

Sobre o Problema de Platão, o Movimento Retrógrado dos Planetas e os Sistemas de Mundo, Geocêntrico e Heliocêntrico

On Plato's Problem, the Retrograde Motion of the Planets and the Geocentric and Heliocentric World Systems

Maria Amanda Guimarães Santos*

Colégio São Rafael

Av. São Rafael 152, São Marcos, Salvador – BA – 41253-190

Paulo César da Rocha Poppe^{ORCID}, Vera Aparecida Fernandes Martin^{ORCID}, e Marildo Geraldête Pereira^{ORCID}

Departamento de Física – UEFS

Av. Transnordestina, s/n, Novo Horizonte, Feira de Santana – BA – 44036-900,

e

Observatório Astronômico Antares, Museu Antares de Ciência e Tecnologia – UEFS

Rua da Barra, 925, Jardim Cruzeiro, Feira de Santana – BA – 44015-430

Nelson Vani Leister^{ORCID}

Departamento de Astronomia – USP

Rua do Matão 1226, São Paulo – SP – 05508-090

(SUBMETIDO: [30/10/2024] – ACEITO: [21/11/2024] – PUBLICADO: [11/12/2024])

A descrição do movimento planetário representou um grande desafio para os astrônomos de diferentes gerações, desde os filósofos gregos da Antiguidade aos pioneiros da Cosmologia moderna. A base do problema observacional estava na percepção de um movimento retrógrado dos planetas no céu, postulado por Platão no século IV a.C., e que foi contextualizado ao longo do tempo por dois modelos rivais: a teoria geocêntrica de Ptolomeu e a heliocêntrica de Copérnico, ambos isentos de interpretações divinas ou místicas, mas fundamentados na racionalidade, em observações e aspectos geométricos e matemáticos. Embora represente um importante capítulo na História da Astronomia, salientamos a ausência do mesmo nos livros didáticos como parte da desejável formação histórico-científica dos estudantes da Educação Básica. Diante dessa constatação, apresentamos uma descrição do problema de Platão (movimento retrógrado dos planetas) alinhado com o eixo formativo 'Contextualização Social, Cultural e Histórica' da BNCC.

Palavras-chaves: Astronomia; Movimento Planetário; BNCC.

The description of planetary motion has represented a major challenge for astronomers of different generations, from ancient Greek philosophers to the pioneers of modern Cosmology. The basis of the observational problem was the perception of a retrograde motion of the planets in the sky, postulated by Plato in the 4th century BC and which was contextualized over time by two rival models: Ptolemy's geocentric theory and Copernicus' heliocentric theory, both free from divine or mystical interpretations, but based on rationality, observations and geometric and mathematical aspects. Although it represents an important chapter in the History of Astronomy, we highlight its absence in textbooks as part of the desirable historical-scientific training of Basic Education students. In view of this finding, we present a description of Plato's problem (retrograde motion of the planets) aligned with the formative axis 'Social, Cultural and Historical Contextualization' of the BNCC.

Keywords: Astronomy; Planetary Motion; BNCC.

* E-mail: maariaamanda09@gmail.com

I. INTRODUÇÃO

O ato de observar, refletir e questionar sobre os mais variados aspectos da natureza, ações primárias do intelecto humano, sempre estiveram presentes ao longo do processo evolutivo da nossa espécie. Então, de certa forma, podemos afirmar que o mais antigo ancestral humano certamente contemplou, dentro de suas próprias percepções de fascínio e medo, o majestoso céu noturno, um palco ainda desconhecido de grandiosos espetáculos com enredos de diferentes magnitudes. Esta simples ação de levantar a cabeça para o firmamento e de se contagiar com algo tão misterioso, foi devidamente registrada no DNA das gerações futuras, agora, não mais na condição de meros espectadores, mas como atrizes e atores que investigam o Universo a partir de instrumentos e de rigorosos métodos científicos.

O longo processo de organização dos antigos povos que convergiram para as consequentes sociedades estruturadas em cidades e Estados, permitiram, aproximadamente entre 4000 e 3000 a.C. na denominada Idade Neolítica (Pedra Polida), o surgimento de duas civilizações com características bem diferentes: uma na Mesopotâmia, que corresponde atualmente à região Oeste e Sudoeste do Iraque, e a outra no Egito, com todas as particularidades.

As primeiras observações babilônicas com registros de eclipses, planetas e estrelas foram realizadas e documentadas em pequenas tabuletas de argila. No caso dos egípcios [1], as observações de algumas estrelas, dentre elas Sirius (Sotis), cujo nascer helíaco (com o Sol) indicava anualmente o início das enchentes do rio Nilo, era de suma importância para a organização social daquele povo.

Embora estes e outras civilizações tenham iniciado as suas próprias observações dos fenômenos astronômicos, foram os gregos, originários da península Balcânica que, por meio dos filósofos, dentre eles Platão (c. 428-347 a.C.), iniciaram o desenvolvimento de teorias e dos conceitos iniciais sobre o movimento dos corpos celestes. A percepção estava relacionada ao movimento de determinados objetos (planetas = errantes) entre as estrelas, supostamente fixas em um imensa Esfera Celeste. Na Antiguidade, este conceito estava associado ao entendimento de que as posições relativas das estrelas entre si pareciam não variar com o passar do tempo, o que permitiu diferenciar o movimento de astros errantes (planetas) no céu.

Então, no século IV a.C., os observadores da natureza formularam e apresentaram um problema de ordem geral, pautado nas variações cíclicas observadas nos objetos celestes, onde as respostas estariam

sem qualquer intervenção divina, mas baseadas em princípios científicos.

Este particular fato, ou seja, a procura de hipóteses para os fenômenos naturais sem a presença de deuses ou de outros seres místicos, representa o principal diferencial observado entre os gregos e as outras civilizações contemporâneas. Portanto, os primeiros passos para o início da ciência moderna estava sendo dada.

II. A BNCC E OS LIVROS DIDÁTICOS

Na estruturação da BNCC [2] (Base Nacional Comum Curricular), pontuamos para a nossa análise a unidade temática “Terra e Universo”, que busca a compreensão das características da Terra, do Sol, da Lua e de outros corpos celestes em termos de suas dimensões, composições, localizações, movimentos e forças que atuam entre eles.

Esta unidade temática aborda vários aspectos da Física e da Astronomia, a exemplo dos modelos Cosmológicos da Antiguidade, de modo que é possível inserir uma importante análise de cunho histórico na sala de aula. Então, resgatando o ‘Objetivo de Aprendizagem’ e o respectivo ‘Eixo Formativo’, temos a chamada “Contextualização Social, Cultural e Histórica”, onde são tratadas as relações entre conteúdos conceituais das Ciências da Natureza e o desenvolvimento histórico da ciência e da tecnologia. Logo, podemos explorar, por exemplo, os modelos de mundo propostos para explicar o Universo a partir do ponto de vista de diferentes épocas e culturas. No entanto, olhando para a outra face da moeda, o ensino, percebemos que, na maioria das escolas, a principal referência disponível é o livro didático, um instrumento de suma importância, mas, praticamente o único recurso de apoio para o(a) professor(a), quase sempre, na ausência de laboratórios didáticos, de informática, de ferramentas e práticas inovadoras, etc.

Ao investigar os conteúdos referentes ao campo da Astronomia nos livros didáticos de Matemática e Ciências [3], identificamos que, no primeiro caso, os temas de Astronomia restringe-se a curiosidades com pequenos textos de apoio, breves relatos históricos da vida de matemáticos astrônomos, sem nenhuma sugestão de experimentos e fontes de pesquisa para aprofundamento. Temas como heliocentrismo, geocentrismo e movimento retrógrado não são apresentados.

Por outro lado, os livros de Ciências da Natureza apresentam uma divisão de conteúdos relativamente semelhantes: no 6º ano, aspectos relacionados à Geociência; no 7º e 8º anos, os Seres Vivos e o Corpo

Humano e, no 9º ano, introdução dos conteúdos de Química e Física. Embora exista uma boa concentração dos conteúdos de Astronomia no 6º e 9º ano, as abordagens ainda são limitadas e sem uma descrição mais informativa sobre o movimento retrógrado dos planetas. Portanto, uma contribuição fruto de um trabalho dissertativo.

III. COMO RECONHECER OS PLANETAS NO CÉU?

Ao olharmos para o céu, podemos perceber que, diferente das estrelas, os planetas apresentam um brilho fixo, sem cintilação. No entanto, em condições adversas, ou seja, quando a atmosfera encontra-se bastante instável, ou ainda realizando a observação próxima do horizonte, o planeta pode, naturalmente, apresentar alguma cintilação devida a alta massa de ar.

Qual a causa das estrelas apresentarem a característica cintilante e os planetas não? Ao observarmos o céu a olho nu, percebemos que a imagem das estrelas, mesmo por meio de um instrumento óptico, binóculo, luneta ou telescópio, apresentam-se como um ponto luminoso, ao passo que os planetas (muito mais próximos) apresentam um pequeno disco com diâmetro aparente perceptível.

As estrelas produzem, ao realizarem o processo de fusão nuclear, energia perceptível aos nossos olhos no comprimento de onda da luz na faixa do visível. Ao contrário, os planetas não produzem energia e apenas refletem a luz emitida pelas estrelas. No caso do Sistema Solar, refletem a luz do Sol.

Outra característica é a distância relativa destes objetos com o observador situado no planeta Terra. Os demais planetas, rochosos como a Terra, e gasosos como Júpiter, estão no Sistema Solar e as distâncias são realizadas em Unidades Astronômicas [4]. No caso das estrelas, diante das imensas distâncias, empregamos a ano-luz [5] e o parsec [6].

Os planetas, quando observados em relação às estrelas imutáveis e aos agrupamentos aparentes formados, as constelações, deslocam-se na abóboda celeste e foram considerados como “astros errantes”. O deslocamento acontece muito próximo do plano fundamental da Eclíptica [7] e varre as 12 + 1 constelações, ou seja, as zodiacais e a do Serpenteiro (Ofiúco).

IV. OS PENSADORES E A ASTRONOMIA GREGA

O pensamento científico da antiga cultura grega foi, de fato, diferenciado quando comparado com

aquele das demais civilizações da Antiguidade. Houve um abandono do caminho que conduzia ao campo das explicações místicas e sobrenaturais para o início de uma interpretação mais científica dos fenômenos da natureza. No entanto, é preciso destacar que os conhecimentos científicos inicialmente produzidos e que ora dispomos são baseados em escassas fontes históricas, alimentadas por relatos, cópias e traduções produzidas em períodos posteriores, que conduzem, inevitavelmente, a interpretações, julgamentos, erros e omissões.

No século VI a.C., as chamadas ‘cidades-Estado’ na Grécia continental já eram consideradas como prósperos centros comerciais. Os gregos viajavam e interagiam com diferentes culturas, de onde absorveram elementos da Geometria, Matemática e da Astronomia, como o Calendário, bastante desorganizado e baseado na observação da Lua [8].

O século VI a.C. também marca o início da Filosofia ocidental, estabelecida no sul da colônia grega da Jônia, antiga cidade-Estado de Mileto, Ásia Menor (Anatólia), considerada um importante centro comercial, cultural e econômico que possuía um sistema político organizado e soberano, no qual abrigou os primeiros filósofos milesianos, Tales de Mileto (c. 624–546 a.C.), Anaximandro (c. 610-546 a.C.) e Anaxímenes (c. 585–528 a.C.), ou seja, pensadores da escola de Mileto (ou também ‘Escola Jônica’) que além da descrição contemplativa da natureza (*phusis*), passaram a observar suas características mais específicas, a fazer perguntas sobre o princípio (*arché*) primeiro de todas as coisas e do Universo e, sobretudo, propor teorias científicas para explicar os mais variados fenômenos da terra e do céu. No entanto, registrados em rolos de papiro ou em frágeis tecidos, nada dos escritos originais produzidos por estes filósofos sobreviveram ao tempo, sendo destruídos em conflitos, guerras, incêndios ou pela própria deterioração natural do material. Embora alguns fragmentos encontrados e relatos posteriores forneçam algumas pistas sobre a antiga cultura grega, devemos ressaltar que desconhecemos, infelizmente, todos os detalhes e pormenores que fizeram parte da longa e profícua construção do pensamento científico grego.

IV.1. Astronomia Grega

A Astronomia, praticada atualmente ou nas antigas civilizações, representa uma ciência observacional que requer um alto grau de abstração. Os astrônomos não dispõem de linhas coloridas e diferenciadas no céu que indiquem os planos fundamentais do Equador ou da Eclíptica, ou ainda setas indicativas que assinalam as posições dos pólos ce-

lestes. Ainda, os astrônomos também necessitam de uma grande dose de perseverança durante as jornadas de observação, mantendo-se firme diante das condições climáticas negativas impostas muitas vezes pela mãe natureza.

