CADERNOS ESPINOSANOS V, P. 35-63, 1999

Mysterium Cosmographicum: Os Antecedentes das Duas Primeiras Leis Keplerianas dos Movimentos Planetários*

Claudemir Roque Tossato**

1. Introdução

As duas primeiras leis dos movimentos planetários, a lei que afirma que a forma da órbita dos planetas é elíptica, sendo que o Sol ocupa um dos focos da elipse (primeira lei); e a lei que determina que os planetas, ao longo desse trajeto elíptico, percorrem áreas iguais em tempos iguais (segunda lei), foram apresentadas por J. Kepler ao mundo científico pela primeira vez no ano de 1609, na sua obra intitulada *Astronomia Nova*.

O caráter fundamental dessas duas leis está no tratamento físico dado por Kepler para as suas obtenções. O principal fator para as suas elaborações foi a postulação kepleriana de que os movimentos planetários ocorrem mediante a ação causal exercida

---

* Este texto é, com algumas modificações, o segundo capítulo da minha dissertação de mestrado, intitulada "O Processo de Elaboração das Duas Primeiras Leis dos Movimentos Planetários de J. Kepler", na qual pretendo mostrar que as duas primeiras leis de Kepler romperam com o axioma platônico quando esse astrônomo procurou determinar causas físicas para os movimentos dos planetas. A dissertação encontra-se na biblioteca do Departamento de Filosofia da Universidade de São Paulo.

** Doutorando do Departamento de Filosofia da USP.

pelo corpo central do sistema de movimentos, o Sol, através da emanação de forças. Tais forças fazem os planetas percorrerem movimentos elípticos, cumprindo áreas iguais em tempos iguais.

Essas leis possibilitaram duas mudanças básicas para a astronomia. A primeira, foi a ruptura com o axioma platônico de movimentos circulares e uniformes(1); axioma esse que condicionou a elaboração dos modelos descritivos dos movimentos planetários desde a época de Platão até os trabalhos de Kepler. A segunda, foi a possibilidade da astronomia tratar as suas hipóteses e construções de modelos não mais sob o ponto de vista da interpretação instrumentalista(2), mas sim voltada para o enfoque realista, mediante o caráter físico das leis. Em outras palavras, as duas primeiras leis de Kepler procuram descrever a realidade física dos movimentos dos planetas, e não a construção de modelos sem vínculo com o que de fato ocorre no mundo celeste.

Contudo, esse trabalho exposto nessa obra de 1609 inicia-se, na verdade, com o primeiro trabalho astronômico de Kepler, o *Mysterium Cosmographicum*, editado em 1596. Nessa obra, Kepler apresenta a sua hipótese dos sólidos perfeitos; hipótese essa que diz que os cinco sólidos perfeitos conhecidos estão inscritos e circunscritos nas esferas das órbitas dos planetas. Além disso, e mais importante ainda, Kepler nos apresenta nesse livro as origens das suas investigações físicas, que o conduziram à construção do seu modelo de dinâmica celeste exposto na *Astronomia Nova*. Mesmo que de uma forma rudimentar, o *Mysterium Cosmographicum* fornece ao leitor de Kepler, e também para o público interessado na astronomia dessa época, elementos importantes para a compreensão do processo de elaboração das leis, feito na obra de 1609.

Os elementos contidos no *Mysterium Cosmographicum* permitem entender uma série de problemas enfrentados por Kepler no processo de elaboração das suas duas primeiras leis e, também, esclarecem alguns dos seus posicionamentos frente à astronomia, tais como as razões para a aceitação, por sua parte, do sistema copernicano. Neste sentido, pode-se dizer que esse livro de 1596

não é uma obra de "sonhador" – tal como foi considerada por vários homens de ciência da sua época[3] –, como poderíamos afirmar se nós nos restringíssemos a admitir apenas a sua hipótese dos sólidos perfeitos, sem notarmos o trabalho científico de Kepler contido no interior da obra. O *Mysterium Cosmographicum* é uma obra que apresenta características científicas; características essas que explicam alguns dos procedimentos epistemológicos e metodológicos keplerianos para a obtenção das suas duas primeiras leis dos movimentos dos planetas.

O rompimento com o axioma platônico foi o fruto de um árduo processo. Essa tarefa teve como origem o trabalho de 1596, de maneira que a análise do *Mysterium Cosmographicum* nos permite compreender as modificações e desenvolvimentos das idéias básicas de Kepler.

No *Mysterium Cosmographicum*, Kepler era um astrônomo preso ao axioma platônico. Sua crença era a mesma da dos astrônomos do período grego até a sua época, a de que todas as hipóteses acerca dos movimentos celestes devem ser condicionadas ao princípio da circularidade e uniformidade. Se uma dada hipótese se mostrasse contrária ao axioma, dever-se-ia abandoná-la. Kepler não tinha originariamente a preocupação em romper com tal axioma; isso ocorreu na tentativa de resolver uma questão, que para ele era mais importante, a saber, determinar, para comprovação de sua hipótese dos sólidos perfeitos, dados significativos sobre o planeta Marte. Dados esses tais como as distâncias do planeta ao centro de sua órbita ao longo de seu trajeto, de modo a poder determinar a excentricidade[4] do movimento de Marte. A ruptura, obtida plenamente na *Astronomia Nova*, em 1609, deveu-se a uma série de cálculos e hipóteses para alcançar esses objetivos.

