que se lhe opusessem.

Outra diferença: para Buridan o impetus era proporcional à quantidade de matéria, o que atualmente nós denominaríamos de massa do corpo, e à sua velocidade e seria aplicado indistintamente a movimentos lineares e circulares. Assim, o conceito de impetus de Buridan incorporava, de certa forma, os conceitos que após Newton seriam conhecidos por **momento linear** e **momento angular**.

Como curiosidade, e exemplo de argumentação de Buridan, eis como ele aplicava seu conceito de impetus para explicar a queda acelerada de um corpo:

"Destas razões segue que deve-se imaginar que um corpo pesado adquire movimento não apenas devido ao seu principal movente, a gravidade, mas que ele também adquire para si próprio um certo impetus com aquele movimento. Este impetus tem o poder de mover o corpo pesado em conjunção com a gravidade natural permanente. E porque esse impetus é adquirido em comum com o movimento, quanto mais rápido for o movimento, maior e mais forte será o impetus. Assim, no início o corpo pesado é movido apenas por sua gravidade natural; portanto, é movido vagarosamente. A seguir é movido pela mesma gravidade e pelo impetus adquirido ao mesmo tempo; conseqüentemente, move-se mais rapidamente. E como o movimento se torna mais rápido, o impetus se torna maior e mais forte, e, portanto, o corpo pesado move-se sob a ação de sua gravidade natural e desse impetus maior, simultaneamente, e assim de novo se moverá mais rapidamente; e assim, ele será sempre e continuamente acelerado até o fim."⁶²

⁶¹ Allan Franklin. **Op. Cit.**, nota 46, pág. 35.

⁶² Allan Franklin. **Op. cit.**, nota 46, págs. 35.

Como era comum nesse período, e isso também teria ocorrido com Leonardo da Vinci, entre outros, Buridan não deixou claro se considerava a velocidade de queda dependente do tempo decorrido ou da distância percorrida. Aliás, essa dúvida persistiu atingindo até René Descartes e Galileu Galilei que tiveram muita dificuldade em lidar com ela.

Ainda no mesmo século XIV, Nicolau Oresme (1325-1382) acreditava que a velocidade de um corpo em queda era proporcional ao tempo, porém era partidário do impetus que se esvai e que seria função tanto da velocidade quanto da aceleração.

Da mesma forma que alguns de seus precursores, Oresme imaginava como seria o movimento de um objeto deixado cair num túnel diametral passando pelo centro da Terra. Chegou à conclusão que o movimento seria oscilatório à semelhança do que ocorre com o movimento de um pêndulo.

É importante ressaltar uma característica marcante da definição de impetus que estava presente em todos esses pensadores medievais: havia uma confusão entre **causa e efeito** do movimento por parte do impetus, isto é, às vezes o impetus era entendido como força que provocava o movimento - causa do movimento - e às vezes era entendido como qualidade do movimento - efeito do movimento. É por isso que não se podia falar na existência de um princípio de inércia em Buridan e seus contemporâneos.

No século XV encontramos Nicolau de Cusa (1401-1464) atribuindo o movimento das esferas celestes à ação do impetus. Cusa, seguidor de Buridan, que já havia escrito sobre o impetus circular, discutia a possibilidade do movimento perpétuo sobre uma terra perfeitamente lisa, ideia que foi posteriormente utilizada por Galileu.

A **mecânica terrestre** começava a se encontrar com a **mecânica celeste**, algo proibido pela separação imposta pela visão de mundo aristotélica. A herança grega chegava no momento certo, no lugar correto e nas mãos que haveriam de provocar uma verdadeira revolução, a **revolução copernicana**.

Capítulo 5. A revolução copernicana

Cristóvão Colombo (~1451-1506) descobriu – ou invadiu? - a América em **1492**, ano em que Nicolau Copérnico, jovem estudante, tinha dezoito anos.

Copérnico, nascido na Polônia em 1473, viveu num período de profundas mudanças na Europa. Era o **Renascimento**. Ocorriam transformações nas artes, nas maneiras de vida, na economia, no Estado e nas técnicas. Era o período de um forte incremento no comércio entre cidades próximas e distantes, o que provocaria o ciclo das grandes navegações.

Com Colombo, que alguns historiadores chegaram a atribuir conhecimentos de física, abriu-se de vez o véu que cobria a esfericidade da Terra, que havia sido considerada plana durante a Idade Média, para a maioria das pessoas desse período. Com Colombo a esfericidade teórica da Terra ganhou notoriedade prática. Os temores provocados nos navegadores devido aos abismos nos extremos da Terra plana estavam com seus dias contados. O século XV estava terminando e com ele os tempos medievais.

5.1. A proposta de Nicolau Copérnico

À época de Copérnico o sistema aristotélico-ptolomaico, apesar de aceito e imposto pela grande maioria dos estudiosos de astronomia, enfrentava uma série de dificuldades. Alguns problemas não podiam ser resolvidos dentro das condições dadas pelo paradigma dominante. Eis alguns deles:

1. Oferecer uma explicação convincente sobre o **movimento retrógrado dos planetas**;
2. Explicar porque Vênus e Mercúrio sempre são vistos nas proximidades do Sol;
3. Explicar porque Marte, Júpiter e Saturno podiam ser vistos em oposição ao Sol;
4. Explicar a ordem de afastamento dos planetas com relação ao Sol.

A técnica de salvar as aparências dos fenômenos, mesmo com essas dificuldades, continuava a sobreviver devido à solução de problemas práticos, como a localização no mar pela posição das estrelas e ao fato de assentar-se sobre a imobilidade da Terra, confirmada pelos sentidos. Este último fato era particularmente importante pois os únicos candidatos presentes na civilização grega para substituir o paradigma geocêntrico estavam baseados no movimento da Terra.

No começo do século XVI, Copérnico estudava em detalhe a astronomia geocêntrica pois trabalhava na elaboração de mapas celestes para localização no mar. Ele também escrevia trabalhos sobre a arte da navegação. Era como se estivesse se preparando para o grande trabalho que provocaria um acontecimento que levaria seu nome, a

revolução copernicana, que transcendeu de muito sua importância astronômica, como sugere Thomas Kuhn ao afirmar que

*"A reforma astronômica não é, contudo, o único sentido da Revolução. Outras alterações radicais sobre o conhecimento da natureza seguiram-se à publicação do *De revolutionibus* de Copérnico, em 1543. Muitas dessas inovações, que culminaram, um século e meio depois, na concepção newtoniana de universo, foram subprodutos inesperados da teoria astronômica de Copérnico."*⁶³

A astronomia voltava a desempenhar um papel importante na vida das pessoas, não só por causa da sua relevância para as grandes navegações, mas também, devido ao desenvolvimento da astrologia.

Copérnico, figura polêmica e contraditória, descrita de diversas maneiras por diferentes historiadores da ciência, foi um legítimo pensador revolucionário da **Renaissance**. Foi educado na leitura dos grandes filósofos gregos. Cedo chegou à conclusão de que o universo descrito por Ptolomeu era insatisfatório e confuso.

Por volta de 1510, quando tinha trinta e sete anos, Copérnico redigiu sua primeira apresentação pública, mas pouco divulgada de seu sistema heliocêntrico. Trata-se da obra **Nicolai Copernic de hypothesis mottuum caelestium a se constitutis commentariolus**⁶⁴, onde se encontra um breve sumário de suas hipóteses sobre o movimento dos corpos celestes. Nesse manuscrito Copérnico apresentava suas sete exigências ou axiomas revolucionários:

- "1. Não existe um centro único de todos os orbes celestes ou esferas.*
- 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 à altura do firmamento é menor do 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.*

⁶³ Thomas S. Kuhn. **Op. cit.**, nota 17, pág. 1.

⁶⁴ Em português tem o título **Pequeno comentário sobre as hipóteses formuladas por Nicolau Copérnico acerca dos movimentos celestes**, segundo tradução da obra realizada por Roberto de Andrade Martins. **Commentariolus. Op. cit.**, nota 31. Roberto Martins apresenta uma introdução muito interessante que situa bem as ideias de Copérnico no contexto de sua época e compara as técnicas de Copérnico com as de Ptolomeu.