A observação, portanto, é a atividade fundamental na Astronomia, ato este que foi sendo aprimorado ao longo do tempo. No que segue, apresentamos um recorte que descreve algumas das contribuições dadas para a ciência astronômica, de Thales de Mileto (c. 624-546 a.C.) à Cláudio Ptolomeu (100-170 d.C.) com o coroamento do Modelo Geocêntrico. Sugerimos a leitura das referências [9]-[26] para uma discussão mais completa sobre estes filósofos, da qual baseamos a nossa contribuição.

IV.1.1. Thales de Mileto

Thales de Mileto foi uma combinação de astrônomo, astrólogo, físico, geólogo e matemático, além de comerciante e político, uma rica composição de conhecimentos absorvidos dos egípcios, babilônios e das colônias gregas da Ásia Menor (Anatólia). No entanto, ressaltamos que os conhecimentos que ora citamos da filosofia de Thales são creditados aos relatos compilados pelos seus sucessores, como Platão e Aristóteles (dentre outros), muitas vezes, sem os elementos necessários para uma compreensão mais geral das ideais. Obviamente, estamos tratando de um contexto histórico que remota séculos antes da era cristã, portanto, sem as ricas bases de dados preservadas e disponíveis dos filósofos modernos, como Emanuel Kant (1724-1804) e a hipótese nebular que sustenta o modelo de formação do Sistema Solar.

Como pensador, indagava-se sobre a unidade das coisas e procurava separar a ciência da magia, do misticismo e da divindade, um pensamento baseado na interpretação natural do Universo que ora aflorava com a ciência helênica, diferente, portanto, da base mitológica empregada para explicar o Universo. Em constante reflexão, tal indagação sobre a origem de todas as coisas convergia para o surgimento de uma das primeiras Cosmogonias da Antiguidade, onde o elemento 'água' era tomado como o princípio de partida (o princípio) para a formação de todas as coisas [27]. Atribui-se a Thales a predição do eclipse solar de 585 a.C., baseado no Ciclo de Saros [28] de 18 anos, 11 dias e 8 horas (cerca de 6585,5 dias), de suma importância para prever eclipses do Sol e da Lua.

IV.1.2. Anaximandro de Mileto

As mesmas atribuições dadas a Thales podem ser aplicadas a Anaximandro: como astrônomo,

percebe o movimento da sombra provocado pela marcha diurna aparente do Sol e concebe o Gnômon (relógio solar), formado por uma simples haste vertical (um cabo de vassoura) fixada perpendicularmente no chão. Uma prática de custo zero, milenar, que pode ser realizada nas Escolas para explorar os conceitos de pontos cardeais, linha meridiana, duração do ano solar, estações do ano, etc. [29].

Como geógrafo, registrou o primeiro mapa (contornos da terra e do mar) para os mercadores de Mileto e, em sua Cosmogonia, de acordo com o historiador, biógrafo, ensaísta e filósofo grego Plutarco (c. 46-120 d.C.), concebeu uma substância primordial, *apeiron*, que significava ilimitado, infinito ou indefinido, não correspondendo a uma específica matéria do Universo físico conhecido, mas com a capacidade de produzir os quatro elementos filosóficos fundamentais, 'água', 'ar', 'fogo' e 'terra', que estariam em constante movimento e interação, mas sempre em equilíbrio cósmico. No entanto, quando ocorriam perturbações nas interações entre os contrastes cósmicos, repouso-movimento, vida-morte, quente-frio, seco-molhado, claro-escuro, etc., esta lei natural que governava o mundo e que garantia o equilíbrio entre os distintos elementos era, então, rompida, permitindo, dessa maneira, o surgimento de novas coisas, a exemplo do Sol, da Lua e das estrelas no Universo.

Em sua Cosmogonia, de acordo com as suas observações e conclusões científicas, o Sol, constituído do fogo mais puro, fornecia a luminosidade para a Lua e era tão grande quanto a Terra, representada na forma esférica onde nada a sustentava, mas que ocupava o lugar central, equidistante de todas as coisas do Universo.

Em Anaximandro, temos, portanto, uma primeira percepção geocêntrica do Universo, antecedendo uma argumentação defendida pelo filósofo Aristóteles (c. 384-322 a.C.).

IV.1.3. Anaxímenes de Mileto

Na sequência dos filósofos milesianos que iniciaram o pensamento científico e racional, segue Anaxímenes (c. 585-528 a.C.) que, tal qual aos predecessores, também admitia um princípio primordial, neste caso, o infinito, materializado por meio do conceito filosófico de 'ar', de modo que todas as coisas existentes refletem o resultado da condensação ou da rarefação do ar.

Em sua Cosmogonia, os astros no céu movem-se ao redor da Terra, que era banhada pelo 'ar', reforçando, dessa maneira, a visão geocêntrica do Universo conhecido.

IV.1.4. Pitágoras de Samos

Como matemático (mas também com fortes tendências a crer no sobrenatural, nas coisas divinas e na interferência destes na sua vida, de forma direta ou indireta), Pitágoras (c. 571-496 a.C.) iniciou na Itália, após deixar a sua terra natal, a ilha de Samos, uma escola baseada na ‘harmonia cósmica’ que envolvia uma curiosa combinação de misticismo, música, números, Geometria e Astronomia.

A Cosmogonia proposta era diferente dos mile-sianos descritos anteriormente. Para Pitágoras e os seus discípulos, não era o ‘ar’ ou a ‘água’ o princípio fundamental de todas as coisas, mas os números que, quando representados por sólidos geométricos, moldaria uma forma dodecaédrica para o Universo.

Na concepção dos pitagóricos, a Terra também era esférica, um conceito que se afirmava entre vários filósofos [24]. Entretanto, nem esta e nem o Sol figuravam no centro do Universo. Tudo girava em torno de um fogo central.

Pitágoras foi o primeiro a empregar um raciocínio sistemático e dedutivo, o que lhe permitiu demonstrar que o quadrado da hipotenusa de um triângulo é igual a soma dos quadrados dos lados que formam o ângulo reto (catetos), o *Teorema de Pitágoras*.

IV.1.5. Anaxágoras

Nasceu em Clazomênai, atual cidade de Urla (Turquia) e faleceu em Lâmpsaco (c. 499-428 a.C.). Foi discípulo de Anaxímenes e acreditava que o Universo sempre existiu, que o Sol era uma massa incandescente e maior que o Peloponeso, uma extensa península montanhosa localizada no sul da Grécia.

Ao fundar a primeira escola de Filosofia de Atenas, possibilitou não apenas expansão do pensamento filosófico, mas também o científico que, como visto nos demais filósofos, era carregada de ideias científicas modernas:

- A Galáxia é um reflexo da luz dos astros não iluminados pelo Sol;
- Os astros movem-se no céu como em uma cúpula; o pólo celeste, sempre visível, fica no vértice da Terra, em posição vertical que, mais tarde, foi inclinado;
- Os cometas são uma conjunção de planetas que emitem chamas;
- As estrelas cadentes são centelhas que vibram por causa do ar;

- Os ventos surgem quando o ar se torna rarefeito por causa do calor do Sol;
- O trovão é o resultado da colisão de nuvens, enquanto o relâmpago é o resultado da violenta fricção entre elas;
- O terremoto é o resultado da retração de ar no interior da Terra.

IV.1.6. Arquelaus de Atenas

De acordo com alguns autores, Arquelaus (século V a.C.) foi discípulo de Anaxágoras e mestre de Sócrates. Levou a filosofia natural da Jônia para Atenas e, como naturalista, afirmava que a água evaporava devido ao calor.

Em seu raciocínio, o Sol é o maior dos astros e todo o Universo é infinito.

IV.1.7. Heráclito de Éfeso

Heráclito (c. 540-480 a.C.) afirmava em sua construção filosófica que o Universo não foi criado e que sempre existiu, um aspecto que será debatido no século XX a partir das equações de Albert Einstein (1879-1955).

No estudo moderno da Cosmologia, o *Princípio Cosmológico de Copérnico* atesta que a particular posição que o planeta Terra ocupa no Universo não difere em nada de qualquer outro ponto em consideração. Este princípio é a base de sustentação para a *Teoria do Big Bang* [30; 31], no qual assegura um instante inicial de criação e um Universo homogêneo e isotrópico em qualquer lugar. O Universo foi muito mais denso e quente no passado.

IV.1.8. Platão

Platão (c. 427-347 a.C.) nasceu em Atenas, foi professor de Aristóteles de Estagira (c. 384-322 a.C.) e discípulo do ateniense Sócrates (c. 469-399 a.C.). Em torno de 385 a.C., fundou a *Academia*, uma escola de ensino e pesquisa que seria o protótipo de todas as Universidades. Discorreu sobre várias áreas do conhecimento, como Aritmética, Astronomia, Artes, Educação, Epistemologia, Ética, Geometria, Matemática, Metafísica, Política, Psicologia e Teologia. Mas, dentre os vários estudos realizados, destacamos os movimentos que, além do Sol e da Lua, cinco outros objetos celestes (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno) realizavam entre as estrelas fixas. A observação do movimento planetário foi a formulação histórica do chamado ‘Problema de Platão’.

V. O PROBLEMA DE PLATÃO

Os vários filósofos destacados anteriormente, além de tanto outros não mencionados, pavimentaram caminhos fundamentais para, não apenas o desenvolvimento da Astronomia, mas também para a estruturação das Ciências ao tratar de teorias, medidas e modelos. Por exemplo, ao analisar um determinado fenômeno, várias hipóteses podem ser inicialmente levantadas e estas devem ser necessa-

riamente discutidas e avaliadas antes da etapa que convençamos chamar de ‘formulação de teorias’. Estas, por sua vez, devem ser simples e concordar plenamente com os resultados extraídos de experimentos e observações, o que vai permitir o desenvolvimento de modelos ancorados na Matemática.

No estudo observacional dos corpos celestes, Platão ponderou, junto com outros intelectuais, sobre as variações cíclicas observadas no céu. Como explicar os movimentos celestes?

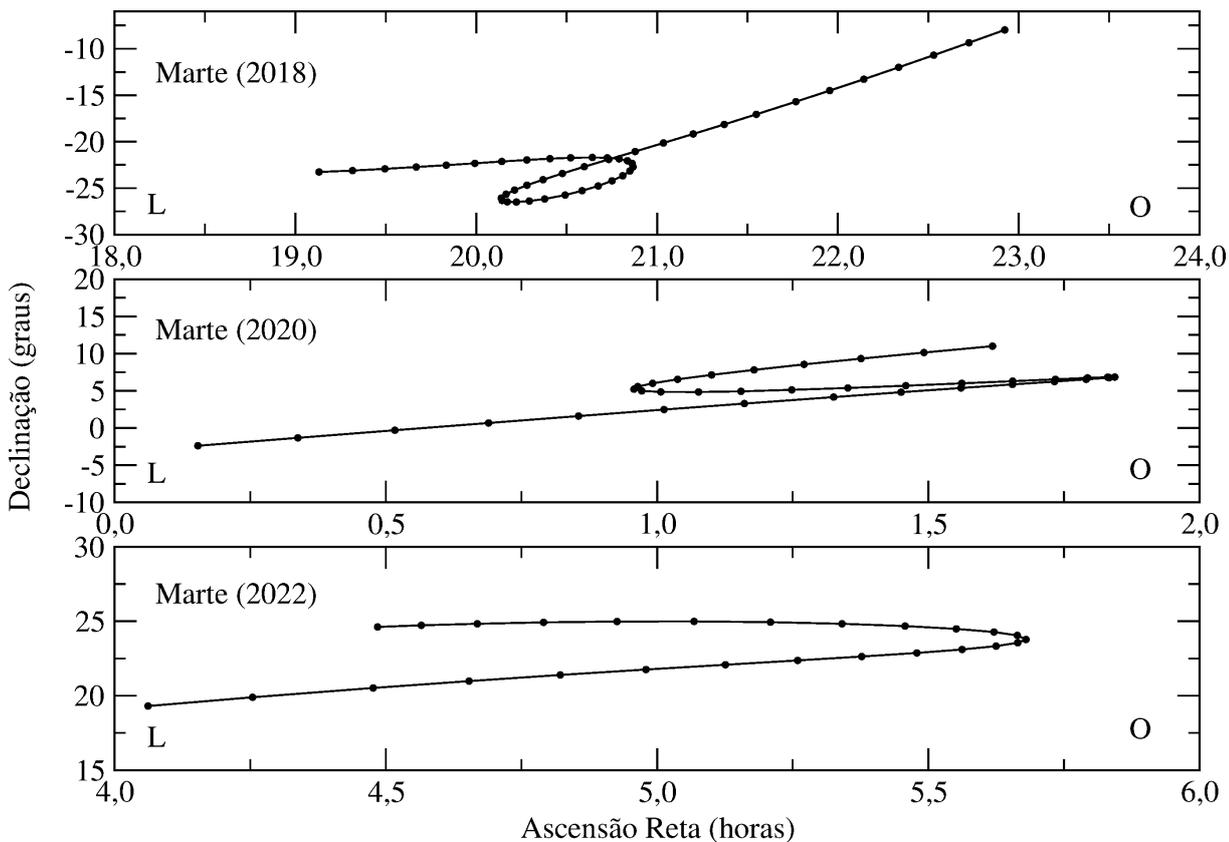


Figura 1 – Representação do movimento retrógrado de Marte em intervalos de 5 dias para os anos de 2018, 2020 e 2022. As curvas apresentam dimensões angulares diferentes, formas e duração. Não foram representadas as trajetórias anuais aparentes do Sol no plano fundamental da Eclíptica, mas situam-se próximas das trajetórias descritas acima. Fonte: *The Astronomical Almanac*.