Porém, apesar do *Mysterium Cosmographicum* não apresentar uma postura crítica frente ao axioma de movimentos circulares e uniformes, esse trabalho kepleriano de 1596 apresenta três pontos importantes para a compreensão do processo de ruptura com o axioma na *Astronomia Nova*, a saber:

O primeiro é o caráter eminentemente metafísico, ou cosmológico, do *Mysterium Cosmographicum*. Nessa obra, Kepler procurou construir um modelo descritivo dos movimentos planetários tendo em vista uma postura apriorística, na qual a construção dos sólidos inscritos nas esferas celestes foi determinada mais em vista de uma posição harmônica-pitagórica do que como o fruto da construção de hipóteses via a utilização dos dados observacionais. Em outras palavras, a construção cosmológica do *Mysterium Cosmographicum* representa o poder que tinha a crença kepleriana na existência de uma estrutura harmônica subjacente aos fenômenos celestes observados, de modo que os dados observacionais não tiveram nenhum papel relevante na elaboração da hipótese dos sólidos perfeitos. Esse caráter é importante, pois restringiu a descrição dos movimentos a uma cinemática instrumentalista, sem considerações de ordem física e dinâmica, que marcarão o processo de obtenção das leis, na *Astronomia Nova*, mediante o conceito de força magnética exercida pelo Sol nos planetas. Desse modo, o ponto relevante sobre as diferenças entre os trabalhos de 1596 e 1609 foi o abandono por parte do último de uma postura meramente cinemática, beneficiando, com isso, a construção de um modelo dinâmico. Pode-se afirmar que essa mudança foi obtida, entre outras coisas, graças aos dados observacionais de Tycho Brahe utilizados por Kepler na obra de 1609 e, também, pelo caráter da *Astronomia Nova*, na qual a astronomia torna-se uma ciência física quando procura determinar as causas que levam os planetas a se comportarem de acordo com o que se observa.

O segundo ponto refere-se à defesa do copernicanismo, por parte de Kepler, exposta no *Mysterium Cosmographicum*. Embora os argumentos a favor do heliocentrismo sejam fornecidos, de uma maneira mais forte e corroboradora, no *Astronomia Nova*, principalmente com a introdução das discussões dinâmicas, a posição de defesa de Copérnico por parte de Kepler nessa obra de 1596 é de grande interesse por duas razões. A primeira é de interesse histórico. Kepler foi, se não o primeiro, um dos pioneiros em defender o copernicanismo. A obra é de 1596, anterior às desco-

bertas de Galileu obtidas através da utilização do telescópio, relatadas no seu livro *Mensageiro das Estrelas*, de 1610. Kepler defendeu o sistema de Copérnico em 1596 independentemente de ter em mãos uma teoria apta a ser corroborada empiricamente a favor de tal sistema. A defesa kepleriana desse sistema era dada mais em função de uma postura metafísica do que propriamente como resultado de uma pesquisa científica, diferentemente do que ocorreu na *Astronomia Nova*.

A segunda é de cunho epistemológico e cosmológico, referente aos argumentos de Kepler de que o copernicanismo é apto a descrever o cosmo sob o ponto de vista de uma ordem harmônica e organizada, em que cada elemento faz parte de uma estrutura única, de maneira que explicação do funcionamento das partes implica na compreensão da estrutura completa do cosmo – algo que os modelos geocêntricos não permitiam fazer. Em outras palavras, o copernicanismo forneceu a Kepler um modelo de racionalidade, no qual se pode reunir – de uma forma a se obter representações universais, em forma de leis matemáticas – as partes com o todo. Desse modo, a defesa do copernicanismo por parte de Kepler, no seu trabalho de 1596, está inserido nas suas tendências metafísicas de uma harmonia preestabelecida pelo Criador; tendências tais que continuaram nos seus trabalhos subsequentes, mas conjuntamente com considerações de cunho físico, ou dinâmico.

O terceiro ponto é o esboço das leis dos movimentos planetários que aparece no *Mysterium Cosmographicum*. Nessa obra, Kepler pergunta-se por que os planetas realizam movimentos com períodos determinados. Para responder a essa questão, ele considera que os tempos são condicionados pelas distâncias dos planetas ao seu centro de movimentos, o Sol. Essas especulações serão desenvolvidas no seu trabalho de 1609. Assim, pode-se dizer que o *Mysterium Cosmographicum*, apesar de não apresentar um procedimento dinâmico, lança as bases para essa pesquisa realizada na *Astronomia Nova*.

Tendo em vista essas características do *Mysterium Cosmographicum*, o objetivo deste texto é apresentar as principais contribuições dessa obra para o desenvolvimento da elaboração das duas primeiras leis keplerianas. Além disso, apresentaremos a contribuição que os dados observacionais de Brahe tiveram para a elaboração dessas leis dos movimentos planetários.

2. Os Sólidos Perfeitos

As escrever o *Mysterium Cosmographicum*, Kepler objetivava, com essa obra, resolver alguns dos principais problemas da astronomia da sua época, tais como a determinação das órbitas planetárias; explicar o porque da existência de apenas seis planetas(5), e não mais e nem menos do que esse número; a relação entre as órbitas com as distâncias dessas ao centro; e, principalmente, elaborar leis que descrevessem e explicassem esses componentes do mundo celeste. Para resolver esses problemas, Kepler postulou duas coisas importantes. A primeira é que o centro de movimentos celestes é o Sol, sendo que a Terra é apenas um planeta, que se movimenta da mesma forma que os outros, inserindo-se, dessa maneira, como um defensor do copernicanismo. A segunda foi a constituição do universo mediante a hipótese, por ele assim denominada, dos sólidos perfeitos, isto é, a inscrição e circunscrição dos cinco sólidos perfeitos conhecidos nas esferas correspondentes às órbitas dos seis planetas observados.