5. *Qualquer movimento aparente no firmamento, não pertence a ele, mas à Terra. Assim a Terra, com os elementos adjacentes, gira em torno dos seus polos invariáveis em um movimento diário, ficando permanentemente imóveis o firmamento e o último céu.*

6. *Qualquer movimento aparente 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 a Terra. Apenas o movimento desta é suficiente para explicar muitas irregularidades aparentes no céu.*"⁶⁵

Todas essas exigências, ou axiomas como são designados por Arthur Koestler⁶⁶, foram desenvolvidas constituindo o tratado **De revolutionibus orbium caelestium**. Nele Copérnico imaginava poder construir um sistema que recuperasse a concepção de harmonia geométrica presente nos ideais dos antigos pitagóricos, isto é, poder construir as órbitas dos corpos celestes segundo movimentos circulares perfeitos. No entanto, Copérnico teve que fazer uso dos deferentes, epiciclos e excêntricos utilizados por Ptolomeu no seu **Almagesto**. O que o diferenciou e valorizou face à obra do grego foi a consideração do movimento da Terra e a posição central atribuída ao Sol no comando do movimento dos demais corpos celestes.

5.2. Problemas resolvidos pelo heliocentrismo de Copérnico

Com o heliocentrismo foram resolvidos vários problemas que levaram o geocentrismo à crise. A seguir trato de alguns deles.

1. Com a Terra girando em torno de seu eixo, o movimento diário de rotação dos corpos celestes torna-se apenas um movimento aparente.

2. Como Mercúrio e Vênus estão sempre próximos ao Sol, confirma-se que estão entre a Terra e o Sol.

3. Marte, Júpiter e Saturno estão às vezes em oposição ao Sol, pois suas órbitas em torno do Sol têm raios maiores que os da órbita da Terra.

4. As distâncias de Mercúrio e Vênus ao Sol são facilmente obtidas.

⁶⁵ Nicolau Copérnico. **Op. cit.**, nota 32, págs. 103/105.

⁶⁶ Arthur Koestler. **Op. cit.**, nota 12, pág. 97.

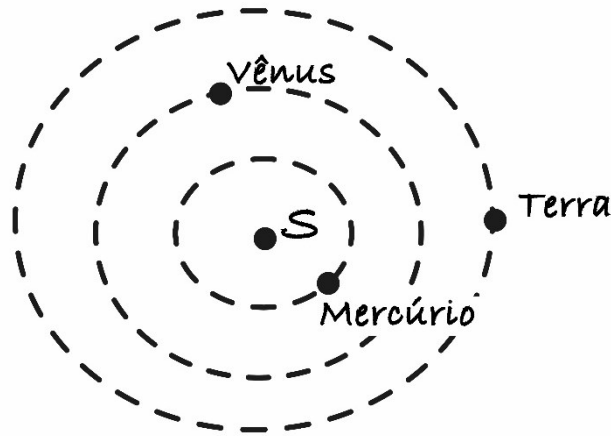


Figura 11. Posições de Mercúrio, Vênus e Terra.

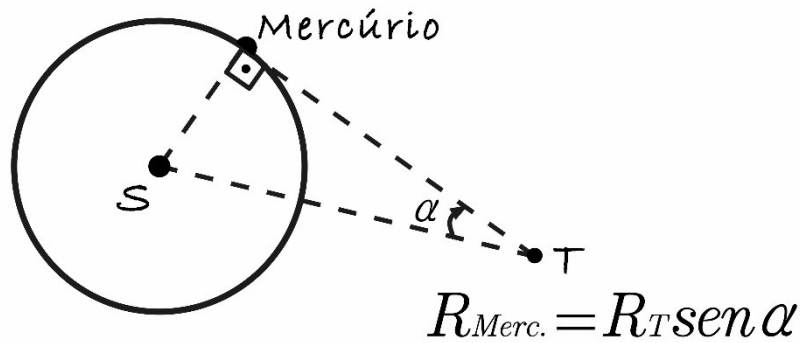


Figura 12. Distância de Mercúrio ao Sol.

5. É possível explicar os movimentos retrógrados dos planetas.

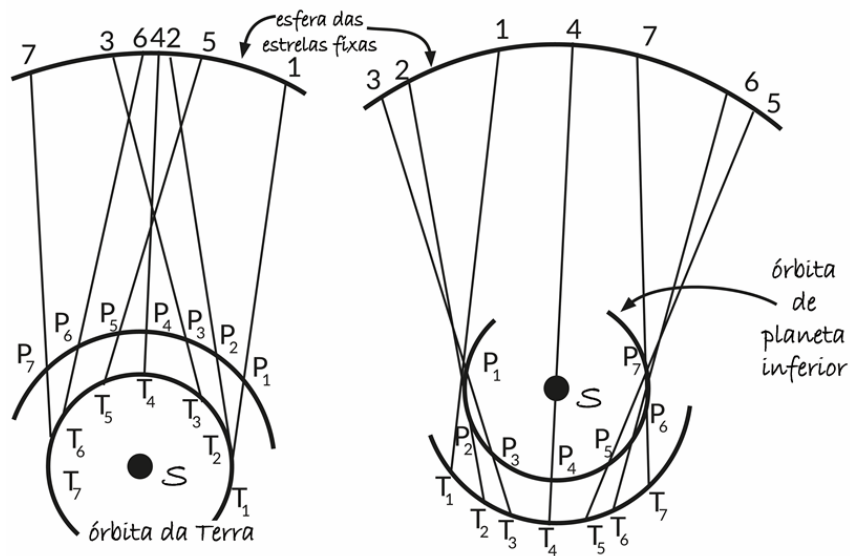


Figura 13. Explicação dos movimentos retrógrados⁶⁷

6. O mundo de Copérnico.

⁶⁷ Thomas S. Kuhn. *Op. cit.*, nota 17, pág. 166.



Figura 14. O sistema copernicano

Podemos observar na **Figura 14** que, embora o sistema copernicano seja semelhante ao ptolomaico, com a diferença de neste ser a Terra e não o Sol o centro do universo, notamos a presença de dois centros: o Sol e a Terra. Notamos também que Copérnico mantém a **esfera das estrelas fixas** presente no antigo sistema.

A grande inovação do sistema de Copérnico é dupla: colocar o Sol no centro do universo e considerar a Terra um planeta como os demais e, portanto, em movimento. A proposta de Aristarco de Samos, quase vinte séculos depois, retorna e agora com uma melhor articulação.

7. O sistema copernicano permite o cálculo dos períodos dos planetas pela observação dos tempos decorridos entre dois máximos consecutivos dos movimentos retrógrados. Por exemplo, para o planeta Marte esse tempo é de 780 dias. Pela explicação do movimento retrógrado apresentada acima sabemos que durante esse intervalo de tempo a Terra deu exatamente uma volta a mais que Marte em torno do Sol. A ilustração da **figura 15** deve ajudar a compreender esse fato.

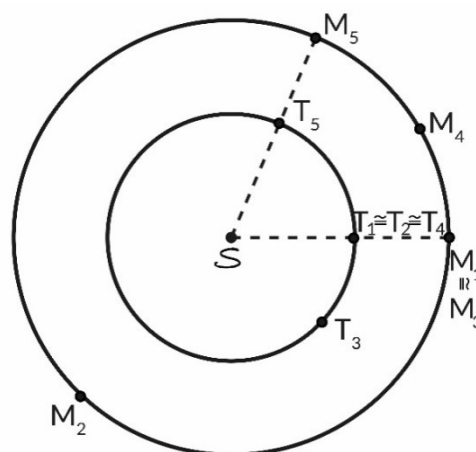


Figura 15. Terra e Marte

Os pontos T_1 e M_1 correspondem às posições respectivas da Terra e de Marte no momento de um máximo do movimento retrógrado de Marte. Após um ano terrestre, 365 dias, os planetas estarão nas posições T_2 e M_2 . Após um ano marciano T_M , a ser determinado, os planetas estarão nas posições T_3 e M_3 . As posições T_4 e M_4 correspondem a um intervalo de tempo de dois anos terrestres após o máximo de movimento retrógrado acima mencionado.