As ideias de Platão estavam fundamentadas nos ensinamentos de Sócrates e também na concepção de coisas perfeitas, eternas e imutáveis. As estrelas, por exemplo, pertenciam a este particular reino e descreviam em torno da Terra movimentos circulares absolutos, trajetórias perfeitas com velocidades uniformes. Mas, outros corpos como os planetas (chamados ‘errantes’) descreviam entre as estrelas trajetórias relativamente complicadas, fora dos es-

perados movimentos circulares. Em geral, apresentavam movimentos progressivos entre o fundo de estrelas fixas, mas, em determinados momentos, descreviam um curioso movimento retrógrado no céu (Figura 1). Então, como explicar estes registros observacionais, ou seja, as variações angulares nas posições aparentes desses astros errantes? Quais as possíveis combinações de trajetórias circulares perfeitas os planetas de fato percorrem no céu?

Na História da Ciência, o problema ora apresentado marca, provavelmente, o primeiro confronto esperado entre teoria e observação, o qual estará presente em inúmeros contextos científicos. Neste particular caso, havia ainda um fator limitante, qual seja, o total desconhecimento das distâncias que separam os objetos errantes (planetas) da Terra, um problema que irá se arrastar por vários séculos.

Desde a formulação do problema por Platão no século IV a.C., a História da Astronomia vai mostrar que a determinação das distâncias dos objetos celestes era um problema totalmente aberto e de difícil solução. De fato, as observações a olho nu revelaram os primeiros objetos astronômicos, mas foi com o advento dos instrumentos ópticos a partir da visão revolucionária proporcionada em 1609 pela pequena luneta do astrônomo florentino Galileu Galilei (1564–1642), que o Universo foi sendo descortinado e novos objetos foram sendo, então, descobertos.

No século XVIII, por exemplo, passamos a conhecer as ‘nebulosas’, objetos difusos, enigmáticos que, de acordo com o filósofo prussiano Immanuel Kant (1724–1804), seriam sistemas estelares como a Via Láctea, ‘Universos-Ilha’ que seriam mapeados em seguida pelo astrônomo alemão William Herschel (1738-1822), o maior construtor de telescópios da época. Embora detectadas e compiladas na forma de catálogos, a localização, dentro ou fora da Via Láctea, permaneceria sem resposta, levando, em 1920, ao “Grande Debate”, um confronto direto entre os astrônomos norte-americanos Harlow Shapley (1885-1972) e Heber Doust Curtis (1872-1942) na sede da Academia de Ciências Americana (Washington). O primeiro defendia que as nebulosas faziam parte da Via Láctea. Para Curtis, ao contrário, eram sistemas externos.

Mas, diante da mesma dificuldade reportada anteriormente, ou seja, do necessário conhecimento das grandes distâncias envolvidas no problema, dos planetas ou das nebulosas recém descobertas, o debate terminaria sem um vencedor. A questão foi resolvida somente em 1923 quando o também astrônomo norte-americano Edwin Powell Hubble (1889-1953) conseguiu estimar a distância até a nebulosa de Andrômeda (M31), demonstrando que estes intrigantes objetos eram, de fato, externos à Via Láctea, como Curtis afirmava.

O intrincado movimento dos planetas agora referenciado como o ‘Problema de Platão’ foi, sem dúvida, o mais importante desafio que os astrônomos de outrora carregaram desde o século IV a.C. até o século XVII com a colossal obra de Isaac Newton (1643–1727).

Hoje, caracterizamos o contexto como um problema de ‘movimento relativo’ que comportou três distintas soluções: (i) com o centro na Terra (Geocêntrico), (ii) o centro no Sol (Heliocêntrico) e (iii) um sistema híbrido que combinava aspectos dos dois modelos anteriores.

VI. O MODELO GEOCÊNTRICO

O ato de dedicar alguns minutos para olhar e contemplar o céu a noite representa uma prática que remonta os nossos antepassados. No entanto, esta simples atividade milenar parece ter pouca importância nos dias de hoje, como podemos constatar nas atividades de extensão realizadas no planetário ou nas sessões de observação do céu com os telescópios do OAA/MACT-UEFS. Poucos são aqueles (estudantes ou público em geral) que reconhecem algum agrupamento aparente de estrelas (constelação), estrelas brilhantes ou planetas no céu.

O Cruzeiro do Sul, a constelação mais simbólica do Hemisfério Sul, representa um agrupamento aparente de estrelas que guarda a forma de uma cruz, movendo-se como se estivessem fixas e girando com a imensa abóboda celeste. Então, olhando a partir desta perspectiva, ou acompanhando o nascer e o ocaso diário do Sol e da Lua (de mais fácil percepção para qualquer pessoa), não nos parece nenhum absurdo pensar e propor a Terra imóvel e localizada no centro do Universo até então conhecido para os antigos filósofos gregos. Este foi o primeiro modelo proposto como solução ao problema apresentado por Platão, referenciado na literatura como Geocêntrico.

Então, nesta concepção que aqui identificamos como ‘intuitiva’, o modelo atesta que todas as estrelas fazem parte de uma grande esfera que envolvia a Terra posta em condição estacionária. Por conseguinte, todas as estrelas estão situadas a uma mesma distância e realizam diariamente uma volta completa, solidárias à Esfera Celeste. Em torno dos polos, todas as estrelas descrevem trajetórias circulares com velocidades uniformes, satisfazendo, dessa maneira, o pensamento de Platão.

Esta construção resolvia de forma bastante simples o movimento celeste. No entanto, para explicar o percurso diário do Sol entre as estrelas e também ao redor da Terra, o processo não era tão simples assim e necessitava de uma outra esfera distinta daquela anteriormente proposta para as estrelas. Ainda, era preciso levar em consideração as características do movimento ao longo do ano (i.e., das estações), como o período de tempo entre o nascer e o ocaso, as respectivas alturas e as oscilações

do Sol para os lados Norte e Sul.

Ao cair da noite, entravam em cena outros objetos que também descreviam movimentos mais complicados entre as estrelas: Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno. Em condições favoráveis, céu limpo e sem nuvem, Vênus também pode ser observado durante a parte clara do dia. Em relação ao Sol, este planeta não se afasta mais do que 47 graus [32; 33].

Além de compartilhar o movimento diário das estrelas, estes objetos apresentavam movimentos peculiares próprios, ou seja, descreviam movimentos progressivos na maior parte do tempo, mas também um intrigante movimento retrógrado entre as estrelas.

A solução empregada também passou pela adoção de esferas concêntricas e neste arranjo, Saturno, por descrever um movimento mais lento no céu, foi suposto de forma correta ser o mais distante, ocupando, dessa forma, a esfera mais próxima das estrelas.

As observações sistemáticas indicavam que as próximas esferas deveriam ser ocupadas por Júpiter e Marte, pois, quando comparados ao movimento anual aparente do Sol, estes astros levavam um intervalo de tempo superior a 12 meses. Então, seguindo este raciocínio, o Sol foi posto logo após a esfera de Marte e, entre este e a Terra central, as esferas de Vênus, Mercúrio e também da Lua (o objeto mais próximo da Terra) foram sendo posicionadas.

A conclusão final era óbvia: estava pronto o primeiro modelo cosmológico imaginário de natureza geocêntrica, isto é, a Terra fixa no centro das esferas concêntricas girantes (Figura 2). O passo seguinte era verificar a robustez do modelo de esferas invisíveis com as observações. Curiosamente, uma vez ajustado alguns parâmetros (dimensões das respectivas esferas, distâncias e velocidades), os resultados mostravam-se bastante promissores. Então, a partir desta hipotética construção, os gregos perceberam que as esferas representavam a solução para o problema de Platão e também para outras variações cíclicas observadas. Logo, bastava apenas a introdução de novas esferas concêntricas bem ajustadas.

No entanto, este processo seguiria um caminho arriscado e tornaria o modelo proposto distante da simplicidade postulada por Platão. De fato, um dos primeiros arranjos foi apresentado pelo filósofo, astrônomo e matemático Eudócio de Cnido (c. 408-355 a.C.), conhecido na literatura [15] como o ‘Modelo de Esferas Homocêntricas’.

O modelo atribuía uma esfera a cada planeta e estas deveriam acomodar-se umas nas outras de forma concêntrica com a Terra, supostamente no

centro comum dessas esferas. Porém, percebeu-se que uma única esfera dedicada para cada planeta, girando em sua própria velocidade, não poderia explicar os movimentos diretos e retrógrados individuais observados, assim como os movimentos do Sol e da Lua. A solução foi introduzir esferas subsidiárias de modo a reproduzir os movimentos observados, considerados todos circulares. Isso era possível, pois, neste arranjo mecânico, o eixo da esfera externa poderia estar conectado à superfície de uma esfera ainda maior. Logo, o número de esferas poderia ser ampliado de modo a representar os movimentos mais complexos observados.

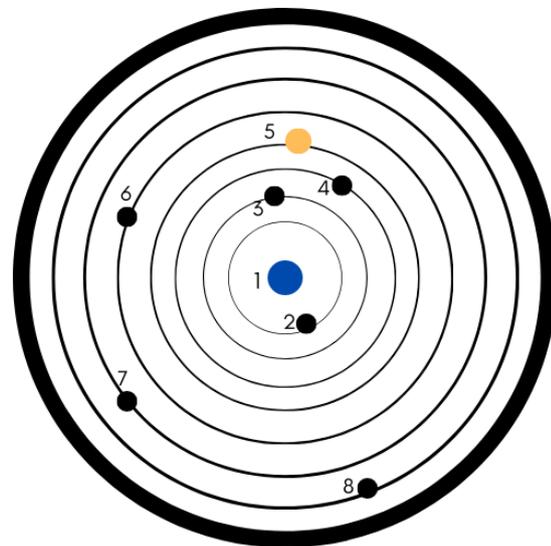


Figura 2 – Representação simbólica e fora de escala do modelo cosmológico geocêntrico. Os números indicam as respectivas posições dos objetos até então conhecidos no modelo de esferas concêntricas: 1 (Terra), 2 (Lua), 3 (Mercúrio), 4 (Vênus), 5 (Sol), 6 (Marte), 7 (Júpiter) e 8 (Saturno). A última esfera representava a posição ocupada pelas estrelas.

Uma descrição histórica complementar do modelo de Eudócio com uma reconstrução geométrica pode ser visto na referência [26].

Então, para contemplar este novo cenário, um total de 47 esferas em um complicado arranjo foi proposto [19; 20]. Infelizmente, o livro “*On Velocities*” escrito por Eudócio e que descrevia esta teoria em detalhes, foi completamente perdido. Entretanto, Aristóteles (c. 384-322 a.C.), um dos mais influentes filósofos gregos e contemporâneo de Eudócio, sabia, provavelmente, da existência do livro, pois existe um relato do conceito das Esferas Homocêntricas de Eudócio em sua obra [23].

Ao se dedicar ao problema, Aristóteles expande as ideias anteriores de Eudóxio e acrescenta 29 outras esferas concêntricas, levando a um complexo conjunto de 76 esferas para explicar o comportamento irregular observado para os cinco planetas. Ainda, em sua narrativa filosófica, Aristóteles acreditava que o Universo era finito no espaço, mas eterno no tempo.

Embora o modelo proposto esteja incorreto, como sabemos, o trabalho inicial de Eudóxio transmite uma mensagem de suma importância para todos os sucessores que se dedicariam ao estudo astronômico, ou seja, de que as observações deviam guiar os astrônomos em sua busca por modelos dos movimentos dos corpos celestes.

Na sequência da evolução das ideias, o astrônomo grego contemporâneo de Aristóteles, Heráclides Ponticus (c. 390-310 a.C.), sugeriu que seria mais simples a Terra girar em torno do seu eixo do que todo o céu carregado de astros orbitar em torno dela [21].

A conclusão de Heráclides sugere possibilidades alternativas para a Terra. Então, além da rotação diária em torno do seu eixo, o astrônomo e matemático grego Aristarco de Samos (c. 310-230 a.C.) faz a proposição de que a Terra revoluciona em torno do Sol. Mas, como veremos a seguir, tal ideia contraditória não prosperou e o modelo de Eudóxio-Aristóteles permaneceria como o pensamento cosmológico dominante.