A intenção de Kepler com essas postulações era obter a estrutura harmônica subjacente aos fenômenos astronômicos, na qual as partes mantém uma relação (razão harmônica) constante com o todo. Em outras palavras, ele objetivava encontrar *a priori* a estrutura e as leis dos fenômenos astronômicos com a postulação da hipótese dos sólidos perfeitos. Para Kepler, o ato de criação do universo se deu mediante uma constituição harmônica, matemática. Os fenômenos celestes seriam a manifestação dessa perfeição, como ele deixa claro no prefácio do *Mysterium* (Kepler, 3, p. 63):

> "É minha intenção, leitor, defender neste pequeno livro, que o grande e bom Criador, no ato da sua criação desse universo movente e do arranjo dos céus, operou com esses cinco sólidos regulares, os quais foram celebrados desde o tempo de Pitágoras e Platão até o nosso; e que ele ajustou à natureza desses sólidos o número dos céus, suas proporções e as leis dos seus movimentos."

Pode-se apreciar, pela citação acima, a idéia básica de Kepler sobre a ordenação do cosmo. Para esse astrônomo, o universo foi construído segundo uma estrutura harmônica entre as partes e o todo, isto é, todas as partes do universo (planetas, Sol, etc.) mantém uma relação constante entre as suas distâncias e tempos de percurso desses ao centro (Sol); sendo que o número de planetas – conhecidos na época de Kepler – não foi dado ao acaso, mas por uma necessidade harmônica, determinada pelo arranjo desses planetas com os sólidos perfeitos, segundo Kepler (*idem*):

> "Existem três coisas em particular sobre as quais eu persistentemente persigo as razões pelas quais elas são de tais modos e não de outros: o número [dos planetas], o tamanho e o movimento dos círculos. O meu desafio deve muito à esplêndida harmonia entre as coisas que estão em repouso, o Sol, as estrelas fixas e o espaço intermediário, idênticos ao Pai, ao Filho e as Espírito Santo."

Por essa passagem, nota-se a semelhança, ou analogia, dada por Kepler à estrutura harmônica com a Santíssima Trindade, em que as partes do cosmo são relacionadas às entidades cristãs, objetivando apresentar via essa imagem uma harmonia cósmica.

Kepler prossegue mostrando que as dificuldades que a astronomia teve para encontrar essa harmonia foram devidas, basicamente, aos defeitos que os modelos astronômicos de sua época apresentavam – em especial o copernicano, pelo fato de que nesse sistema não ocorria uma concordância entre os cálculos efetuados para se encontrar o número, o tamanho e o movimento do cír-

culo da órbita planetária –; mas isso não o desanimou, pois é da natureza do cosmo conter essa hamonia, devendo o astrônomo esforçar-se por encontrá-la, obtendo, como resultado, as constâncias e regularidades que estão presentes no mundo celeste, assim, escreve Kepler (*idem*):

> "...Todavia, fui confortado repetidamente, e as minhas esperanças foram revitalizadas, não apenas pelos argumentos abaixo [hipótese dos sólidos perfeitos], mas também pelo fato de que os movimentos sempre se apresentam em relação às distâncias, e que sempre existiu uma grande diferença entre as esferas,.... Mas se, (penso eu), Deus dotou de movimentos as esferas para corresponder às suas distâncias, similarmente ele fez as próprias distâncias corresponderem com alguma coisa."

Kepler partirá para a procura da determinação dessas relações constantes entre os números de planetas existentes, os tamanhos de suas órbita e as suas distâncias ao centro de movimentos. Dessa procura, que é a origem do processo de elaboração das suas leis dos movimentos planetários, ele elaborou, no *Mysterium Cosmographicum*, a sua hipótese dos sólidos perfeitos, que é a sua primeira tentativa para formular um sistema descritivo e explicativo do universo, alicerçada na estrutura harmônica. Esse primeiro modelo kepleriano relacionará os elementos a serem pesquisados – o número de planetas, suas distâncias e percursos – à concepção de que Deus inscreveu e circunscreveu as esferas planetárias nos sólidos geométricos perfeitos.

Basicamente, o universo kepleriano do *Mysterium* é o seguinte:

Para construir o seu modelo dos sólidos perfeito, Kepler adere às teses heliocêntricas de centralidade do Sol e de movimento da Terra ao redor deste, considerando-a como um planeta como os demais. Assim, o Sol está no centro do sistema planetário. As esferas das órbitas dos planetas conhecidos em sua época – Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter e Saturno, nessa

ordem respectiva de distâncias ao Sol – estão inscritas e circunscritas nos vértices dos cinco sólidos perfeitos conhecidos desde a época de Platão, que são o Cubo, Tetraedro, Dodecaedro, Icosaedro e Octaedro, dessa maneira, escreve Kepler (*idem*, p. 69):

> "... A Terra está no círculo que serve de medida para tudo. Construir um dodecaedro ao redor dela. O círculo envolvendo-o deve ser o de Marte. Ao redor de Marte construir um tetraedro. O círculo envolvendo-o deve ser o de Júpiter. Ao redor de Júpiter construir um cubo. O círculo envolvendo-o deve ser o de Saturno. Depois, construir um icosaedro dentro da esfera da Terra. O círculo inscrito nele deve ser o de Vênus. Dentro da esfera de Vênus construir um octaedro. O círculo inscrito nele deve ser o de Mercúrio. Assim, pode-se ter a explicação da razão do número de planetas existentes."

Assim, considerando-se inicialmente o planeta mais externo (Saturno), temos a seguinte estrutura planetária: esfera de Saturno, cubo; esfera de Júpiter, tetraedro; esfera de Marte, dodecaedro; esfera da Terra, icosaedro; esfera de Vênus, octaedro; esfera de Mercúrio, e, finalmente, o Sol, formando a "taça cósmica" kepleriana, conforme a figura abaixo .

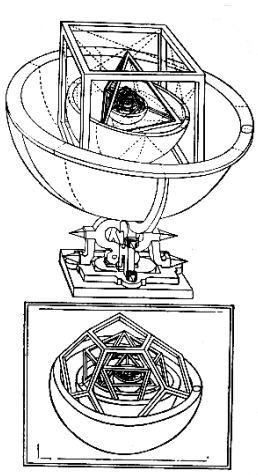

Figura 1 (Cohen, 1, p. 144)
O modelo de universo de Kepler.
Os cinco sólidos perfeitos estão encaixados (inscritos e circunscritos) nas esferas das órbitas dos seis planetas conhecidos na época de Kepler.