Finalmente, T_5 e M_5 correspondem à posição de máximo do movimento retrógrado imediatamente consecutivo ao anterior, T_1, M_1 . Representemos por T_{2R} o intervalo de tempo entre esses dois máximos, que sabemos ser de 780 dias. Representemos por T_T e T_M os períodos de translação da Terra e de Marte, respectivamente, em torno do Sol. A razão T_{2R}/T_T dá o número de voltas (inteiro mais fração) da Terra em torno do Sol no tempo T_{2R} . A razão T_{2R}/T_M dá o número de voltas de Marte no mesmo intervalo de tempo T_{2R} . Assim, podemos escrever a seguinte relação:

$$\frac{T_{2R}}{T_T} - \frac{T_{2R}}{T_M} = 1$$

Sabendo que $T_{2R} = 780 \text{ dias}$; $T_T = 365 \text{ dias}$; $T_M = ? \text{ dias}$.

Substituindo os valores conhecidos na relação acima, obtemos o período de Marte:

$$T_M \cong 686 \text{ dias},$$

8. O sistema copernicano permite determinar as distâncias dos planetas externos à órbita da Terra ao Sol, em função da distância da Terra ao Sol.

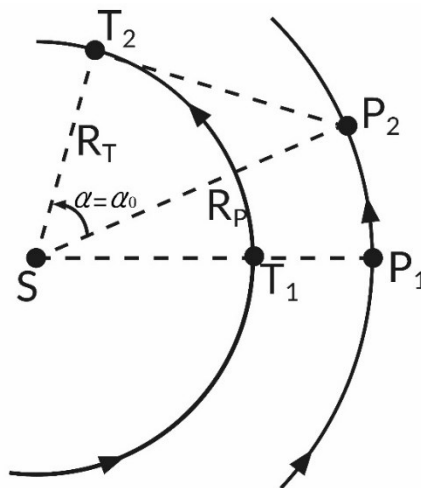


Figura 16. Distância dos planetas externos ao Sol

Em termos modernos eis o procedimento: consideremos o ângulo entre R_P e R_T , que são, respectivamente, as distâncias do planeta e da Terra ao Sol. Num determinado dia em que a Terra e o planeta estão alinhados, começamos a contar o tempo, $t = 0$, que corresponde a $\alpha = 0^\circ$.

Para $t = T_{2R}$ teremos $\alpha = 360^\circ$.

Considerando constantes as velocidades orbitais da Terra e do planeta podemos escrever a seguinte relação:

$$\alpha = kt \quad (1)$$

A constante k pode ser obtida de:

$$360^\circ = kT_{2R}$$

de onde

$$k = \frac{360^\circ}{T_{2R}} \quad (2)$$

Substituindo (2) em (1), obtemos:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{T_{2R}} t \quad (3)$$

Prosseguindo na contagem do tempo decorrido desde $t = 0$, acima definido, esperamos chegar o dia em que o ângulo ST_2P_2 é reto; isto ocorre num certo $t = t_0$. Substituindo este valor de t na expressão (3) obtemos o valor de a_0 .

Na situação acima descrita temos a seguinte relação:

$$\cos a_0 = \frac{R_T}{R_P}$$

Assim, obtemos o valor da distância do planeta ao Sol:

$$R_P = \frac{R_T}{\cos a_0}$$

Na carta-prefácio ao **De revolutionibus**, Copérnico escreveu o seguinte:

*"Portanto, assumindo os movimentos que atribuo à Terra neste trabalho, descobri após estudo longo e intensivo que, se os movimentos das estrelas errantes são referidos ao movimento circular da Terra e calculados de acordo com a revolução de cada estrela, então, não apenas os fenômenos concordam com os resultados, mas também tornam-se ligados entre si a ordem e a magnitude de todas as estrelas e esferas, e o próprio céu, de tal forma que nada pode ser movido em nenhuma parte sem colocar em risco outras partes e o universo como um todo."*⁶⁸

Notamos, assim, que Copérnico acreditava ter construído um sistema perfeitamente coerente, envolvendo todos os corpos celestes, coerência que ele não encontrava no sistema ptolomaico.

Eis mais um trecho do **De revolutionibus** onde, segundo Arthur Koestler, Copérnico apresentava a "gênese do seu sistema":

"Afigurou-se-me, pois, um erro ignorar certos fatos bem conhecidos de Marciano Capella, que escreveu uma enciclopédia, e de outros latinos. Acreditava ele que Vênus e Mercúrio não giram em torno da Terra como outros planetas, mas em torno do Sol, e não podem, conseqüentemente, afastar-se do Sol mais do que permite o tamanho da órbita. Que significa isso, senão que o Sol é o centro das órbitas deles e que eles giram em torno do Sol? Assim a esfera de Mercúrio seria envolvida pela de Vênus, duas vezes maior, e encontraria espaço suficiente no interior dela. Se nos valer-mos da oportunidade para dar a Saturno, Júpiter e Marte o mesmo centro, isto é, o Sol (...) cairão os seus movimentos numa ordem regular e explicável (...) E visto que agora todos estão dispostos em torno do mesmo centro, mister se faz ser preenchido pela Terra, e pela Lua que a acompanha, e por toda a matéria encontrável na esfera sublunar, o espaço deixado entre a superfície convexa da esfera de Vênus e a esfera côncava de Marte. (...) Logo, não hesitamos em afirmar que a Lua e a Terra descrevem anualmente uma órbita circular colocada entre os planetas interiores e os

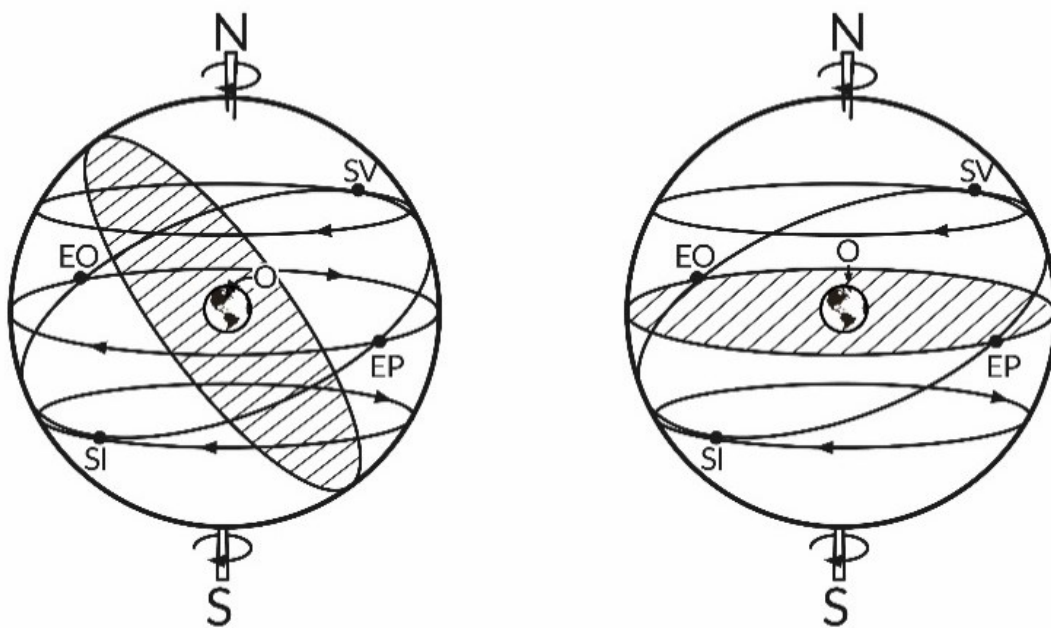
⁶⁸ Nicolau Copérnico. **De revolutionibus orbium celestium**. A. M. Duncan (tradutor do latim para o inglês). David & Charles, London, 1976, pág. 26. Existe uma edição em português, editada em Portugal.

exteriores em volta do Sol que permanece imóvel no centro do mundo, e que tudo que parece movimento do Sol é, na realidade, movimento da Terra."⁶⁹

5.3. Desafios ao sistema copernicano

Como todo e qualquer paradigma que se preze também o copernicano teve que enfrentar problemas e críticas. O desenvolvimento do sistema heliocêntrico se inicia exatamente na busca de solução para esses problemas e na superação dessas críticas. O paradigma copernicano começou a ser construído e difundido através da bem-sucedida articulação executada por seus "seguidores". Vamos tratar disso na sequência.