VII. O MODELO HELIOCÊNTRICO

A estruturação hipotética de camadas concêntricas dada ao modelo Geocêntrico permitia que o mesmo explicasse os movimentos gerais dos objetos na Esfera Celeste com boa aproximação, embora, de forma crítica, determinados detalhes observacionais escapassem do controle, fato compreensível para uma teoria científica no contexto histórico ora apresentado.

De qualquer forma, pontuamos que os filósofos gregos traçaram um caminho diferente das demais civilizações. Thales de Mileto (c. 624-546 a.C.), Anaximandro (c. 610-546 a.C.) e Anaxímenes (c. 585-528 a.C.), considerados os primeiros filósofos milesianos, eram abertos a novas culturas, ideias e informações, ocidentais ou orientais, voltadas para o desenvolvimento de uma reflexão natural e racional do mundo.

Essa nova linha de pensamento científico, radicalmente diferente de uma base mística para explicar o Universo, permitiu, baseada em hipóteses distintas, o surgimento no século III a.C. de um modelo

contrário ao vigente Geocêntrico, formulado pelo astrônomo e matemático grego Aristarco de Samos.

A nova proposta apresentava uma ideia muito mais simples que removia o intrincado sistema imaginário de esferas concêntricas. Na percepção de Aristarco de Samos, o Sol estaria no centro do Universo até então conhecido. Comparativamente, bastava apenas trocar na Figura 2 as respectivas posições da Terra e do Sol, guardando a mesma configuração para os demais planetas e as estrelas. Dessa maneira, surgia o sistema Heliocêntrico, porém, ainda pautado na concepção do movimento circular dos objetos. O círculo, sendo a mais perfeita de todas as curvas, era considerado, portanto, como a uma única possibilidade para representar os movimentos dos corpos celestes.

Perceba que neste modelo a Terra era nada mais do que um planeta que orbitava o Sol e que rotacionava em torno do seu próprio eixo uma vez por dia, exatamente o que os livros didáticos descrevem. Dessa maneira, os movimentos retrógrados observados dos planetas, as trajetórias do Sol e da Lua e de outras variações anuais, eram explicados pela inclinação do eixo da Terra e pelos resultados combinados da rotação e revolução em torno do Sol.

VII.1. A Percepção de Aristarco

Os registros das contribuições de Aristarco de Samos foram perdidos ao longo do tempo, mas, felizmente, foram reportadas de alguma forma por outros importantes pensadores.

De acordo com Arquimedes de Siracusa (c. 287-212 a.C.), considerado um dos principais cientistas da antiguidade clássica, Aristarco teria escrito um livro com as ideias contrárias ao modelo Geocêntrico, ou seja, colocava a Terra em órbita, como os demais planetas, em torno do Sol.

Mas, por que a convicção heliocêntrica ora defendida teve pouca repercussão e não abalou o modelo então vigente?

Aristarco afirmava que o Sol, de maior dimensão e fonte primária de luz, deveria estar no centro do Universo, e que este astro estaria, de acordo com os seus estudos, pelo menos 18 vezes mais distante que a Lua. Como ele chegou nesta conclusão?

A distância da Terra ao Sol feita por Aristarco representa um daqueles exemplos que reforçam a necessidade de observarmos a natureza, um exercício que está ficando, infelizmente, cada vez mais distante dos estudantes.

Aristarco propôs uma forma brilhante de medir a distância da Terra ao Sol, em unidades da distância Terra-Lua, baseado-se nas fases da Lua. A

percepção dos dois astros no céu, Sol e Lua na fase quarto crescente (ou minguante), levou a construção de um triângulo retângulo Terra-Sol-Lua, com vértice de 90° na Lua (Figura 3). De acordo com Aristarco, o intervalo de tempo que a Lua leva para sair da fase nova para a de quarto crescente, uma medida do ângulo θ , forneceria uma estimativa da distância (d) Terra-Sol, que no caso seria da ordem de vinte vezes maior que a medida (D) Terra-Lua.

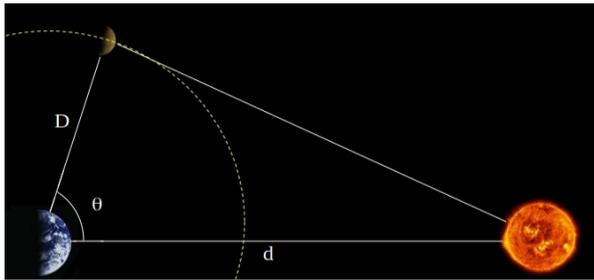


Figura 3 – Esquema ilustrativo do arranjo engenhoso proposto por Aristarco de Samos. Na fase minguante, ou seja, quando metade da Lua está iluminada, um triângulo retângulo era formado e possibilitava uma estimativa da distância (d) Terra-Sol. Ilustração fora de escala de tamanho e distância.

Embora saibamos do erro associado ao resultado prévio quando confrontado com os valores atuais conhecidos para as respectivas distâncias Terra-Lua (~ 384.400 km, média orbital centro a centro) e Terra-Sol (Unidade Astronômica, cerca de $149.597.870$ km, também um valor médio orbital), é importante destacar nesta análise a genealidade apresentada na formulação geométrica do problema, na qual registra perfeitamente a essência da pesquisa astronômica, ou seja, de ser altamente abstrata quando comparada com as atividades práticas fartamente disponíveis nos laboratórios de pesquisas e nos laboratórios didáticos de Física, Química e Biologia.

No caso particular da Astronomia, temos o Universo como o laboratório desta ciência, certamente o de mais fácil acesso e democrático, mas que não oferece de forma direta (salvo os meteoritos, com informações limitadas ao Sistema Solar) a possibilidade de manusear os seus mais variados constituintes. Logo, a enorme capacidade imaginativa, fortemente presente nos astrônomos gregos, deve ser pontuada e ressaltada neste contexto histórico.

Nesta mesma linha de percepção do intelecto humano, também podemos salientar a determinação da distância Terra à Lua feita pelo astrônomo grego Hiparco de Niceia (c. 190–120) utilizando-se de um

eclipse lunar [8]. Na verdade, a História da Astronomia revela várias outras fascinantes percepções mentais, a exemplo da descoberta da precessão dos equinócios feita por Hiparco ao resgatar as medidas da longitude eclíptica da estrela Spica (α Virgem) realizadas 144anos antes pelo filósofo e astrônomo Timocharis de Alexandria (c. 320-260 a.C.) [8].

VII.2. A Medida da Paralaxe

Os dois problemas que precisavam ser solucionados diziam respeito (i) as inclinações das trajetórias do Sol, da Lua e dos planetas ao longo do ano e (ii) os movimentos retrógrados.

No modelo de Aristarco, a Terra era mais um planeta que girava em torno do seu próprio eixo com uma periodicidade regular, uma vez por dia, e revolucionava, assim como os demais planetas, em torno do Sol em um ciclo particular de 1 ano. Estes fatos permitiam explicar as inclinações aparentes observadas e os intrigantes movimentos retrógrados realizados. Portanto, a Esfera Celeste era posta imóvel e as demais esferas condicionantes do modelo Geocêntrico de Eudóxio-Aristóteles não faziam mais sentido. Era um modelo mais simples na qual também empregava movimentos circulares uniformes. No entanto, tal modelo não prosperou e foi criticado pelos opositores a tal ideia.

A primeira crítica era óbvia: a Terra é imóvel e está localizada no centro do Universo, o lugar natural. Uma segunda crítica era baseada na suposição de que a primeira estaria correta. Ora, se a Terra movimentava-se em torno do Sol, ela também deverá apresentar o movimento peculiar retrógrado em relação as estrelas fixas. Então, como este modelo pode provar essa evidência observacional?

Esta é uma questão delicada que Aristarco não teria como responder. Na verdade, a resposta para esta pergunta e que validava o modelo somente seria encontrada depois de mais de dois mil anos pelo matemático, físico e astrônomo alemão Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846).

O que os astrônomos gregos não conheciam, pois não teriam condições de mensurar na época, era o desvio anual das estrelas fixas. Em 1838, Bessel ao longo de 4 anos e por meio de um modesto telescópio consegue medir a paralaxe [34] da estrela binária visual 61 Cygni na constelação de Cygnus (Cisne, Hemisfério Norte) obtendo um valor de $0,3136 \pm 0,0202$ segundos do grau [35], um resultado ligeiramente superior ao valor atual adotado: $0,2860 \pm 0,0289$. Mas, qual a dificuldade desta medida? A mesma abordada na Seção V: as distâncias envolvidas, o que torna a percepção do desvio extremamente di-

fácil a olho nu. Por exemplo, a estrela mais próxima do Sol, Próxima Centauri, possui paralaxe de 0,762 segundos do grau [36].

Aristarco poderia ter a compreensão das distâncias envolvidas e da dificuldade de medir o referido desvio, mas não seriam argumentações fortes que sustentassem o modelo Heliocêntrico, o qual acabou sendo diluído entre os pensadores gregos. Mas, este modelo ressurgiria 18 séculos mais tarde, em conflito com a versão Geocêntrica promulgada por Cláudio Ptolomeu (c. 100-170 d.C.).

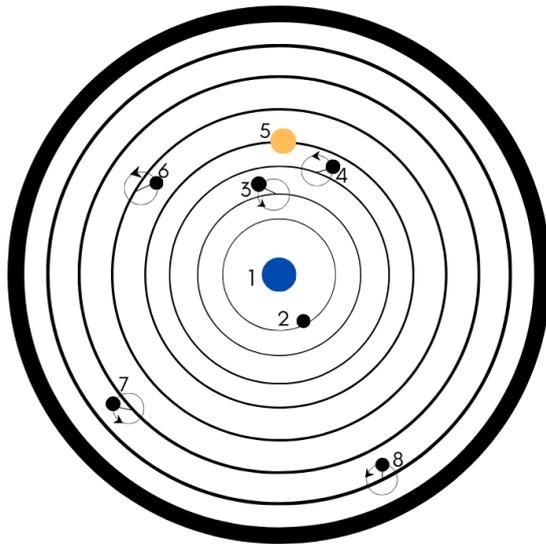


Figura 4 – Representação simbólica e fora de escala do movimento planetário na perspectiva do modelo cosmológico geocêntrico de Ptolomeu. Os números guardam as mesmas posições da Figura 2. A última esfera continua representando a posição ocupada pelas estrelas.

VIII. O SISTEMA DE PTOLOMEU

Com a saída do modelo alternativo de Aristarco de Samos, a teoria Geocêntrica continuaria a sua jornada de ajustes para melhor explicar (com mais rigor) as mais distintas observações relativas a cada objeto celeste. Mas, em uma linha de pensamento diferente das esferas concêntricas interligadas, uma outra perspectiva de solução para o problema de Platão seria apresentada pelos gregos Apolônio de Perga (c. 262-190 a.C.), matemático no campo da geometria pura, e Hiparco de Niceia (c. 190-120 a.C.), um extraordinário astrônomo que deixaria uma base bastante sólida para os seus sucessores.

As ideias assim combinadas de Apolônio e Hiparco levariam ao desenvolvimento de um sistema

na qual cada planeta mover-se-ia em um círculo cujo centro também se movimentaria sobre um outro círculo. Por volta de 150 d.C., tal contribuição seria o alicerce para o desenvolvimento da teoria geocêntrica de Claudius Ptolomeu de Alexandria (c. 100-170 d.C.) e a base até meados do século XVII para a Astronomia.

O trabalho de Ptolomeu condensado no livro *Almagest* [37] mostrava que o sistema proposto de círculos movendo-se sobre outros círculos reproduziria os movimentos observados com razoável precisão. Então, nesta nova concepção, a Figura 2 passaria a assumir a configuração para os objetos segundo a Figura 4.

Esta configuração guardava as hipóteses de Aristóteles, ou seja, da esfericidade do céu, da Terra e do movimento, além da posição privilegiada e imóvel da Terra no centro geométrico do Universo até então conhecido. No entanto, se o modelo de círculos movendo-se sobre outros círculos reproduzia os movimentos observados com razoável sucesso, como seriam as curvas que descreveriam as respectivas órbitas do Sol e as dos planetas?

VIII.1. Excêntrico, Epiclo e Equanto

As observações anuais do Sol realizadas ao longo das estações revelavam que o tempo gasto para o astro percorrer cada uma delas era notadamente diferente. Tal resultado apontava, por um lado, que um sistema simples baseado apenas em movimentos circulares e uniformes não seria mais útil, exigindo, por outro, a implementação de um conjunto apropriado de hipóteses geométricas, como aquelas discutidas por Apolônio de Perga.