Na época que redigiu o *Mysterium Cosmographicum*, Kepler acreditou plenamente nessa estrutura cósmica. Todo seu trabalho posterior foi uma tentativa, e podemos dizer que em alguns pontos ela se demonstrou frutífera, de demonstrar que o universo tem essa constituição. Os resultados positivos dessa sua idéia original foram, posteriormente, a elaboração das suas duas primeiras leis dos movimentos planetários.

Entretanto, como foi dito acima, a concepção dos sólidos perfeitos foi elaborada tendo-se em vista uma posição mais de cunho cosmológico do que propriamente uma construção a partir dos dados das observações celestes ou, principalmente, pela postulação de causas físicas. Neste sentido, o *Mysterium Cosmographicum*, é uma obra que apresenta as teses metafísicas de Kepler, a idéia básica de que existe uma harmonia cósmica, que sempre o acompanhará. Porém, a posição adotada nesse trabalho de 1596 não lhe permitiu romper com o primado do axioma platônico. Será apenas com o caráter explicativo, sob o ponto de vista da elaboração de modelos dinâmicos, que esse astrônomo atingirá tal resultado.

3. A Defesa do Copernicanismo

Kepler necessitava de um sistema astronômico que possibilitasse a expressão dessa estrutura harmônica entre esferas e sólidos perfeitos; desta forma, ele adota o sistema heliocêntrico. O geocentrismo não poderia ser empregado, não tanto pelo fato da Terra estar colocada no centro do sistema, mas principalmente pelos critérios metafísicos e epistemológicos keplerianos. Logo no prefácio do *Mysterium Cosmographicum*, Kepler arrolou razões de ordem metafísica e epistemológica para a aceitação do heliocentrismo, expressas da seguinte maneira (*idem*, p. 63):

> "...Mas antes de falar dessa questão, permitam-me discutir brevemente o que ocasionou este livro, e minhas razões para realizá-lo,

> as quais eu penso não afetarão o seu entendimento, mas a minha reputação.
>
> Há seis anos (1590), quando eu estudava com o distinto mestre Michael Maestlin, em Tübingen, estando perturbado pelas minhas concepções usuais sobre o universo, fui satisfeito por Copérnico, quando mestre Maestlin mencionou sua obra, e eu não apenas defendi suas opiniões nas disputas dos candidatos em física, mas até mesmo escrevi acerca dessas disputas sobre o primeiro movimento(6), argumentando que isso se dava devido à revolução terrestre. Eu tinha então atingido o ponto de atribuir a essa mesma Terra o seu movimento em torno do Sol, mas Copérnico fez isso mediante argumentos matemáticos, os meus são razões físicas, ou metafísicas."

Essa passagem apresenta dois pontos relevantes para o entendimento do procedimento astronômico kepleriano. O primeiro é de cunho metafísico, que é justamente a crença de Kepler na existência de uma estrutura harmônica subjacente aos acontecimentos observados, como nós já vimos. Para Kepler, o mundo celeste é visto como uma estrutura, na qual as relações (isto é, as variações nas velocidades dos planetas; os tempos de percursos, movimentos de translação; e as variações nas distâncias dos planetas ao corpo central, o Sol) entre os seus componentes mantêm certas regularidades, de modo que elas podem ser expressas em forma de leis gerais, sendo que ao intelecto humano está reservado a descoberta de tais regularidades.

O segundo ponto está ligado aos critérios epistemológicos kepleriano; está justamente nas razões físicas que Kepler irá adotar, na *Astronomia Nova*, com o conceito de força, para obter um modelo que descreva e explique os movimentos apresentados pelos planetas. Enquanto Copérnico deu razões matemáticas, Kepler irá desenvolver razões de ordem física, isto é, Copérnico restringiu-se a uma cinemática celeste(7), enquanto que Kepler desenvolveu um modelo de dinâmica celeste.

No *Mysterium Cosmographicum* Kepler adota uma postura mais de cunho metafísico do que físico, mas, apesar disso, expõe

a sua posição de que a astronomia deve procurar estudar os seus fenômenos não da forma habitual, isto é, desvinculada das razões reais, ou físicas, mas como uma ciência que pode e deve elaborar conhecimentos vinculados ao que de fato ocorre nos céus, sendo, tal posição, plenamente desenvolvida na *Astronomia Nova*. Porém, no *Mysterium Cosmographicum*, Kepler já tinha argumentos razoáveis para a defesa do copernicanismo como um sistema apto a tratar fisicamente os movimentos planetários.

No primeiro capítulo do *Mysterium Cosmographicum*, Kepler apresenta ao leitor a sua confiança no sistema copernicano, pois tal estrutura celeste é adequada para expressar os movimentos dos planetas, segundo Kepler (*idem*, p. 75):

> "... Minha confiança foi primeiramente estabelecida pela magnífica concordância de tudo que é observado nos céus com a teoria de Copérnico; visto que ela não apenas derivou movimentos passados..., mas também previu movimentos futuros.....Entretanto, o que é mais importante é que, aquilo que os outros nos ensinaram como sendo milagre, apenas Copérnico deu-nos a explicação."

Pode-se sumariar os critérios keplerianos, contidos na passagem acima, para a justificação do heliocentrismo, da seguinte forma:

1) Concordância com as observações;
2) Previsão de movimentos futuros e retrodição de movimentos passados;
3) Possibilita determinar explicações para os movimentos.