Um dos problemas sérios é o da explicação das **estações do ano**. No sistema ptolomaico a solução era considerar o plano da órbita do Sol inclinado de um ângulo de $23,5^\circ$ com relação ao equador celeste, como ilustra a **figura 17**.



SV - Solstício de Verão; SI - Solstício de Inverno;
EO - Equinócio de Outono; EP - Equinócio de Primavera

Figura 17: Observador no meio do hemisfério norte (esquerda) e Observador no polo norte (direita)⁷⁰

Como bom seguidor de muitos dos argumentos aristotélicos, Copérnico imaginava que a Terra estava *presa* a uma esfera que girava em torno do Sol. O movimento anual da Terra teria a aparência mostrada na figura 18 e o eixo da Terra apontaria para

⁶⁹ Arthur Koestler. **Op. cit.**, nota 12, págs. 138/139.

⁷⁰ Figura extraída e adaptada de Thomas S. Kuhn, **Op. cit.**, nota 17, pág. 36.

diferentes direções ao longo do ano. Como isso não resolve o problema das estações do ano, Copérnico imaginou um terceiro movimento para a Terra segundo o qual seu eixo descreveria uma superfície cônica. Os desenhos da figura 18 ilustram melhor a situação descrita por Copérnico.

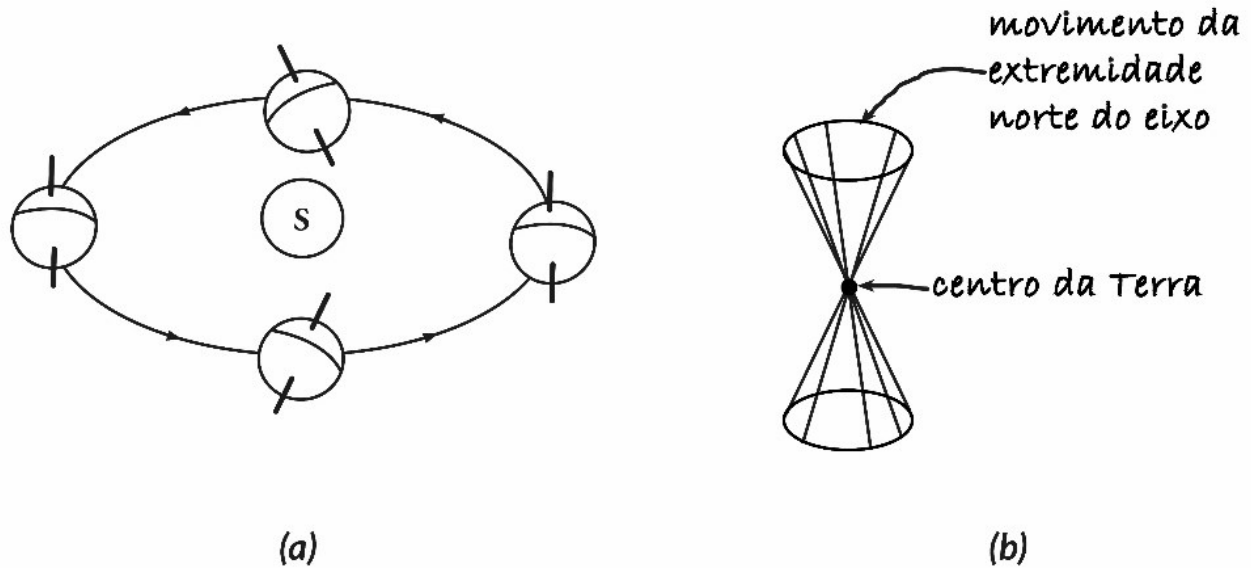


Figura 18. "Segundo e terceiro movimentos de Copérnico. O segundo movimento, aquele de um planeta fixo numa esfera girante centrada no Sol, é mostrado em (a). Este movimento não mantém o eixo da Terra paralelo a si próprio, de tal forma que o terceiro movimento cônico mostrado em (b) é necessário a fim de manter o eixo sempre apontando para uma mesma direção."⁷¹

Essa combinação desses dois movimentos oferece a configuração necessária para explicar as estações do ano, como é ilustrado na **figura 19**.

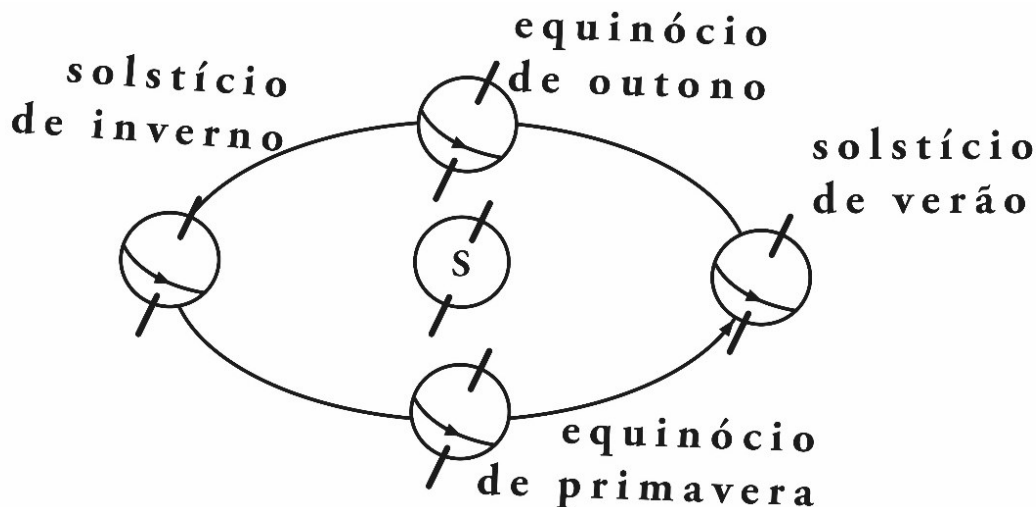


Figura 19: O movimento anual da Terra ao redor de sua órbita copernicana. Em todo tempo, o eixo da Terra permanece paralelo entre ele mesmo ou para a linha estacionária desenhada pelo Sol.

⁷¹ Figura e texto extraídos de Thomas S. Kuhn, *op. cit.*, nota 17, pág. 165.

*Como um resultado um observador O ao meio dia em latitudes no meio do hemisfério norte encontrara o Sol muito mais próximo do zênite no verão do que no Solstício de inverno*⁷²

Se atribuir um único movimento para a Terra já era considerado um absurdo nessa época, imaginem como foi recebido pelos pensadores contemporâneos de Copérnico seu sistema que atribui três movimentos ao nosso planeta!

Outro problema confrontado pelo sistema copernicano dizia respeito às fases de Vênus. A proposta de Copérnico implicava que Vênus deveria mostrar uma grande variação em tamanho e em brilho, o que não era observado, e não é até hoje a olho nu. Isto devido às hipóteses feitas pelo próprio Copérnico como podemos observar pela seguinte passagem do seu **De revolutionibus**:

*"De acordo com Platão e seus seguidores os planetas são corpos negros que refletem a luz do Sol, assim, se estiverem abaixo do Sol, devido à sua curta distância ao mesmo, eles serão vistos pela metade ou como discos parciais. (...) isso é semelhante ao que vemos na Lua nova ou nos quartos crescente ou decrescente da Lua."*⁷³

A **figura 20** ilustra a descrição apresentada acima.

⁷² Figura e texto extraídos de Thomas S. Kuhn, **op. cit.** nota 17, pág. 162.

⁷³ Nicolau Copérnico. **Op. cit.**, nota 61, pág. 47.