A primeira dela diz respeito ao centro geométrico de todos os círculos perfeitos, o que não conflitava com o conceito geocêntrico já estabelecido. A teoria proposta por Ptolomeu era coerente com as hipóteses geocêntrica e geoestática tratadas anteriormente, além dos movimentos perfeitos dos corpos celestes, interpretados como uma superposição de movimentos circulares de vários centros, raios e velocidades.

Nesta nova proposição, a Terra ocuparia uma posição excêntrica, fora, portanto, do centro geométrico de todos os círculos, o que permitia explicar a questão apresentada para o movimento irregular anual do Sol ao longo das estações. No entanto, tal artifício não ajudava muito no caso dos movimentos retrógrados dos planetas. Neste caso, uma nova hipótese era necessária: o epiciclo. Por definição, um pequeno círculo descrito por um determinado astro em torno de um ponto imaginário que desloca-se so-

bre um círculo de maior raio em torno da Terra, o deferente. Então, como funcionaria todos os artificios juntos?

A configuração descrita anteriormente permite avaliar as velocidades em dois referenciais distintos: no epíciclo e no deferente. Então, se a velocidade de um planeta no epíciclo for superior a velocidade no deferente, este astro parecerá descrever, do ponto de vista de um observador localizado fora e acima, ciclos ao longo da trajetória no deferente. Mas, se a linha de visada do observador for tomada a partir do centro, uma visão do plano da trajetória, este movimento assumirá um aspecto retrógrado.

Na percepção do movimento visto por um observador localizado acima e fora do sistema, a proximidade do planeta no epíciclo justificaria o maior brilho observado, pois, nesta posição, o astro em questão estaria mais próximo da Terra, o que explicaria o brilho. O modelo parecia responder bem as observações até este ponto, mas as sucessivas observações em épocas distintas relevavam aspectos completamente distintos, na forma, dimensão angular e duração. Como o modelo explicaria as novas evidências?

Novamente, Ptolomeu foi levado a colocar um terceiro elemento geométrico na teoria para reproduzir as observações: o equanto, um ponto fora centro e oposto à posição condicionada inicialmente para a Terra (Figura 5).

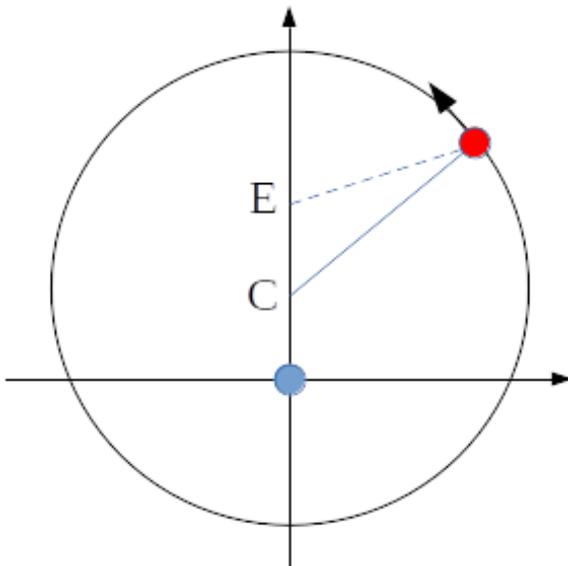


Figura 5 – Representação do Equanto (E), um ponto ao lado do centro (C) do deferente (círculo) e oposto em relação à Terra (azul). Nesta configuração, o planeta (vermelho) move-se a uma taxa uniforme em torno do ponto descentrado, o Equanto.

O modelo proposto com a correta combinação dos três artificios geométricos permitiu que Ptolomeu determinasse as posições individuais de cada planeta conhecido na época com uma precisão bastante satisfatória, passando a ser a base para o cálculo de posições dos corpos celestes nos séculos seguintes (até meados do século XVI). No entanto, o modelo ainda carecia de melhorias.

IX. COPÉRNICO: UMA NOVA PERCEPÇÃO DO UNIVERSO

O sistema planetário de Ptolomeu foi proposto em torno de 150 d.C. e se consolidava a medida que sobrepujava várias questões fundamentais e conseguia:

- (i) assegurar as hipóteses básicas de Platão, ou seja, as estrelas permaneciam eternas, divinas e imutáveis, movendo-se com velocidades uniformes em torno da Terra em trajetórias circulares perfeitas;
- (ii) manter a Terra imóvel e na região central do Universo concebido;
- (iii) concordar com as ideias dos antigos gregos no que concerne aos conceitos de ‘lugar comum’ e ‘movimento natural’;
- (iv) explicar, para as estrelas fixas, o motivo da não observação do deívio anual esperado.

No entanto, a complexidade apresentada para explicar os vários fenômenos através dos artificios geométricos continuaria a questionar a simplicidade do movimento circular uniforme postulada por Platão.

Nicolau Copérnico (1473-1543) foi um astrônomo e matemático polonês que também percebeu, séculos depois, que o sistema ptolomaico era demasiado complexo. Mas, embora seguisse as conclusões de Heráclides, de que a Terra girava sobre o seu eixo, e de Aristarco, no qual a Terra movia-se em torno do Sol, propôs, ao longo de quatro décadas de estudo, um sistema diferente, o Heliocêntrico, que seria, em primeira aproximação, tão complicado quanto ao Geocêntrico, pois também envolvia vários outros excêntricos e epíclis para justificar os movimentos. Em essência, a obra produzida, *De Revolutionibus*, era, em relação ao *Almagest*, um texto igualmente geométrico e de difícil leitura [38].

Ao retirar a Terra do centro do Universo, a obra de Copérnico era, de fato, diferente. Todas as esferas deveriam revolucionar em torno do Sol, destacando neste a posição central e estacionária, de tal modo que a distância Terra-Sol, quando comparada com a distância às estrelas, era muito pequena.

O céu, assim como os demais corpos conhecidos, realizam movimentos aparentes em torno da Terra, que realiza uma rotação completa diária em torno do seus pólos e uma revolução anual em torno do Sol. Portanto, o movimento retrógrado observado dos planetas não é uma característica própria peculiar, mas ocasionada pelo movimento da Terra em torno do Sol. Do exposto, a Figura 6 ilustra o novo arranjo para o sistema de Copérnico.

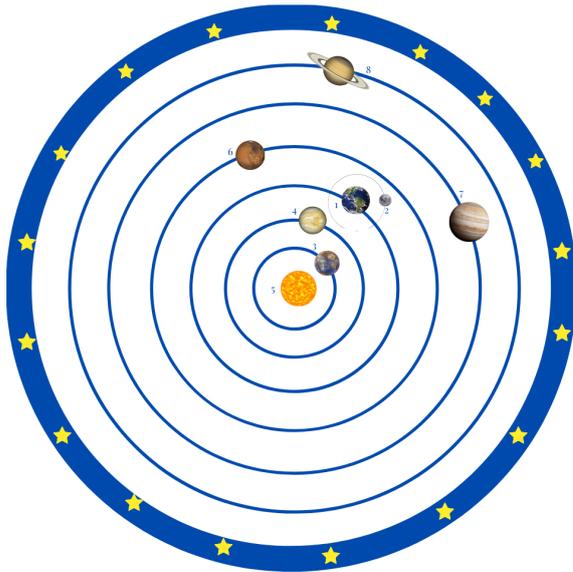


Figura 6 – Representação simbólica e fora de escala do movimento planetário na perspectiva do novo modelo cosmológico Heliocêntrico de Copérnico. Os números guardam as mesmas posições da Figura 2. Observe, portanto, a permuta feita nas posições 1 (Terra) e 5 (Sol). A última esfera continua representando a posição ocupada pelas estrelas.

Apesar das conclusões apontarem para um quadro mais representativo do Universo, a concepção geocêntrica ainda era forte no tempo de Copérnico (séculos XV e XVI), sobretudo, ancorada na convicção humana íntima de que a Terra ocupava de forma majestosa o centro das coisas. Afinal, se a Terra se move, qual é a real causa? Por que não sentimos o movimento? Por que as coisas tendem a voltar para a Terra, se ela não ocupa o centro do Universo?

Copérnico, prevendo provavelmente críticas ao seu trabalho, foi levado a retardar a publicação do *De Revolutionibus*, de modo que viu seu primeiro exemplar no dia de sua morte. De fato, a obra foi rotulada como falsa e oposta as ‘Sagradas Escrituras’. O monge germano-agostiniano, Martinho Lutero (1483-1546), professor de teologia que tornaria uma das figuras centrais da Reforma Protes-

tante, chamou Copérnico de louco e herético. Mas, apesar do ritmo ondulatório (vai e volta), a ciência avança e as discussões sobre os dois sistemas de mundo e de que a Terra poderia, de fato, mover-se, começaria lentamente a sua longa jornada histórica final de aceitação, com as contribuições fundamentais de Johannes Kepler (1571-1630), Galileu Galilei (1564-1642) e Isaac Newton (1643-1727).

IX.1. O Sucesso do Heliocentrismo

O sucesso da teoria Heliocêntrica pode ser avaliada em dois resultados que não poderiam ser obtidos com o modelo Geocêntrico. O primeiro, por conta da própria definição do sistema, permitia calcular o tempo que cada planeta levava para completar uma volta em torno do Sol. O segundo, as próprias dimensões das órbitas em função da órbita da Terra. Esses dois resultados permitiam, pela primeira vez na História da Astronomia, estimar a dimensão do Universo até então conhecido.

Observações acumuladas durante vários séculos permitiram Copérnico calcular os períodos orbitais [39] para os planetas ora conhecidos com excelente precisão, Tabela I, quando comparados com os valores adotados pela União Astronômica Internacional (sigle em inglês; IAU – *International Astronomical Union*). A mesma análise para os raios das órbitas, Tabela II.

Tabela I – Valores obtidos por Copérnico (Teoria) para os períodos orbitais dos planetas comparados com aqueles adotados atualmente pela IAU.

Planeta	Teoria	IAU	Escala
Mercúrio	88	87,97	dias
Vênus	224	224,70	dias
Marte	687	686,98	dias
Júpiter	11,8	11,86	anos
Saturno	29,5	29,46	anos

Tabela II – Valores obtidos por Copérnico (Teoria) para os raios das órbitas dos planetas (em Unidades Astronômicas - UA) comparados com aqueles adotados atualmente pela IAU.

Planeta	Teoria	IAU
Mercúrio	0,38	0,39
Vênus	0,72	0,72
Marte	1,00	1,00
Júpiter	1,52	1,52
Saturno	9,20	9,54

X. O SISTEMA DE TYCHO BRAHE

Tycho Brahe (1546-1601), um exímio observador dinamarquês, não havia aceitado, apesar da simplicidade, o sistema Heliocêntrico de Copérnico. Para tal, propôs um sistema alternativo, no qual apenas o Sol e a Lua giravam em torno da Terra, e todos os planetas giravam em torno do Sol (Figura 7).

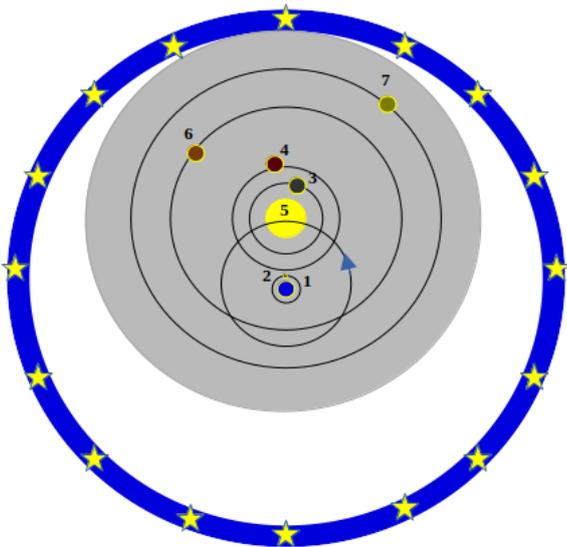


Figura 7 – Representação simbólica e fora de escala do sistema Geocêntrico proposto por Tycho Brahe. De um lado, o modelo preservava a proposta geocêntrica grega (Aristóteles), o que lhe permitia explicar o motivo pelo qual os objetos caem de volta para a Terra. Por outro, carregava as vantagens da simplicidade para explicar os movimentos retrógrados no modelo Heliocêntrico. Os números guardam as mesmas posições da Figura 2. A última esfera continua representando a posição ocupada pelas estrelas.

Para avaliar os modelos até então propostos, Tycho Brahe resolveu construir um mapa muito preciso das estrelas fixas e determinar as posições aparentes dos planetas durante um considerável intervalo de tempo. As observações foram realizadas a partir de 1576 no observatório situado na ilha báltica de Hven, construído pelo Rei Frederico da Dinamarca e com os devidos fundos para a sua manutenção. Esse fato, provavelmente, representa um dos primeiros financiamentos para a ciência registrado no campo da Astronomia.

Tycho completou o catálogo em 1598 [40], incluindo as posições e magnitudes de 1004 estrelas fixas. Uma versão mais curta com 777 estrelas foi editada e impressa em 1602. Mais tarde, Johannes Kepler editou o catálogo completo com as 1004

estrelas, o qual foi impresso em 1627 [40].