Os dois primeiros critérios tratam do caráter observacional; eles funcionam como elementos para comprovação de hipóteses, isto é, de concordância com os fenômenos apresentados pelos movimentos planetários e, também, a previsão para elaboração de tabelas acerca dos posicionamentos planetários. Esses critérios também podem ser aplicados para o geocentrismo, que, da mesma forma que o sistema heliocêntrico, possibilitava a determina-

ção com um grau equivalente de precisão. Esses dois critérios podem ser interpretados apenas como uma formulação cinemática instrumentalista, sem considerações das causas dos movimentos.

Porém, é no terceiro critério que Kepler irá alicerçar a sua defesa do copernicanismo. É na possibilidade de chegar a fornecer explicações sobre os movimentos dos planetas que esse astrônomo utilizará as hipóteses copernicanas. Subseqüentemente, no *Astronomia Nova*, as hipóteses de centralidade do Sol e de movimentos da Terra permitirão a Kepler postular a idéia de que uma espécie de força magnética faz com que os planetas se movimentem da maneira como os observamos. Em outras palavras, o sistema copernicano forneceu a Kepler uma disposição, ou estrutura cósmica, suficientemente adequada para a conjugação dos movimentos e as descrições e explicações em forma de um modelo dinâmico que expressa os fenômenos astronômicos.

Após mostrado o caráter explicativo do copernicanismo, Kepler passa a apresentar a sua defesa do copernicanismo, tanto sob o ponto de vista lógico quanto do ponto de vista epistemológico.

No *Mysterium Cosmographicum*, Kepler critica aqueles que consideram que tanto o modelo ptolomaico quanto o sistema copernicano são equivalentes sob o ponto de vista lógico, em que os dois sistemas, partindo de premissas que podem ser falsas, conduzem a uma conclusão verdadeira, sendo as explicações adquiridas, dessa forma, por acidente; segundo Kepler (*idem*):

> "... Eu nunca concordei com aqueles que confiam nos modelos a partir de provas acidentais, os quais inferem a verdade a partir de premissas falsas, pela lógica do silogismo. Sobre esse modelo, eles argumentam que é possível as hipóteses de Copérnico serem falsas e, todavia, os fenômenos verdadeiros seguirem-se a partir delas como se elas fossem autênticos postulados."

Kepler critica a utilização de provas acidentais, de modo a poder garantir a realidade do copernicanismo. As suas palavras na citação acima significam que não é possível as premissas coper-

nicanas, as teses heliocêntricas, serem falsas, e, contudo, os fenômenos serem salvos, contrariamente àqueles que defendem a possibilidade do modelo geocêntrico ser falso, mas, apesar disso, poder "salvar as aparências". Para Kepler, os fenômenos, os movimentos planetários, podem e devem ser determinados a partir de premissas verdadeiras, e não acidentais; neste sentido, ele continua (*idem*):

> "... Isso não é o caso daqueles que posicionam o Sol no centro. Pois, se vós tomá-los [os fenômenos] como derivados a partir das hipóteses [heliocêntricas]...alguns dos fenômenos que são atualmente observados nos céus, argumentando para cima [de forma ascendente] ou para baixo [de forma descendente], para inferir um movimento do outro....vós não terás dificuldades em qualquer ponto, se elas [hipóteses] são autênticas, e mesmo a partir dos mais intricados argumentos vós retornará com completa consistência às mesmas suposições."

Kepler argumenta que em um silogismo, se as premissas são verdadeiras, pode-se argumentar tanto no sentido ascendente – provar as premissas –, quanto descendente – retirar conseqüências da conclusão –, de maneira que, posicionar o Sol no centro e dar movimentos à Terra é fornecer premissas, isto é, fornecer razões, que correspondem a essas exigências do silogismo. Em outras palavras, para Kepler a verdade das hipóteses copernicanas é garantia para a determinação dos movimentos dos planetas, seja tanto deduzindo-os das hipóteses, quanto essas serem descobertas a partir dos movimentos.

Mas o forte da defesa kepleriana não está nesses argumentos lógicos, mas nos argumentos epistemológicos elaborados a partir do caráter explicativo que o copernicanismo fornece à astronomia. Kepler critica o modelo ptolomaico por não ser apto a originar explicações para os elementos que compõem os movimentos celestes, de modo que, se substituirmos o centro de movi-

mentos, teremos um sistema adequado para expressar os movimentos planetários[8]; assim, continua Kepler (*idem*, p. 75-7):

> "... Digo, primeiramente, que as antigas hipóteses [ptolomaicas] simplesmente não dão conta de um grande número de fenômenos. Por exemplo, elas não dão a razão para o número, extensão e tempos de retrogradação, e porque elas concordam precisamente com as posições e o movimento mediano do Sol. Sobre esse ponto, uma magnífica ordem é apresentada por Copérnico; a causa, necessariamente, deve ser encontrada nele. Em segundo lugar, de todas as hipóteses que dão uma razão aceitável para as aparências e concordam com as observações, Copérnico não as nega, mas as adota e as explica."

Em outras palavras, o copernicanismo é visto como uma teoria apta a dar razões e explicações, coisas que os modelos geocêntricos não permitem realizar. Neste sentido, Kepler apresenta alguns pontos cruciais na astronomia de sua época que são explicados pelo copernicanismo e não pelo modelo ptolomaico (*idem*, p. 81). A garantia do poder explicativo do copernicanismo é fundamentada, principalmente, no caráter de sistematização e de racionalidade que esse sistema possibilita para a astronomia.

As teses copernicanas não são apenas melhores sob o ponto de vista de obtenção de bons posicionamentos – o que, aliás, as tabelas baseadas no copernicanismo na época de Kepler não obtinham – mas, no caráter de permitir relacionar cada elemento, sejam tanto os planetas quanto o Sol, com todos os outros. Deste modo, os fenômenos são explicados de uma forma mais racional e coerente colocando-se o Sol no centro e a Terra movendo-se ao seu redor, do que quando se admitia a Terra como o centro dos movimentos.