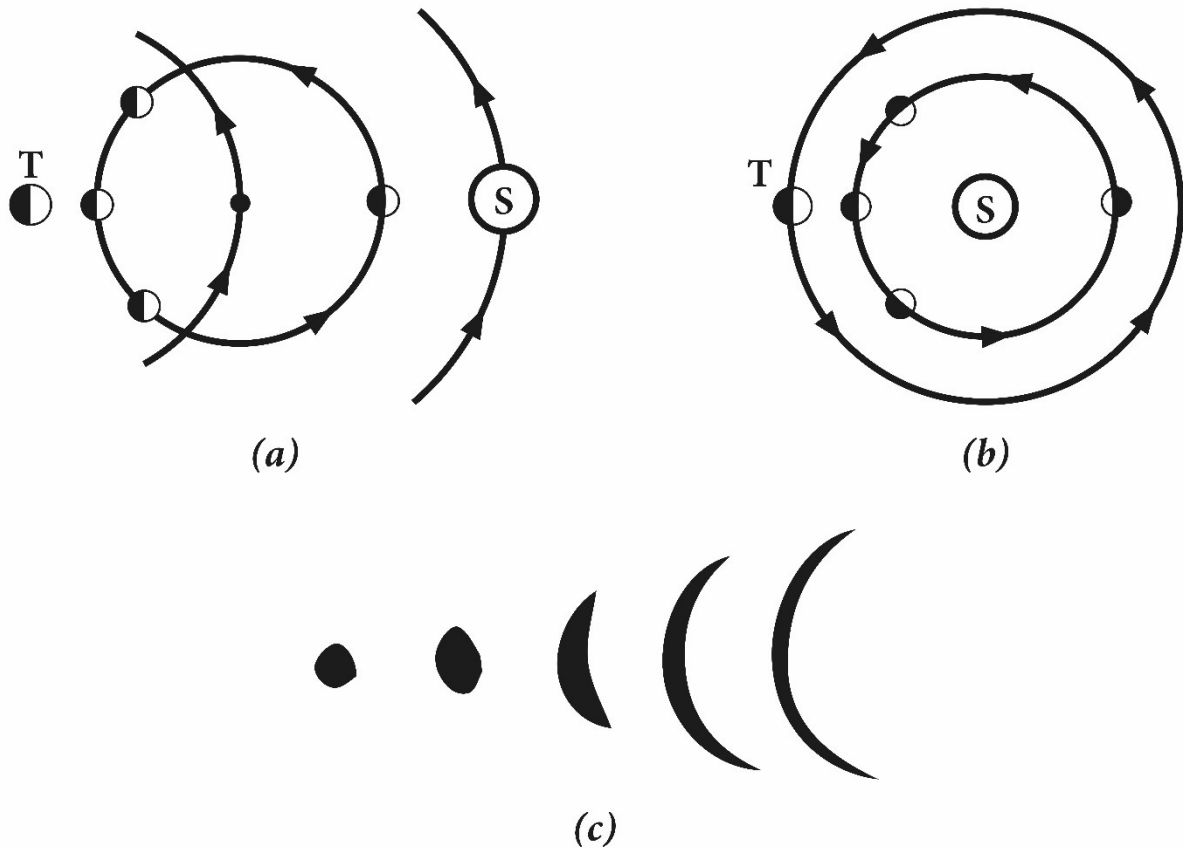


Figura 20: As fases de Vênus em (a) O sistema Ptolomaico; (b) O sistema Copernicano e c) como observado com um telescópio de baixa potência. Em (a) um observador na Terra deveria num poder ver mais que um fino crescente de luz na face de Vênus. Em (b) ele deveria ver quase toda a face de Vênus iluminada logo antes ou depois Vênus atravessaria o Sol. Esta quase circular silhueta de Vênus quando ele primeiro torna-se visível como um estrela noturna é desenhada por observações com um telescópio de baixa potência à esquerda no diagrama (c). As sucessivas observações desenhadas a direita mostram como Vênus diminui e simultaneamente cresce em tamanho quando o movimento orbital o aproxima da Terra⁷⁴.

O desafio aqui apresentado à proposta de copernicano reside no fato de que as variações de brilho e tamanho só seriam distintamente percebidas com o auxílio do telescópio, ainda não existente à época de Copérnico. Caberá a Galileu, como veremos mais adiante, confirmar a validade da tese copernicana.

Ainda um outro problema que apresentou dificuldades para Copérnico era a **ausência de paralaxe**, isto é, a mudança aparente na separação entre dois objetos quando observados de diferentes posições. Desta forma, se a Terra é considerada orbitar anualmente em torno do Sol, observações realizadas em diferentes épocas do ano deveriam mostrar um certo deslocamento na determinação da posição de estrelas.

⁷⁴ Figura e texto extraídos de Thomas S. Kuhn, *op. cit.*, nota 17, pág. 223.

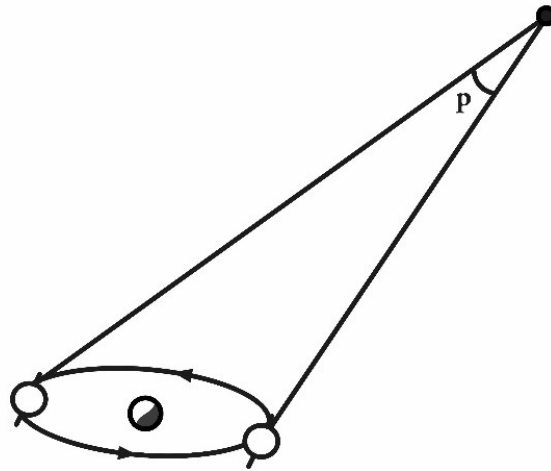


Figura 21. *"Paralaxe anual de uma estrela. Porque a linha entre um observador terrestre e uma estrela fixa não permanece paralela a si própria quando a Terra se move em sua órbita, a posição aparente da estrela sobre a esfera das estrelas fixas deveria sofrer um deslocamento p num intervalo de seis meses."*⁷⁵

Para tentar contornar este problema, Copérnico sugeriu que o raio do universo deveria ser muito maior do que pensavam os antigos gregos. Desta forma as estrelas, e sua correspondente esfera, estariam numa distância muito grande da Terra o que impossibilitaria a observação da paralaxe.

Enquanto perdurou o impasse da não observação da paralaxe os geocentristas tinham mais um bom argumento contra Copérnico. A ausência de paralaxe reforçava o paradigma que considerava a Terra imóvel.

Apenas em 1838, com telescópios mais potentes do que os utilizados por Galileu, o fenômeno da paralaxe foi finalmente observado. Felizmente havia outras razões para a articulação bem-sucedida do heliocentrismo.

Para finalizar, entre os problemas que desafiaram o novo sistema podemos acrescentar um que normalmente é apresentado de forma errônea nos textos elementares. A saber, afirmam que o heliocentrismo é melhor no ajuste com as observações e na possibilidade de previsões. Esse não é o caso da proposta copernicana. Ao contrário, o sistema ptolomaico, que havia passado por séculos de aprimoramento, tinha desenvolvido um potencial para descrever as aparências celestes que o tornaria um inimigo competente difícil de ser derrotado nesse aspecto, pelo menos logo após a publicação do **De revolutionibus**, em 1543.

É claro que havia oposições mais profundas e associadas com a descrição e sensação da realidade observável. Duas dessas objeções, as mais importantes, estão acopladas: a objeção contra o movimento da Terra, de um lado, e de outro, caso está se

⁷⁵ Figura e texto extraídos de Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 17, pág. 163.

movesse, a objeção contra a não mobilidade do ar produzindo um forte vento permanente para leste.

O próprio Copérnico ofereceu duas possibilidades de explicação no que diz respeito à não mobilidade do ar contíguo à Terra. A primeira utilizava a concepção grega dos quatro elementos fundamentais. Copérnico argumentava que o ar próximo à superfície da Terra seria constituído por uma mistura do elemento terra com o elemento ar, o que tornava essa parte da atmosfera suscetível a movimentos análogos aos da Terra.

A segunda explicação de Copérnico era bem mais sofisticada e, ao mesmo tempo, mais próxima do pensamento físico que estava por nascer. Ele argumentava que o ar giraria junto com a Terra, a acompanharia no seu movimento, sem oferecer resistência pois o mesmo se encontra em movimento constante de rotação.