Muito distante da luneta que iria revolucionar a Astronomia a partir das observações de Galileu Galilei, o instrumento empregado por Tycho era, basicamente, um par de varetas articuladas, onde uma delas apontava para uma estrela fixa, enquanto a outra era direcionada para um determinado planeta. Como resultado, a medida fornecia a separação angular entre a estrela e o planeta investigado.

Para continuar o seu grandioso projeto observacional, novos instrumentos de medição como quadrantes, sextantes e compassos deveriam ser construídos (Figura 8), o que lhe permitiria catalogar as posições de um milhar de estrelas com uma precisão fantástica. Como abordado na referência [40], as magnitudes obtidas estão muito bem correlacionadas com os valores modernos, apresentando distribuições de erro com dispersões da ordem de 2 minutos do grau. No caso das posições angulares dos planetas, os erros não ultrapassariam 1/60 do grau em um intervalo de 20 anos.

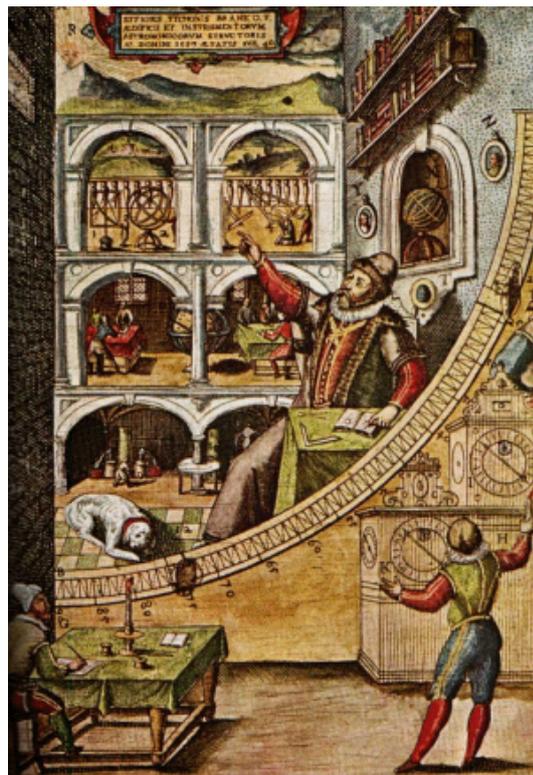


Figura 8 – Ilustração do 'Quadrante Mural' empregado por Tycho Brahe, formado por uma liga metálica em arco com raio da ordem de 2,0 m. Apoiado em uma estrutura sólida e estável, o instrumento era equipado com marcações angulares e visores móveis que permitiram observar as estrelas com suficiente precisão. Imagem de Domínio Público.

Tycho Brahe, ao analisar as observações, não verificaria qualquer evidência da paralaxe estelar ou qualquer outro movimento anual que indicasse que a Terra se deslocasse ao redor do Sol. No entanto, chegaria facilmente à conclusão de que as suas posições planetárias eram muito mais precisas do que aquelas obtidas por Copérnico. Para isso, determinou e corrigiu a refração cada observação realizada.

Além das estrelas e planetas, Tycho também observaria em 1577 um cometa, provando, contrariamente as argumentações dos geocentristas que defendiam a natureza terrestre, que o mesmo encontrava-se muito além da órbita da Lua, desconstruindo a concepção de um Universo celeste imutável. No fim de sua vida, ao entregar para Johannes Kepler todos os dados observacionais, permitiu que a teoria fosse confrontada com as observações em prol de um sistema mais representativo para a descrição do Sistema Solar.

XI. A COMPREENSÃO DO MOVIMENTO PLANETÁRIO

O correto entendimento do movimento irregular e retrógrado dos planetas era a chave para a definitiva solução do problema que se arrastava desde a época de Platão, atravessando uma sucessão de astrônomos e desaguando na Revolução Científica (iniciada no século XVI e prolongada até o século XVIII) com o matemático alemão e defensor do Sistema Heliocêntrico de Copérnico, Johannes Kepler (1571-1630).

Kepler, ao contrário de Tycho Brahe, não era um exímio experimentador (no sentido da observação astronômica), mas reunia os elementos necessários da Astronomia, Geometria e Matemática para investigar a natureza a partir de um outro ângulo, atributo este que era de ‘pouco interesse’ para Tycho Brahe. No entanto, Kepler ainda guardava uma forte visão de uma ordem e perfeição da natureza.

Embora imerso em uma Revolução Científica iniciada na era Renascentista, onde os conhecimentos eram considerados corretos depois de confirmados pela experiência e razão, ou seja, por meio de um método experimental ou científico, Kepler acreditava que padrões de ordem geométrica e de relações numéricas constituíam as chaves do “espírito de Deus”.

As suas primeiras perguntas, nada fáceis de serem respondidas, envolviam os espaçamentos das órbitas planetárias calculadas então por Copérnico e presentes no *De Revolutionibus* de 1543. Em síntese, perguntava-se: Por que haviam, precisamente, apenas seis planetas no Sistema Solar? Por que ra-

zão estariam dispostos naqueles padrões de espaçamentos orbitais? A resposta, a princípio, estaria na Geometria e Kepler buscava relacionar os seis planetas com os cinco sólidos regulares gregos então conhecidos, ou seja, os poliedros cujas faces possuem lados e ângulos iguais (Figura 9).

A sequência natural de seus estudos levaria Kepler à proposição em 1597 de um primeiro modelo baseado no Heliocentrismo de Copérnico, *Mysterium Cosmographicum* (Mistério Cosmográfico), no qual envolveria o uso dos cinco sólidos regulares e o conceito inicial das esferas concêntricas [41], como ilustrado na Figura 10. O modelo previa seis esferas planetárias que deveriam harmonizar com os cinco sólidos perfeitos. Dessa forma, Kepler buscava uma unidade entre Matemática, Geometria e as observações astronômicas, que de fato fora obtida com bastante sucesso [42], entretanto, de forma puramente acidental.

De acordo com o modelo proposto, tal como descrito na Figura 10, uma primeira esfera de raio igual ao da órbita do último planeta conhecido, Saturno, circunscrevia o cubo. Em seguida, uma segunda esfera inscrita nesse cubo assumiria o raio da órbita do segundo planeta mais externo, Júpiter, com um tetraedro inscrito. Uma esfera inscrita no tetraedro assinava o raio da órbita de Marte. A respectiva esfera relativa à Marte tem um dodecaedro inscrito. Uma esfera inscrita neste planeta daria a órbita da Terra. Para as órbitas dos planetas mais internos, Vênus e Mercúrio, temos os sólidos icosaedro e o octaedro. De fato, trata-se de uma construção mental incrível, com a qual buscava explicar, como passamos a fazer, dados experimentais/observacionais em termos de leis matemáticas simples. No entanto, com o avançar do conhecimento científico, também passamos a compreender que apenas correlações entre tais dados não garantem uma sólida justificativa para explicar fenômenos diversos na natureza.

O fato dos raios concordarem bem com os valores então conhecidos das órbitas planetárias, na tentativa de entender o motivo de haver precisamente seis planetas no Sistema Solar, não estabelece nenhuma relação entre os cinco sólidos perfeitos e as órbitas dos planetas, como sabemos hoje em dia com as descobertas posteriores de Urano (1781), Netuno (1846) e Plutão (1930), este último sendo um planeta anão de acordo com a Resolução da IAU (International Astronomical Union) estabelecida em 24 de Agosto de 2006 sobre a definição de planeta para os corpos do Sistema Solar.

Hoje em dia, tal descoberta apresenta apenas um valor histórico para a Ciência, mas a conexão então estabelecida lhe projetaria aos olhos dos astrônomos

Tycho Brahe e Galileu Galilei, levando-o, posteriormente, ao sucesso definitivo de suas investigações de mais de dez anos sobre o movimento dos planetas e, em particular, do movimento aparente de Marte.

XI.1. Astronomia Nova

O modelo de Kepler, embora engenhoso, não conseguia combinar de forma perfeita os sólidos pitagóricos com as esferas (órbitas planetárias) de modo a reproduzirem as verdadeiras distâncias dos seis planetas conhecidos. Em seus pensamentos, questionava se o problema estaria nas observações imprecisas para ratificar o modelo teórico proposto.

Em 1594, Kepler foi nomeado professor de Matemática no seminário protestante em Graz, província austríaca da Estíria [43]. Foi também matemático distrital e responsável por elaborar os Calendários. Mas, em 1598, quando todos os protestantes foram forçados a se converter ao catolicismo ou deixar a província como exilados, como parte das medidas da Contrarreforma (ou Reforma Católica, movimento criado pela Igreja Católica a partir de 1545), Kepler foi forçado a sair e, por causa de seu talento como matemático, foi convidado por Tycho Brahe ao seu observatório astronômico, Uranienborg, situado na

ilha de Hven, em Oresund, entre a Dinamarca e a Suécia. Para Kepler, uma oportunidade de ouro para avançar os seus estudos, pois, ao se tornar seu assistente, teria acesso as observações e passaria a calcular novas órbitas planetárias a partir de dados mais precisos.

Embora tivesse as melhores observações, Tycho Brahe não foi capaz de transformar as mesmas em uma teoria do Sistema Solar coerente, como visto na Seção X. Portanto, enquanto observador, precisava das habilidades teóricas de Kepler, um típico exemplo que ilustra na História da Ciência o indissociável casamento entre teoria e prática quando visto aos olhos da ciência moderna.

Ao mudar-se para Praga em 1600, trabalhou como assistente de Tycho Brahe até a morte deste último em 1601. Então, ao ser nomeado sucessor de Tycho como matemático imperial, ocupou o cargo e realizou as devidas funções até 1612, época da morte do imperador Rodolfo II, do Sacro Império Romano-Germânico.

De posse dos dados observacionais, Kepler iniciou sua investigação com o planeta Marte, tentando ajustar as observações apenas ao excêntrico e ao equanto do planeta. Uma vez baseado no modelo

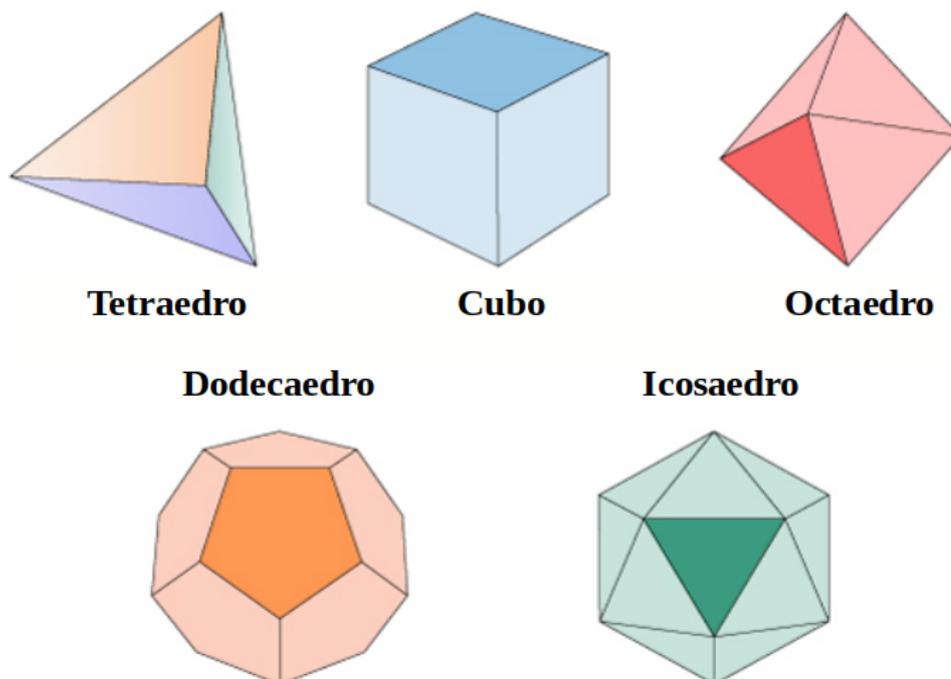


Figura 9 – Representação dos sólidos perfeitos que preenchem os intervalos entre as órbitas planetárias. Com faces, aqueles que são triângulos equiláteros: Tetraedro (4), Octaedro (8) e Icosaedro (20). O Cubo apresenta 6 faces quadradas e o Dodecaedro 12 faces pentagonais.

Heliocêntrico, não necessitava mais dos epiciclos nas análises.

Ao longo da primeira década do Séc. XVII, os estudos intermináveis e as conclusões por vezes animadoras, levariam Kepler a pensar em outras questões cruciais. Haveria alguma causa física, fora do contexto astronômico, associada ao movimento dos planetas no céu?