Nos modelos geocêntricos, em especial o de Ptolomeu, cada planeta tinha o seu próprio modelo de artifícios para a determinação de suas posições. Cada planeta tinha a sua própria tabela de movimentos, não havendo a necessidade de conjugá-las em rela-

ção aos movimentos e posicionamentos dos outros planetas. Neste sentido, os fenômenos observados eram de difícil explicação, pois eram tratados separadamente. Por exemplo, os movimentos de retrogradação(9) eram salvos mediante a criação de um grande número de artifícios para representar, em forma de epiciclos com deferentes(10), as curvas espirais que supostamente os planetas realizavam.

Com Copérnico, em contrapartida, os movimentos eram salvos de uma forma mais coerente no que diz respeito às relações entre as partes e o todo. A retrogradação aparente era explicada pela relatividade entre as distâncias e velocidades da Terra com os planetas, tendo-se o Sol no centro, conforme a figura 2, abaixo.

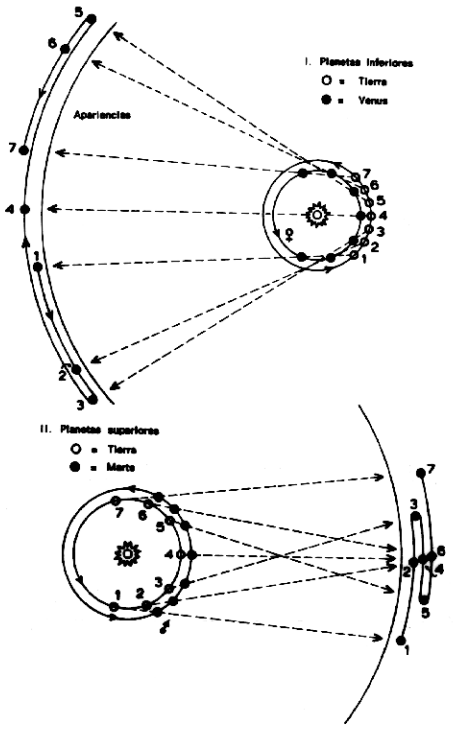

Figura 2 (Hanson, 2, p. 206)

Por essa figura, nota-se que os movimentos planetários apresentam uma retrogradação aparente, quando vistos pela ótica copernicana. Nos modelos geocêntricos, ocorre retrogradação pelo fato da Terra estar localizada no centro de movimentos, gerando as aparências retrogradativas constatadas observacionalmente. Mudando-se o centro, isto é, posicionando o Sol nesse lugar, e dando à Terra movimentos idênticos aos dos outros planetas, temos como explicar a retrogradação: ela é fruto da relatividade entre os movimentos planetários em relação à Terra, conjugados com as variações das distâncias planetárias para percorrer tais movimentos, gerando essa irregularidade aparente. Neste sentido, a retrogradação era explicada em Copérnico relacionando todos os planetas; todos participam dos movimentos para, a partir disso, poder explicar essa irregularidade. No modelo ptolomaico, ao contrário, a retrogradação acontecia em função de se considerar cada planeta em relação à Terra estática, separados dos outros planetas, ocasionando tal desigualdade.

Como nos diz Hanson, os cálculos de Ptolomeu eram específicos para cada planeta, independentemente dos outros, enquanto que em Copérnico todos os planetas entram na determinação dos movimentos de cada planeta (Hanson, 2, p. 204):

> "... os cálculos ptolomaicos constituíam sempre soluções específicas a problemas particulares dos corpos, que eram um planeta qualquer e a Terra. Por outro lado, os cálculos copernicanos surgiram sempre de considerações de vários corpos, ao menos em princípio."

O modelo de universo ptolomaico apresentava bons resultados quanto às posições planetárias, mas não apresentava, propriamente, um sistema integrado que desse explicações racionais acerca dos movimentos e, principalmente, permitisse uma explicação fisicamente plausível para os comportamentos irregulares apresentados pelos planetas. Com as teses heliocêntricas, Kepler pode situar-se num sistema representativo que lhe possibilitava tratar de uma forma integrada os planetas – as suas velocidades, tempos de

revolução, distâncias ao centro de movimentos, etc. – e explicar como isso ocorre.

Kepler tratou o copernicanismo no *Mysterium Cosmographicum* relacionando-o à sua fundamentação cosmológica. Porém, a defesa, pode-se dizer, forte desse astrônomo a favor de tal sistema consolidar-se-á apenas na *Astronomia Nova*, na qual ele utilizará o sistema copernicano como o único a permitir uma explicação satisfatória sob o ponto de vista das exigências de um modelo dinâmico.

4. O Esboço das Leis

A contribuição mais importante do *Mysterium Cosmographicum* é a primeira formulação da tentativa kepleriana de encontrar uma relação matemática entre as distâncias dos planetas ao Sol com o tempo que o planeta precisa para realizar uma revolução completa(11). Essa investigação implicou, na *Astronomia Nova*, na quebra com o axioma platônico, substituindo-o pela lei da forma elíptica e a lei das áreas, e isso se dando pela ação do Sol, mediante a emanação de forças a distância.

No capítulo XX do *Mysterium Cosmographicum*, Kepler apresenta a sua curiosidade em saber por que cada planeta, quanto mais longe está do Sol, leva mais tempo para realizar uma revolução, e por que todos eles apresentam uma relação constante entre os seus percursos – por exemplo, Saturno demora 30 anos para completar uma revolução em torno do centro de movimentos; Júpiter, 12; Marte 687 dias; Terra um ano, etc. –, sendo que esses tempos de percurso estão relacionados com as distâncias, maiores ou menores, do planeta ao centro. Para Kepler, isso ocorre porque quanto mais longe está o planeta do Sol, mais lenta é a sua velocidade. Kepler lançou duas hipóteses para explicar porque um planeta perde velocidade quando está mais afastado do Sol, segundo ele (Kepler, 3, p. 199)(12):

> "Se quisermos aproximar-nos mais da verdade e estabelecer uma correspondência nas proporções (entre as distâncias e as velocidades dos planetas) devemos escolher entre estas duas hipóteses: ou as almas que movem os planetas são ativas quanto mais distante está o planeta do Sol, ou existe apenas uma alma motor no centro de todas as órbitas, isto é, o Sol, que move o planeta tanto mais vigorosamente quanto mais próximo este se encontra, mas cuja força se esgota quando age nos planetas exteriores, em virtude da grande distância e do enfraquecimento da força daí decorrente."