Os aristotélicos utilizavam ainda outra "prova" da imobilidade da Terra: uma pedra lançada verticalmente para cima deveria cair muito longe do ponto de lançamento caso fosse verdade que a Terra era também um planeta errante. Para contestar essa "experiência" crucial contra seu sistema, Copérnico fazia uso de uma argumentação de mesma qualidade que a primeira esboçada acima quanto ao movimento do ar. Ele afirmava que, sendo a pedra um **grave**, isto é, elemento mais pesado que o ar ou elemento terra, uma vez atirada para cima deveria acompanhar também a rotação da Terra. Um pequeno trecho extraído do **De revolutionibus** é significativo a este respeito:

*"Nós temos que admitir que o movimento de queda e de subida de corpos é um movimento dual em comparação com o universo, e é não menos que uma composição de movimento retilíneo com movimento circular. Pois as partes que caem devido ao seu próprio peso, desde que são principalmente **terrosos**, indubitavelmente mantém a mesma natureza com o todo. O mesmo se aplica para as coisas que são atiradas para cima devido a forças associadas à sua própria natureza. Pois o fogo aqui da Terra é alimentado principalmente por material terroso (...)"⁷⁶*

É interessante notar nessa argumentação de Copérnico como, apesar de ainda preso a muitas categorias aristotélicas, ele rompeu com a concepção de Aristóteles de que um objeto não poderia estar sujeito, ao mesmo tempo, a dois movimentos diferentes. Copérnico estava distante, no tempo e conceitualmente, da física de Kepler e Galileu, principalmente, neste caso, do último, que foi responsável pela ideia de que a trajetória de um corpo pode ser representada pela resultante de vários movimentos simultâneos. Parece claro que Copérnico, nessa discussão, estava fortemente influenciado pela análise que fazia do movimento aparente dos planetas errantes que, como vimos, é

⁷⁶ Nicolau Copérnico, **op. cit.**, nota 61, pág. 41

composto de dois movimentos: do planeta em torno do Sol e da Terra, local de observação, também em torno do Sol. Assim, transferindo a qualidade dessa explicação ao movimento de corpos na proximidade da superfície da Terra, Copérnico deve ter pensado na composição de movimentos.

Os aristotélicos também objetavam o movimento de rotação da Terra. Diziam que a Terra seria destruída, se romperia em pedaços, antecipando o efeito do que seriam as forças centrífugas à época de Newton. Copérnico contra argumentava afirmando que isso não sucederia, pois, esse movimento de rotação da Terra, assim como os outros dois, são **movimentos naturais** não tendo, portanto, poder de destruição. Copérnico utilizava mais uma categoria do pensamento aristotélico. Eis algumas palavras de Copérnico sobre esse tema:

"Não há razão alguma para Ptolomeu temer que a Terra se desintegre e que sejam espalhados os objetos terrestres devido à rotação produzida pelas forças da natureza, que são distintas de artificios, ou do que pode ser conseguido por habilidades humanas. Além do mais, por que essa mesma questão não é levantada ainda mais fortemente com relação ao movimento do universo como um todo, já que ele deve ser muito mais rápido na proporção em que o firmamento é maior que a Terra?"⁷⁷

Copérnico dava início, ou melhor dizendo, fazendo justiça aos vários intelectuais medievais, continuava a derrubada de um velho sistema e apresentava uma visão de mundo radicalmente diferente em muitos aspectos e, ao mesmo tempo, com muitos pontos de contato com o sistema que procurava substituir. Uma **revolução** intelectual estava ocorrendo. Arthur Koestler tece a seguinte comparação entre os dois sistemas:

"O universo aristotélico era centralizado. Tinha um centro de gravidade, um núcleo sólido, ao qual se referiam todos os movimentos. Tudo quanto fosse pesado caía para o centro, tudo quanto fosse fluido como o fogo e o ar, tentava afastar-se dele; os astros, nem pesados, nem fluidos, e de natureza inteiramente diversa, moviam-se em círculos, em torno dele. Os pormenores do esquema podiam ser corretos ou errados, mas o esquema era simples, plausível e tranquilizadamente ordenado.

*O universo copernicano não somente se **expande** para o infinito, como também, ao mesmo tempo, é **descentralizado**, desconcertante, anárquico. Não possui centro natural de orientação a que se possa referir tudo. As direções **para cima** e **para baixo** não são mais absolutas, nem tampouco o*

⁷⁷ Nicolau Copérnico, **op. cit.**, nota 61, pág. 43.

*são o peso e a fluidez. O peso de uma pedra significava antes, a sua tendência a cair para o centro da Terra: era o significado de **gravidade**. Agora o Sol e a Terra tornam-se centros de gravidade por conta própria. Já não há mais qualquer direção absoluta no espaço. O universo perdeu o núcleo, não tem um coração, tem milhares."*⁷⁸

5.4. Início da articulação do paradigma copernicano

Como deixamos claro anteriormente o sistema copernicano precisava ser articulado para que saísse vitorioso no confronto com os aristotélicos. Como já observamos o paradigma aristotélico-ptolomaico constituía-se não apenas num dogma científico, era também um dogma da Igreja, e esta tinha, nessa época, muito mais poder e influência do que tem hoje. Assim, pelos mais diversos motivos, científicos, religiosos, estéticos, ideológicos, etc., os seguidores de Copérnico tiveram que lutar muito, criar ainda mais, para levar a carruagem para seu destino. Destino, aliás, que preocupava sobremaneira o próprio Copérnico que deve ter sofrido com as tentativas de seus adversários que "*estavam por cima*" de ridicularizá-lo. Não pode ser encarado como mera coincidência o fato de que seu tratado **De revolutionibus** tenha sido publicado no ano de sua morte!

Embora o raio do universo copernicano tenha aumentado muito, quando comparado às dimensões até então dominantes, o mundo de Copérnico ainda era finito, cercado de esferas, estava sob a hegemonia do círculo, entre outras categorias aristotélicas que ainda sobreviviam.

Mas que o **De revolutionibus** provocou os corações e as mentes dos seus contemporâneos e dos que viveriam nas décadas seguintes, não há nenhuma dúvida, como demonstram a quantidade e a qualidade dos articuladores do novo sistema heliocêntrico que surgiram ainda no final do século XVI e durante o século XVII.

No entanto, nos cinquenta anos que se seguiram à sua morte a influência de Copérnico foi muito pequena. Nesse período ele era mais lembrado devido às suas compilações de tabelas astronômicas do que devido ao seu sistema de mundo. Portanto, até quase o final do século XVI Copérnico foi lembrado por seu **Calculatio Copernicano**, como eram então conhecidas as suas tabelas.