A pergunta feita acima tem a sua origem na Física Aristotélica, onde era impossível a existência de um movimento em que não houvesse a atuação contínua de uma força [44]. De acordo com Aristóteles, os movimentos no Universo são classificados em dois grupos: os ‘naturais’, ou seja, quando o corpo busca o seu lugar natural, hipótese esta empregada para explicar a queda dos corpos, por exemplo, e os ‘violentos’, quando os corpos são afastados de seu local de repouso mediante a aplicação de uma força. Portanto, Kepler acreditava na existência de uma força para mover os planetas ao longo de seus círculos perfeitos, e não apenas para manter os mesmos nestas órbitas.

Em Praga, Kepler publicou vários livros importantes. Em 1604 escreveu *Astronomia pars Optica* (A Parte Óptica da Astronomia), onde abordou o fenômeno da refração atmosférica, tratou das propriedades das lentes e deu a explicação moderna para o funcionamento do olho humano. Dois anos depois, publicaria o livro *De Stella Nova* (Sobre a Nova Estrela). Em 1609, publica a obra *Astronomia Nova* (Nova Astronomia), no qual apresentava os resultados sobre o planeta Marte. Mas, na verdade, Kepler passou vários anos tentando ajustar as vastas observações de Tycho Brahe no modelo pautado em uma órbita circular com um específico Excêntrico e Equanto. Então, que tipo de trajetória o planeta Marte realizou ao longo das duas décadas de observações?

Das inúmeras tentativas realizadas para obter possíveis órbitas que responderiam o problema, Kepler iniciou com um sistema de círculos que se moviam sobre outros círculos dentro de uma perspectiva Copernicana, ou seja, com as observações feitas da Terra em relação a um Sol em repouso central no qual o próprio planeta Marte também percorria uma órbita em relação às estrelas fixas.

Então, ao se aproximar de um possível sucesso usando órbitas do tipo ‘círculo excêntrico’, percebeu, por um lado, que um conjunto de observações ajustavam-se razoavelmente bem com uma precisão da ordem 2 minutos de arco; mas, por outro, haviam algumas poucas observações que apontavam desvios da ordem de 8 minutos de arco nas latitudes e longitudes ao longo do plano da Eclíptica.

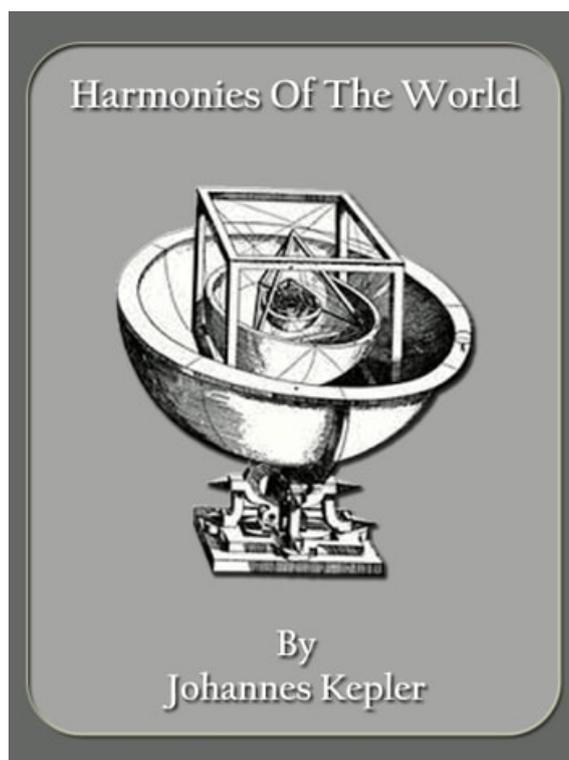


Figura 10 – Modelo idealizado por Kepler para explicar as distâncias relativas dos planetas a partir do sistema Heliocêntrico de Copérnico. As esferas eram suficientemente espessas para incluir o epiciclo proposto por Copérnico. Capa do e-book [41].

O quanto representariam essas diferenças angulares para a validação do modelo?

Sabemos que em 1 grau angular existem 60 minutos do grau. Do horizonte ao zênite do observador existem 90 graus. Comparando com a Lua na fase Cheia, cujo diâmetro aparente vale cerca de 0,5 grau (~ 30 minutos de arco), teríamos da ordem de um quarto do seu valor para os desvios de 8 minutos de arco. Embora representem valores ‘relativamente pequenos’ e, talvez, associados à erros observacionais (que poderiam ser minorados com o auxílio de uma luneta, mas, como sabemos, tal instrumento óptico fora introduzido apenas em 1609 na Astronomia por Galileu Galilei), Kepler não desprezou tais dados, pois conhecia o rigor observacional empregado por Tycho Brahe.

Kepler, então, realizaria uma descoberta crucial, não percebida pelos seus antecessores, Ptolomeu e Copérnico. As órbitas da Terra, assim como aquelas dos demais planetas, situavam-se em planos que passavam pelo Sol. Então, diferente das justificativas anteriores apresentadas para explicar o bailar dos planetas ao longo da Eclíptica (movimentos para o Norte e o Sul em latitude, e de Leste-Oeste

em longitude), Kepler descobriu que estes eram conseqüências diretas das inclinações orbitais dos planetas em relação à órbita da Terra.

A soma de várias conclusões e, sobretudo, o abandono da órbita circular e da condição de movimento uniforme como heranças do pensamento grego, permitiram Kepler estabelecer, inicialmente, duas leis para a descrição do movimento planetário.

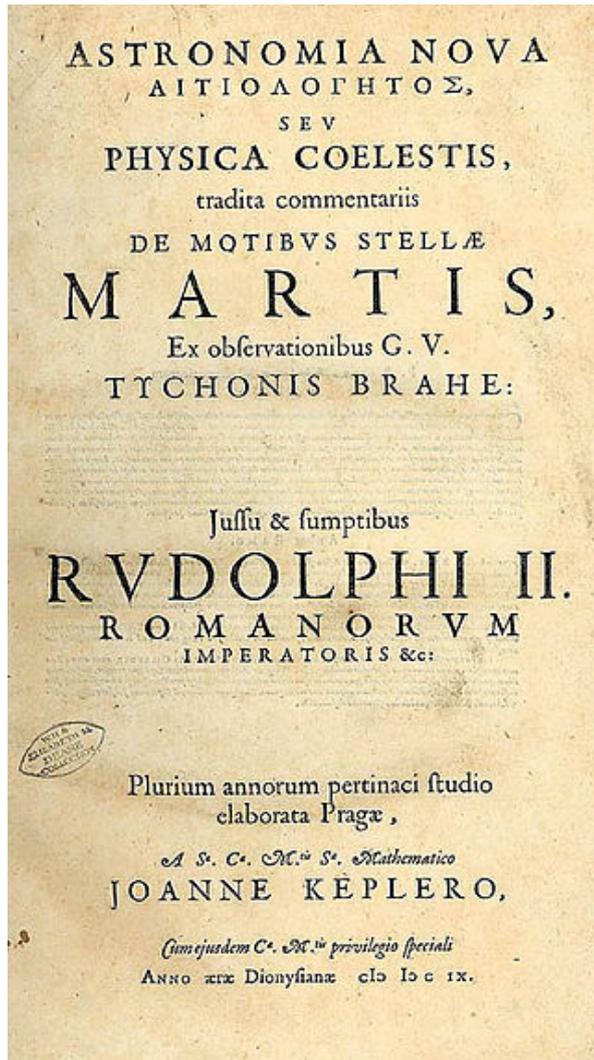


Figura 11 – Capa do livro ‘Astronomia Nova. De Motibus Stellae Martis’, de Johannes Kepler, publicado em 1609. Imagem de Domínio Público.

XI.2. 1609: As Duas Leis de Kepler

Ao abandonar a antiga crença pautada no movimento uniforme, Kepler passou a considerar possíveis variações na velocidade do planeta Marte quando ele se movia em torno do Sol, ancorada na

percepção de que era necessário uma força para deslocar o planeta em suas órbitas.

No estágio de imersão que o mesmo se encontrava, Kepler verificou que em certos pontos da órbita, Marte parecia viajar mais depressa do que em outros. Esse resultado lhe dizia que o Sol regulava a velocidade orbital do planeta. Assim, quando Marte estivesse mais próximo do Sol, ou seja, no periélio, a velocidade era maior. Por outro lado, na maior distância do Sol, afélio, a velocidade era mínima. Então, ao representar uma linha imaginária ligando o Sol ao planeta, concluiu que estando o referencial fixo no Sol, a reta que une o planeta ao Sol varre áreas iguais em tempos iguais.

Após a descoberta desta propriedade, a qual se tornaria uma lei, Kepler abandonou totalmente suas tentativas de construir os movimentos planetários a partir de combinações de movimentos circulares uniformes e começou a projetar outras possibilidades de órbitas. Ao findar de uma busca incessante por uma curva que ajustasse os dados observacionais, verificou que cada planeta descrevia movimentos em uma órbita muito simples, do tipo elíptica, estando o Sol em um dos focos. Esta foi, certamente, a descoberta mais importante para Kepler, pois mostrava que ele havia finalmente encontrado, depois de quase 2000 mil anos, uma curva que descrevia o movimento dos planetas, colocando em acordo, assim, um modelo matemático com as observações de Tycho Brahe.

Então, considerando um referencial fixo no Sol, Kepler mostra que o movimento dos planetas segue duas primeiras leis fundamentais, publicadas em 1609 no *Astronomia Nova – De Motibus Stellae Martis* (Figura 11):

- 1^a Lei – **Órbitas Elípticas:** Em um referencial fixo no Sol, as órbitas dos planetas são elipses e o Sol ocupa um dos focos.
- 2^a Lei – **Áreas:** Em um referencial fixo no Sol, a reta que une o planeta ao Sol varre áreas iguais em tempos iguais.

É importante ressaltar que as duas Leis de Kepler não se aplicam apenas para um planeta ao redor do Sol, mas para qualquer corpo que descreve uma órbita ao redor de um outro corpo, com a devida descrição do referencial e da interação fundamental associada, do tipo gravitacional.

As excentricidades calculadas para cada planeta revelam valores muito pequenos, indicando que as órbitas são quase circulares, de acordo com a Tabela III. Nesta, notamos que a órbita mais achatada é a do planeta Mercúrio. As órbitas da Terra, de Vênus e de Netuno são muito próximas de circunferências.

Podemos dizer o mesmo das órbitas de Júpiter, Saturno e Urano. Ainda, como as excentricidades são pequenas, implicando órbitas aproximadamente circulares, também podemos concluir que a variação relativa do módulo da velocidade linear dos planetas é igualmente pequena.

Tabela III – Valores para as excentricidades das órbitas dos oito planetas do Sistema Solar. Lembrando que os planetas Urano e Netuno foram descobertos apenas nos Séculos XVIII e XIX.

Planeta	Excentricidade
Mercúrio	0,206
Vênus	0,007
Terra	0,017
Marte	0,093
Júpiter	0,048
Saturno	0,056
Urano	0,046
Netuno	0,009

XI.3. 1619: *Harmonices Mundi*

Em 1610, Kepler tomou conhecimento das descobertas que o italiano Galileu Galileu havia feito no ano anterior (publicação do livro *Astronomia Nova*) com um recém construído instrumento com lentes devidamente polidas, que passamos a chamar de luneta, cuja principal propriedade era a de aumentar os objetos situados a grandes distâncias, portanto, de grande interesse para a Astronomia.

O livro que reunia toda a obra revolucionária até então realizada por Galileu Galileu era *Sidereus Nuncius*, ‘O Mensageiro das Estrelas’. Para a História da Ciência, esta contribuição representa um dos textos mais importantes e com profundo impacto no mundo científico europeu do Século XVII [45].

A obra incluía todas as descobertas observacionais realizadas por Galileu Galilei e foi de tamanha revelação para Kepler que o mesmo escreveu um opúsculo, um livreto científico de algumas poucas páginas denominado *Dissertatio cum Nuncio Sidereo*, ‘Conversação com o Mensageiro Sideral’.

Percebendo o valor científico agregado ao pequeno instrumento óptico, Kepler toma uma iniciativa e aprofunda os seus estudos teóricos e experimentais, o que lhe permite em 1611 publicar o livro *Dioptrice*, ‘Dióptrica’, no qual estabelece as bases teóricas a respeito das lentes, de como produzir uma luneta galileana e também da fabricação de um instrumento mais aprimorado. Então, alicerçado de tais informações, observa os satélites de

Júpiter e publica os resultados sob o título *Narratio de Observatis Quatuor Jovis Satellitibus*, ‘Uma Narrativa dos Quatro Satélites Observados de Júpiter’, de suma importância para Galileu, pois as suas descobertas iniciais foram postas em dúvida ou negadas por muitos.

Tabela IV – 3ª Lei de Kepler: Harmônica.