Essas investigações dinâmicas iniciadas no *Mysterium Cosmographicum*, apesar de ligadas a uma concepção de mundo pitagórica, sem qualquer respaldo empírico, são importantes porque apresentam algo de novo na astronomia da época de Kepler, a investigação sobre o que leva os planetas a manter uma relação harmônica – entre tempos e distâncias – constante, e, a partir dessa admissão, construir leis universais para detectar essa relação apresentada pelos movimentos planetários. Em outras palavras, nessa obra de 1596, são postas questões acerca da razão que leva os movimentos dos planetas a se darem tais como são observados e, também, qual o motivo que os faz percorrerem movimentos que apresentam relações constantes.

Na astronomia instrumentalista cinemática, alicerçada na impossibilidade de relatar a verdade ou falsidade dos modelos astronômicos, essa questão não tinha peso, pois, como vimos, os movimentos planetários eram tratados em separado, de modo que cada planeta tinha o seu modelo descritivo, não havendo relação entre eles. Tomando essa posição, esse procedimento astronômico não precisava se perguntar porque há uma relação entre os tempos e distâncias dos planetas entre si; e nem necessitaria saber o que leva os planetas a terem mais velocidade quando perto do centro, e menos quando longe desse.

Com Kepler, ao contrário, a astronomia pergunta-se sobre essas questões; e é acerca dessas questões que a astronomia kepleriana obterá significação, quando desenvolver os modelos de

explicações dinâmicas, alicerçadas na investigação das causas físicas dos movimentos celestes.

Contudo, no *Mysterium Cosmographicum*, Kepler ainda não tinha condições de operacionalizar um modelo de dinâmica celeste. Nessa obra, ele apenas podia afirmar que o universo é constituído de uma estrutura matemática subjacente aos acontecimentos celestes; sendo que essa estrutura é apta a ser apreendida pelo conhecimento humano, e a ser expressa em forma de leis universais, mas isso sem respaldo empírico. Isso é sentido na tentativa kepleriana de explicar as variações de velocidades e tempos dos planetas, quando ele, no capítulo XXII do *Mysterium*, assume o equante(13) ptolomaico. Segundo pensava Kepler, mediante esse expediente de cálculo poder-se-ia descrever os movimentos a partir da relação entre as variações de velocidades como os tempos. Assim, nessa obra de 1596, Kepler usava os artifícios matemáticos de sua época para salvar as aparências dos movimentos planetários, mas isso por não possuir, ainda, condições para desenvolver um modelo de dinâmica celeste.

Dessa maneira, a preocupação kepleriana em estabelecer uma proporção entre as distâncias e os tempos, levou-o a investigar por que um planeta perde velocidade quanto mais longe está do Sol, e isso se dará, na *Astronomia Nova*, por razões físicas, ou melhor, dinâmicas.

Apesar de Kepler no *Mysterium* tratar dessas questões, que são a base do seu tratamento posterior à astronomia, ele se deparou com problemas para a justificação da sua hipótese dos sólidos perfeitos. O seu problema era a falta de dados observacionais precisos para a comprovar a sua hipótese dos sólidos perfeitos, pois as observações que ele tinha em mãos foram computadas mediante as tabelas copernicanas de sua época(14). As observações elaboradas via essas tabelas, admitidas por Kepler no ajustamento dos sólidos nas esferas, eram deficientes, pois apresentavam erros para a obtenção das excentricidades.

Kepler precisava dos seguintes dados: encontrar as distâncias médias dos planetas ao centro de movimentos, o Sol, para,

consequentemente, determinar a excentricidade de suas órbitas. Em outras palavras, precisava encontrar melhores dados sobre os posicionamentos dos planetas na sua longitude heliocêntrica (percurso do planeta ao longo da eclíptica), que são as distâncias médias dos planetas com relação ao Sol, e para encontrar essas distâncias faz-se necessário saber qual é a excentricidade. O problema era que pelas tabelas Prutênicas, baseadas na teoria de Copérnico, a excentricidade estava no centro da órbita terrestre, o que ocasionava erros de 10' de arco(15) para as previsões dos movimentos, isto é, pelas tabelas Prutênicas, os posicionamentos previstos não eram precisos, implicando na impossibilidade de Kepler encaixar as esferas nos sólidos. Para resolver tal dificuldade, deve-se, segundo Kepler, corrigir as excentricidades admitidas até então, o que permitirá comprovar a sua hipótese dos sólidos perfeitos, (*idem*, p. 181):

> "... Pois, é minha opinião que após a descoberta dessas proporções no céu, tudo o que nos impede de atingir exato conhecimento dos movimentos deve ser atribuído aos erros nas excentricidades; e se esses erros forem removidos, penso que os cinco sólidos darão assistência aos astrônomos práticos, para a correção dos movimentos."

Em vista desses problemas, Kepler não rejeitou a sua hipótese dos sólidos perfeitos, mas considerou o erro estando no procedimento de Copérnico, quando esse colocou o centro de movimentos não no Sol, mas no centro da órbita terrestre. Subseqüentemente, ao obter os dados de Brahe, Kepler passará a procurar valores corretos para as excentricidades, de modo a poder corroborar a sua hipótese dos sólidos perfeitos. Contudo, ele não obterá sucesso em tal tarefa, mas obterá dados significativos para elaborar as suas duas primeiras leis dos movimentos planetários.