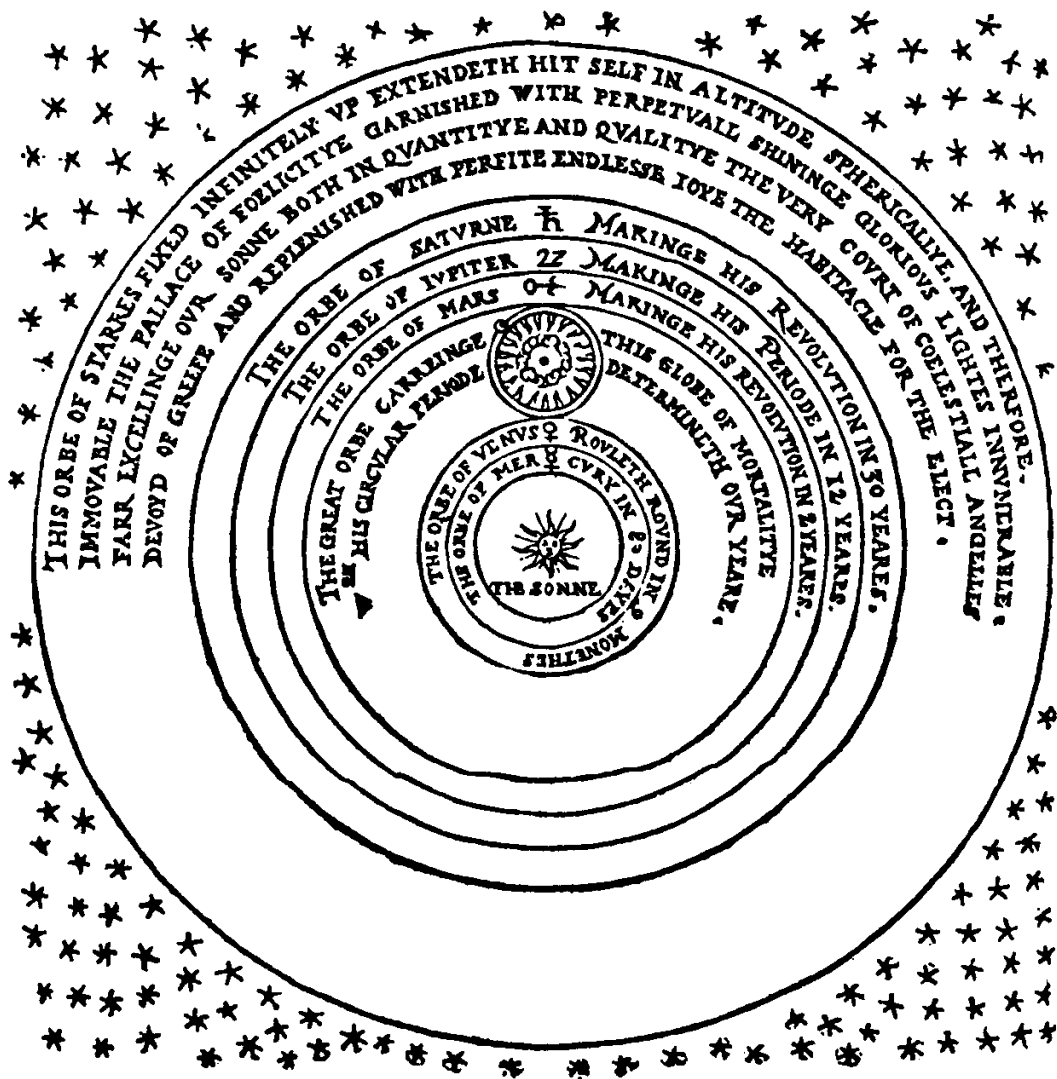
Porém, alguns pensadores importantes também deram sustentação às ideias de Copérnico. Por exemplo, em 1576, o astrônomo inglês Thomas Digges publicou o texto **Descrição perfeita dos orbes celestes segundo a antiquíssima doutrina dos pitagóricos, recentemente ressuscitada por Copérnico e reforçada por demonstrações**

⁷⁸ Arthur Koestler, **op. cit.**, nota 12, pág. 146.

geométricas. Segundo Alexandre Koyré a importância de Thomas Digges prende-se ao fato de que ele:

"(...) foi o primeiro copernicano a substituir a concepção de seu mestre, a de um mundo fechado, pela de um mundo aberto, e que em sua Descrição, onde ele oferece uma tradução bastante boa, ainda que um tanto livre, do *De revolutionibus orbium caelestium*, ele faz alguns acréscimos bastante interessantes. Em primeiro lugar, ao descrever o orbe de Saturno ele insere a informação de que esse orbe é "de todos os outros o mais próximo desse orbe infinito inamovível, ornado de luzeiros inumeráveis".⁷⁹

☉ **A perfit description of the Caeftiall Orbes,**
according to the moft auncient doctrine of the
Pythagoreans. &c.



⁷⁹ Alexandre Koyré. *Do mundo fechado ao universo infinito*. Ed. Forense e EDUSP, São Paulo, 1979, pág. 43.

Figura 22. Reprodução do universo copernicano infinito de Thomas Digges.⁸⁰

Outros personagens que podem ser lembrados na defesa do sistema copernicano, pertencentes ao século XVI, são Giordano Bruno e, ironicamente, Tycho Brahe.

O mais famoso astrônomo do século XVI, Tycho Brahe, responsável pelas melhores observações astronômicas efetuadas sem o auxílio do telescópio, é um exemplo de um cientista importante que não aceitava de modo algum o novo candidato a paradigma e, ao contrário disso, tentou *corrigir* o paradigma dominante, isto é, tentou uma nova articulação do paradigma ptolomaico, ou, como diz Thomas Kuhn, procurou acomodar as observações com a teoria dominante.

Tycho Brahe, que nasceu em 1546 e faleceu em 1601, fundou e dirigiu uma das primeiras instituições científicas modernas, o Observatório de Uranienburgo, na Dinamarca, onde trabalhou de 1576 a 1597. A **figura 23** mostra seu sistema de mundo ladeado por uma frase de sua autoria.

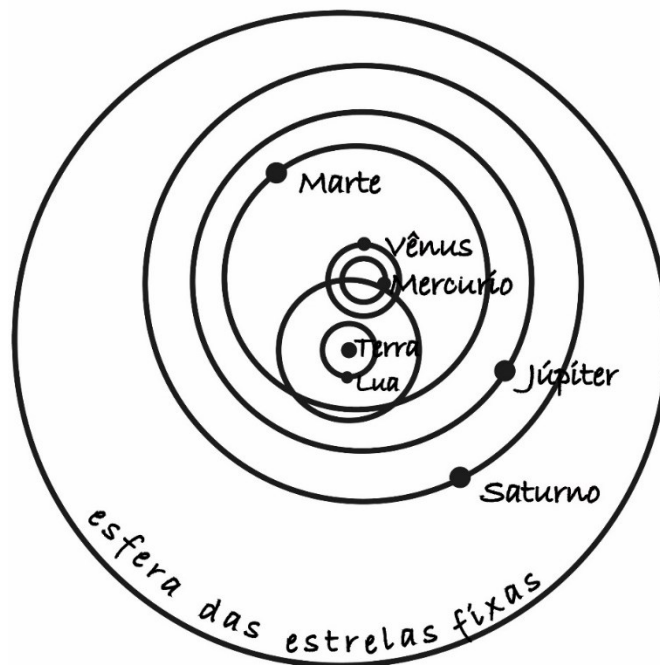


Figura 23: O sistema Tychoniano. A Terra está novamente no centro da esfera celeste rodando, e a Lua e o Sol movem nas suas antigas órbitas ptolomaicas. Os demais planetas são, entretanto, fixos em epiciclos com o centro comum no Sol⁸¹.

⁸⁰ Figura extraída de Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 17, pág. 234.

⁸¹ Figura extraída de Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 17, figura 37, pág. 202.

"Não estarão sendo confundidos os objetos celestes com os terrestres? (..) Não estará sendo colocada de cabeça para baixo toda a ordem da natureza?"⁸²

Assim, na sua modificação do sistema ptolomaico, Tycho conservou a Terra no centro do universo finito em torno do qual orbitaria o Sol com os planetas girando em torno de si.

É uma estranha ironia da história o fato de que um excelente astrônomo, o melhor até o advento do telescópio, possuidor dos mais precisos dados sobre a posição dos corpos celestes conhecidos, com uma precisão de cerca de 0,1°, ou seis minutos de arco, não conseguia enxergar a revolução que estava ocorrendo bem debaixo de seu nariz! Tycho faleceu sem fazer a mínima concessão ao sistema de Copérnico.

O filósofo/escritor Paul Chatel, num romance sobre a vida de Tycho Brahe, destaca a profissão de fé geocêntrica do grande astrônomo num suposto diálogo entre ele e Kepler:

"- Duvidei durante muito tempo - respondeu Kepler -, mas esta dificuldade em descrever o movimento aparente dos planetas faz-me crer que Copérnico talvez estivesse certo..."

- ... Faz-me crer! - interrompeu-o Tycho, irritado. - Eu, eu vos digo que vós vos deixais conduzir ao léu da corrente. Estas suposições não se sustentam, meu caro Kepler! Elas não resistem nem à reflexão nem à experiência! A Terra não é um pião. Se fosse assim, o mar, os oceanos e o ar se movimentariam incessantemente. Só haveria tempestades, furacões, maremotos causados pela rotação da Terra. Ora, eu que vivi durante muitos anos numa ilha, posso vos assegurar que não reparei que seja assim.

Kepler quis interromper Tycho, que continuou.

- Existe outro argumento. Trata-se da ausência de paralaxe anual das estrelas fixas, enquanto que, de acordo com vossa opinião e a de vossos amigos, supõe-se que a Terra segue sua grande trajetória ao redor do Sol.