Planeta	T (anos)	R_{med} (UA)	K
Mercúrio	0,387	0,241	1,002
Vênus	0,723	0,615	1,001
Terra	1,000	1,000	1,000
Marte	1,524	0,881	1,000
Júpiter	5,203	11,860	0,999
Saturno	9,539	29,460	1,000
Urano	19,190	84,010	0,999
Netuno	30,060	164,800	1,000

Para Kepler, todos os resultados pré e pós-Galileu mostravam que ainda faltava estabelecer uma conexão entre os movimentos dos diferentes planetas investigados, ou seja, uma relação entre as órbitas elípticas e as respectivas velocidades associadas. Após muitas tentativas, obteve finalmente, 10 anos depois, uma relação precisa entre o tamanho da órbita de um planeta e o seu período, ou seja, o tempo de uma revolução em torno do Sol. Então, em 1619, estabeleceu que para todos os planetas, a razão entre o cubo do raio médio da órbita e quadrado do período é a mesma, configurando a última das três leis de Kepler, enunciada na forma:

3ª Lei – Harmônica: Em um referencial fixo no Sol, o quadrado do período de revolução de um planeta (T^2) ao redor do Sol é proporcional ao cubo do semi-eixo maior médio da elipse (R_{med}^3) que representa a órbita do planeta.

A razão K, uma constante,

$$K = \frac{R_{med}^3}{T^2}, \quad (1)$$

é a mesma para todos os planetas, como pode ser notado da Tabela IV. Esta relação também se aplica aos cometas que revolucionam em torno do Sol.

As três leis de Kepler assim enunciadas permitem determinar todas as posições passadas e futuras de cada planeta e de cada cometa. Nenhum dos modelos propostos anteriormente centrados na Terra jamais teriam dado origem as Leis de Kepler,

o que demonstra a robustez da descoberta científica realizada e ancorada na teoria heliocêntrica de Copérnico.

XII. CONCLUSÕES

A descrição feita nesta contribuição aponta que o eixo da História do Mundo passou necessariamente pelo revolucionário processo vivenciado na Grécia antiga. Os gregos, no século VI a.C., já estavam desenvolvendo, por meio das artes dramáticas, isto é, a partir de elaborados textos que representavam ‘ações’, a ideia básica de um governo de necessidade ao invés de um governo do simples acaso, de plantão apenas para as coisas que surgiam ou aconteciam sem motivo ou explicação aparente.

A estratégia de levar ideias bem elaboradas para os palcos e de interagir, provocar a reflexão e o debate, passaria a ser a ação necessária que permitiria construir a estrutura básica da Democracia, ou seja, de um regime político em que todos os cidadãos no gozo dos direitos políticos participam igualmente.

A liberdade para pensar e refletir de forma racional como as coisas funcionam, sem pensar primeiro em aspectos místicos ou sobrenaturais, permitiram que os gregos dessem uma contribuição extraordinária ao conhecimento científico, em particular, no campo da Astronomia. Os primeiros astrônomos gregos mapeavam o céu e faziam observações rudimentares. Contavam os dias entre as fases da Lua Cheia e os dias do ano. Desse modo, iniciou o ambicioso programa de pesquisa científica: a tentativa de compreender o Universo, sendo, um desses projetos, o problema apresentado por Platão sobre o movimento dos corpos celestes.

Mecanismos foram propostos na perspectiva de reproduzir o que estava sendo observado, ou seja, de construir modelos teóricos, falhos ou não, mas foi um acertado caminho que seguimos até então. Passando por Eudócio, Aristóteles, Aristarco, Apolônio, Hiparcos e Ptolomeu, neste último a arquitetura final baseada no Geocentrismo, a ruptura com o passado foi concretizada séculos depois com o astrônomo polonês Nicolau Copérnico, resgatando o pensamento original feito por Aristarco de Samos de ser o Sol o centro do Universo até então conhecido.

Com as observações de Tycho Brahe, a habilidade matemática de Johannes Kepler, a revolução proporcionada por Galileu Galilei e a estrutura apresentada por Isaac Newton, o Sistema Solar começaria a adquirir a sua forma moderna e o entendimento do Universo passaria para um outro estágio. Agora, com o intrigante problema apresentado por Platão finalmente resolvido, seria possível exami-

nar e depois explorar em detalhes os seus fascinantes componentes, ou seja, os vizinhos mais próximos do Sistema Solar.

A Astronomia apresenta-se, então, como uma ciência revolucionária capaz de fornecer, com os avanços da Matemática, Geometria, Física e Química, respostas gradativas para várias aspectos já pensados no passado pelos mesmos filósofos que iniciaram a longa jornada revolucionária desta ciência.

Giordano Bruno (1548-1600), teólogo e filósofo, dentre outras qualificações que podem se agregadas, já argumentava, por exemplo, que as estrelas eram sóis distantes cercados por seus próprios planetas, com a possibilidade de também abrigarem formas de vida. Hoje, a crescente descoberta de exoplanetas ratifica o pensamento científico de Giordano e reforça a necessidade de ser fazer ciência com o devido investimento, sobretudo, nas Escolas, no início do processo de formação dos estudantes, como uma estratégia para o surgimento de novas ideias e de pensamentos transformadores.

Agradecimentos

Uma das autoras, Maria Amanda Guimarães Santos, agradece ao Mestrado Profissional em Astronomia (MPASTRO) e a infraestrutura oferecida para a realização de todo o trabalho científico.

Referências

- [1] P.C. da Rocha-Poppe, V.A.F. Martin, G.M.F. Brito, *et al.*, *Aspectos da Ciência Astronômica na Antiga Civilização Egípcia*. Sitientibus Série Ciências Físicas **18**, scf20221813-1 (2022).
- [2] Ministério da Educação–Brasil, *Base Nacional Comum Curricular*. Brasília: MEC (2018). Acesso em: 18 Março de 2022.
- [3] M.A.G. Santos, *De Platão à Kepler: Um Recorte sobre o Movimento dos Planetas no Sistema Solar*. Dissertação (Mestrado) – MPAstro-UEFS, Departamento de Física da UEFS, Feira de Santana (2023).
- [4] A Unidade Astronômica (UA) é utilizada para distâncias dentro do Sistema Solar e corresponde à distância média da Terra ao Sol, que equivale, aproximadamente, 150 milhões de quilômetros. A distância real varia em cerca de 3% conforme a Terra orbita em torno do Sol, entre um máximo a um mínimo e vice-versa, uma vez por ano.
- [5] Embora contenha o ano como uma unidade de tempo, o ano-luz é uma unidade de comprimento e equivalente a cerca de 9,46 trilhões de quilômetros.

- [6] Uma unidade de comprimento usada para mensurar maiores distâncias e vale, aproximadamente, 3,26 anos-luz ou 206265 UA, ou ainda, 30,9 trilhões de quilômetros.
- [7] Trata-se de um grande círculo imaginário projetado na Esfera Celeste no qual o Sol parece mover-se ao longo de um ano. Obviamente, temos a órbita da Terra ao redor do Sol (Sistema Heliocêntrico) o real motivo da mudança aparente do Sol. A Eclíptica está inclinada em relação ao plano fundamental do Equador Celeste de aproximadamente 23,5 graus.
- [8] R. Boczeko, *Conceitos de Astronomia*. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda. (1987).
- [9] J.L.E. Dreyer, *A History of Astronomy from Thales to Kepler*. Revised Edition. New York: Dover Publications Inc. (2011).
- [10] C.H. Kahn, *Anaximander and the Origins of Greek Cosmology*. New York: Columbia University Press (1960).
- [11] A. Pannekoek, *A History of Astronomy*. New York: Interscience Publishers (1961).
- [12] W.K.C. Guthrie, *A History of Greek Philosophy*. Six Volumes. Cambridge: Cambridge University Press (1962).
- [13] L.H.H. Barbosa, *História da Ciência*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Bibliografia e Documentação – CNPq (1963).
- [14] D. Laërtios, *Vida e Doutrinas dos Filósofos Ilustres*. 2ª Reimpressão. Tradução: M.G. Kury. Brasília: Editora UnB (1988).
- [15] L. Motz, J.H. Weaver, *The Story of Astronomy*. Massachusetts: Perseus Publishing (1995).
- [16] M. Hoskin, *The Cambridge Concise History of Astronomy*. Cambridge: Cambridge University Press (1999).
- [17] D. Collinson, *50 Grandes Filósofos da Grécia Antiga ao Século XX*. Tradução: M. Waldman, B. Costa. São Paulo: Editora Contexto (2004).
- [18] T.L. Heath, *Greek Astronomy*. New York: Dover Publications Inc. (2011).
- [19] S.M. Cohen, P. Curd, C.D.C. Reeve, *Readings in Ancient Greek Philosophy From Thales to Aristotle*. Cambridge: Hackett Publishing Company (2011).
- [20] A. Mazer, *Shifting the Earth: The Mathematical Quest to Understand the Motion of the Universe*. New Jersey: John Wiley & Sons (2011).
- [21] D.L. Couprie, *Heaven and Earth in the Ancient Greek Cosmology: From Thales to Heraclides Ponticus*. New York: Springer Science and Business Media (2012).
- [22] R. Dicati, *Stamping Through Astronomy*. New York: Springer Science and Business Media (2013).
- [23] Aristotle, *On the Heavens*. Translation: J.L. Stocks. The University of Adelaide Library: eBooks@Adelaide (2015).
- [24] N. Kana, *Star Maps: History, Artistry, and Cartography*. New York: Springer Science and Business Media (2012).
- [25] G. Reale, *História da Filosofia Antiga – Os sistemas da era helenística*. Vol. III. São Paulo: Edições Loyola (1994).
- [26] A.M. Velásquez-Toribio, M.V. Oliveira, *Primeiro modelo matemático da cosmologia: as esferas concêntricas de Eudoxo*. Rev. Bras. Ens. Fis. **41**, 2 (2019).
- [27] Tal análise também converge com a interpretação feita a seguir no Modelo Geocêntrico, onde a percepção natural leva a interpretação mais simples da realidade: sendo um território com milhares de ilhas espalhadas e banhadas pelos mares Egeu e Jônico, a própria Terra também repousaria na água.
- [28] Ao findar de um ciclo, o Sol, a Terra e a Lua retornam, aproximadamente, para a mesma configuração geométrica, permitindo que os eclipses voltem a ocorrer em uma mesma sequência, porém, em diferentes lugares geográficos.
- [29] R. Caniato, *O Céu*. 1ª Edição. São Paulo: Editora Átomo (2011).
- [30] G. Lemaître, *The Evolution of the Universe: Discussion*. Nature **128**, (3234) 699 (1931).
- [31] A.A. Friedman, *On the Curvature of Space*. Translation: A. Friedman. General Relativity and Gravitation **31**, (12) 1991 (1999).
- [32] H. Karttunen, P. Kröger, H. Oja, M. Poutanen, K.J. Donner (Editors), *Fundamental Astronomy*. Sixth Edition. New York: Springer (2017).
- [33] B.W. Carroll, D.A. Ostlie, *An Introduction to Modern Astrophysics*. 2nd Edition. Cambridge: Cambridge University Press (2017).
- [34] Paralaxe representa um desvio nas posições relativas observadas para os objetos, provocado pelo deslocamento do observador.
- [35] F.W. Bessel, *On the parallax of 61 Cygni*. MNRAS **4**, 152 (1838).
- [36] 1 (um) segundo do grau é uma medida usada para ângulos. Equivale a um ângulo de 1/60 de um minuto do grau, ou 1/3600 do grau, ou 1/1296000 do círculo.
- [37] O título original em grego da obra era *He Magiste Sintaxys*, ou seja, a Maior Compilação. Entre os árabes, *Al Majisti*, tornando-se, posteriormente, *Almagest*.

- [38] F.J. Rutherford, G. Holton, F.G. Watson, *Project Physics. Text*. New York: Holt, Rinehart and Winston, Publishers (1981).
- [39] Tempo em dias terrestres para um planeta orbitar o Sol de um Equinócio Vernal ao seguinte. Também conhecido como período orbital trópico, igual a 1 ano terrestre.
- [40] F. Verbunt, R.H. van Gent, *Three editions of the star catalogue of Tycho Brahe. Machine-readable versions and comparison with the modern Hipparcos Catalogue*. A&A **516**, A28 (2010).
- [41] J. Kepler, *Harmonies of The World*. Ahmedabad: Bhoomi Digital Apps (2017).
- [42] Exceto para Mercúrio. Salientamos aqui o problema da precessão do eixo orbital de Mercúrio, resolvido apenas pela Teoria da Relatividade.
- [43] M. Caspar, *Kepler*. Translation: C.D. Hellmann (Editor). New York: Dover Publications Inc. (1993).
- [44] L. Angioni, *Aristóteles. Física I-II*. Campinas: Editora Unicamp (2010).
- [45] P.T. da Silva, *A mensagem, o mensageiro e o tradutor: a propósito da tradução portuguesa do Sidereus nuncius*. Scientiæ Studia **11**, (4) 937 (2013).