- Compreendo muito bem vossos argumentos - respondeu Kepler -, mas eles não provam que a Terra seja fixa. Ora, outras suposições nos levam a pensar que nossa Terra se move mesmo.

- Não me ocupo de suposições - retrucou Tycho. - Meu sistema é o resultado de longos anos de observações e representa um meio termo razoável

⁸² Citado por Brian Easlea. **Liberation and the aims of science**. Sussex Univ. Press, 1973, pág. 44. O capítulo 2 desse livro foi básico para a construção desta parte do curso e do texto. É um livro ao qual devo boa parte do meu interesse pela história da ciência.

e lógico entre Copérnico e Ptolomeu. A Terra tychoniana é imóvel no centro de um universo que se move. A seu redor, gravitam a Lua e, um pouco mais longe, o Sol. Os cinco planetas giram em torno do Sol de maneira que os raios de Marte, de Júpiter e de Saturno são sempre maiores do que aqueles da trajetória do Sol. Assim, estes planetas nunca se encontram entre o Sol e a Terra. Admito que a descrição dos movimentos dos planetas constitui um problema que falta esclarecer e no qual devemos trabalhar! Mas afirmo que o Sol gira ao redor da Terra e não o contrário. Eu vos poupei do relatório sobre as experiências realizadas em Uranienburgo: a dos tijolos que caem sempre no mesmo lugar e a do canhão apontado para o norte, para o sul, para leste ou para oeste, cuja bala cai sempre a uma distância igual. A Terra não gira, Kepler!"⁸³

Porém, continuando a ironia da história, foram exatamente os dados de observação de Tycho Brahe que iriam permitir a Johannes Kepler, 1571/1630, uma das melhores articulações do paradigma que Tycho atacava. Kepler se beneficiou de seus resultados, deixados para ele como uma espécie de herança intelectual, na formulação de suas três famosas leis planetárias, que constituiriam a base de uma nova ciência, a astronomia física, básica para o **nascimento da mecânica**.

Outro famoso opositor do sistema copernicano foi Francis Bacon, 1561/1626, lorde chanceler da Inglaterra no reinado de Jaime I, um dos primeiros estudiosos a reconhecer a importância da ciência como um fenômeno histórico e social. Contra o heliocentrismo de Copérnico escreveu várias páginas, eis um pequeno trecho de uma delas:

"No sistema de Copérnico encontramos grandes inconvenientes: a imposição à Terra de três movimentos simultâneos, a separação do Sol da companhia dos planetas com os quais ele tinha tantas paixões em comum, (...) a introdução de tanta imobilidade na natureza representando como imóveis o Sol e as estrelas (...) Isso tudo são especulações de alguém que não se importa com as ficções que introduz na natureza, desde que seus cálculos deem certo (...)"⁸⁴

Muitos outros pensadores tiveram posicionamentos semelhantes aos de Tycho e Bacon. Dentro das Igrejas, a católica e a protestante, também encontramos forte oposição às ideias copernicanas. A revolução científica que abalava os conhecimentos consagrados sobre o celeste, provocava tumultos temidos pelos que dominavam os reinos

⁸³ Paul Chatel. **O castelo das estrelas**. Nova Stella Editorial e EDUSP, São Paulo, 1990, págs. 300/301.

⁸⁴ Citado por Brian Easlea, **op. cit.**, nota 70, pág. 44.

do terrestre. Mesmo ao longo de todo o século XVII encontramos fortes opositores às teses copernicanas.

Mas, apesar disso e, principalmente, apesar de os sentidos indicarem que os que acreditavam na imobilidade da Terra certamente estavam ao lado da verdade, o candidato a paradigma, - o sistema copernicano -, ganhou importantes articuladores que levariam adiante a simplicidade do sistema copernicano. Simplicidade que deve ser entendida com o sentido a ela atribuído por Hugh Lacey:

"Para Copérnico, a vantagem de sua teoria residia numa espécie de simplicidade, numa espécie de harmonia e racionalidade que ela discernia no universo. A simplicidade que atraiu Copérnico tem sido frequentemente mal compreendida. Alguns disseram que se tratava de uma simplicidade quantitativa, e que a teoria de Copérnico precisava usar menos excêntricos e epiciclos. O que é totalmente falso - um mito que já durou demais. A chave para o tipo de simplicidade a que nos referimos é a passagem citada anteriormente, na qual o sistema ptolomaico é comparado a um monstro, com partes que crescem independentemente umas das outras, desprovido de uma unidade central. De fato, não existe algo como o "sistema ptolomaico". Na teoria ptolomaica cada planeta é considerado isoladamente, e é traçado um conjunto de círculos para "explicar totalmente os seus fenômenos"(...) A simples hipótese do simples movimento da Terra, rotação diária e revolução anual, é suficiente para eliminar estes aspectos inexplicados, e mesmo para explicar porque são necessários nas construções ptolomaicas. A mesma hipótese também serviu para explicar os movimentos de oriente para ocidente dos planetas, e o fato de Mercúrio e Vênus nunca aparecerem para além de um certo deslocamento angular do Sol. Uma hipótese única traz unidade aos fenômenos, e cria um sistema."⁸⁵

Muito mais haveria a dizer sobre este fantástico episódio da história da física. Porém, uma das lições que devemos reter do que foi acima apresentado é que a construção do conhecimento não percorre trajetórias suaves, lineares e sem choques e contradições.

Copérnico e seus adeptos tiveram que ir contra um sistema que parecia reconstruir adequadamente as aparências dos fenômenos e, mais importante ainda, contra o que seus sentidos indicavam, seu senso comum, para afirmar uma descrição do mundo físico que se baseava essencialmente na harmonia geométrica universal.

⁸⁵ Hugh M. Lacey. **Lições de Copérnico**. Rev. Manuscrito, págs. 118/119.

É a hegemonia da aparência mediatizada pelo discurso racional, um movimento pendular entre a ordem e a desordem na descrição dos fenômenos físicos ou humanos. Como diz o escritor italiano Ítalo Calvino:

*"...O gosto da composição geometrizar, de que podemos traçar uma história na literatura mundial a partir de Mallarmé, tem como fundo a oposição ordem-desordem, fundamental na ciência contemporânea."*⁸⁶

5.5. Procurando concluir uma história que mal começou

Podemos situar o acender do rastilho da revolução copernicana entre os anos 1510 e 1514, época da publicação do **Commentariolus**.

Porém, quando realmente ocorreu a vitória da revolução copernicana?

Na resposta a esta questão vamos encontrar as mais variadas afirmativas. Alguns situam a sua vitória após o advento integral do paradigma newtoniano, o que ocorreu entre o final do século XVII e início do século XVIII. Outros situam-na com os trabalhos de Johannes Kepler resumidos nas suas três leis do movimento planetário. Outros ainda apontam os trabalhos de Galileu Galilei como o divisor de águas entre o mundo aristotélico e o mundo da ciência moderna. Alguns autores são mais precisos nessa determinação do corte entre os dois mundos conceituais e epistemológicos, situando-o em 1610, ano das famosas descobertas telescópicas de Galileu. Esta é a posição do historiador/filósofo da ciência brasileiro, Hilton Japiassu, ao afirmar que

*"Galileu é o autor da chamada **revolução copernicana**. Pelo menos, é seu herói e mártir. É ele quem destrói definitivamente a imagem mítica do Cosmos para substituí-la pelo esquema de um Universo físico unitário, doravante submetido à disciplina rigorosa da física matemática."*⁸⁷

A vitória da revolução copernicana, de qualquer forma, só ocorreu após a articulação do candidato a paradigma de Copérnico realizado por figuras do porte de Giordano Bruno, Galileu, Kepler, Isaac Newton e muitos outros que, dos mais diferentes modos deram consistência a ideias e conceitos ainda frágeis, forjaram uma nova metodologia, resolveram problemas velhos e novos, enfim, começaram a construir um mundo novo.

⁸⁶ Ítalo Calvino. **Seis propostas para o próximo milênio**. Companhia das Letras, São Paulo, 1990, págs. 83/84.

⁸⁷ H. Japiassu. **A revolução científica moderna**. Imago Ed., Rio de Janeiro, 1985, pág. 43.