5. Tycho Brahe e os Dados Observacionais

Na procura de melhores dados observacionais para a comprovação da sua hipótese dos sólidos perfeitos, Kepler virá, em 1600, a travar relações com o melhor astrônomo observacional de sua época, o dinamarquês Tycho Brahe, que obteve as melhores observações planetárias conhecidas antes da invenção do telescópio, com um erro aproximado de apenas 2' de arco, algo mais eficiente do que qualquer outra observação já realizada.

Tycho Brahe tomou conhecimento do *Mysterium Cosmographicum* de Kepler, e, de uma certa forma, ele o apreciou, principalmente no que concerne ao tratamento engenhoso de Kepler para encaixar os sólidos perfeitos nas esferas celestes. Contudo, Brahe levantou uma série de críticas que, pode-se afirmar, influenciaram na elaboração da *Astronomia Nova*. As críticas foram dirigidas basicamente contra os seguintes tratamentos operados no *Mysterium Cosmographicum*: 1) metafísica kepleriana, contra a crença de Kepler de se poder elaborar uma defesa *a priori* do copernicanismo, obtendo assim, segundo Brahe, mais uma cosmologia do que uma astronomia física; 2) contra a hipótese dos sólidos perfeitos, pois Brahe descobriu que os cometas não são fenômenos atmosféricos, mas corpos celestes que se movem em torno de um centro, o que, consequentemente, refuta a idéia de esferas sólidas de cristais; 3) contra os dados observacionais utilizados por Kepler em sua obra de 1596, dados esses que apresentavam uma margem apreciável de erros. Além dessas críticas, que Kepler absorveu, Brahe também criticou a defesa do copernicanismo levantada por Kepler, sendo que por essa Kepler não se deixou influenciar. Essas objeções de Brahe aparecem na correspondência entre os dois; por exemplo, numa carta de Brahe a Kepler de 1598 é escrito (retirada de Koyré, 4, p. 160):

> "Mas eu não direi que podeis ter razão em tudo. Se utilizardes os valores verdadeiros das excentricidades dos planetas, que eu es-

tou procurando, num trabalho de vários anos, poder-se-á obter uma verificação mais precisa."

Brahe critica os dados utilizados por Kepler, que não apresentam valores suficientemente precisos para as excentricidades planetárias. Porém, mais importante que essa crítica, aponta Brahe numa outra carta , de 1599, (*idem*, p. 162):

> ".... eu não posso aprovar inteiramente os vossos escritos engenhosos, pelos erros que cometeis...., a saber, que atribuis uma certa realidade às órbitas celestes, a fim de facilitar as imaginações copernicanas, e de podê-las representar mais facilmente. Que os movimentos celestes observam uma certa simetria, e que eles assim o fazem porque eles acompanham seus circuitos ao redor de um centro, ou de um outro, a distâncias diferentes da Terra ou do Sol, eu não nego. Mas a harmonia e a proporção desses arranjos devem ser [pesquisados] *a posteriori*, onde os movimentos e as ocasiões dos movimentos são estabelecidos exatamente, e não determinados *a priori*, como vós e Maestlin fazem."

Ou seja, Brahe não aceita uma astronomia construída *a priori*, como a feita por Kepler mediante a hipótese dos sólidos perfeitos, que é fruto mais da intencionalidade de se obter uma representação harmônica sobre os movimentos celestes, do que uma investigação elaborada a partir dos dados observacionais, de modo a se poder construir, via esses dados, uma teoria celeste. Para Brahe, encontrar uma representação do mundo celeste como a dada pela hipótese dos sólidos perfeitos é ferir os princípios de uma ciência física, de uma ciência empírica, justamente pelo caráter apriorístico de Kepler dado no *Mysterium Cosmographicum*. Para o astrônomo dinamarquês, a astronomia deve ser elaborada com bases empíricas.

Kepler considerará, e muito, essas críticas de Brahe na *Astronomia Nova*. Nessa obra de 1609, os dados observacionais obterão um peso significativo, pois eles não serão, em nenhum mo-

mento dessa obra, questionados acerca da sua precisão e poder, e servirão como elementos importantes para a elaboração e testes das hipóteses sobre a verdadeira forma das órbitas planetárias.

Além dessa questão epistemológica, uma outra contribuição brahiana para o trabalho de 1609, como foi dito acima, foi a descoberta de que não existem órbitas sólidas, dada pela observação de que os cometas não são fenômenos atmosféricos, mas que estão localizados na região compreendida pela esfera das estrelas fixas, ocasionando a não aceitação da tese de incorruptibilidade dos céus e, consequentemente, que as esferas feitas de cristais podem ser transpostas pelos cometas. Isso teve duas conseqüências salutares para Kepler. A primeira foi o abandono de uma explicação dos movimentos planetários via a hipótese dos sólidos perfeitos, pois, como não existem esferas sólidas de cristais – ou, pelo menos, as suas existências ficam comprometidas –, não é viável que existam sólidos perfeitos inscritos e circunscritos nas esferas das órbitas. Mediante isso, Kepler passará a procurar, na *Astronomia Nova*, uma nova explicação para os movimentos planetários, não mais vinculada à uma explicação dada pela hipótese dos sólidos perfeitos(16).

Em segundo lugar, a descoberta de Brahe representou, para Kepler, a possibilidade de utilização de um modelo dinâmico, baseado principalmente no conceito de força magnética exercida pelo Sol nos planetas, substituindo a visão tradicional de almas ou inteligências planetárias.

A concepção dinâmica de Kepler no *Astronomia Nova*, teve, pelas objeções levantadas e as observações astronômicas utilizadas, uma influência muito sensível de Brahe. Não apenas pela consciência obtida por Kepler da importância da fundamentação empírica para a astronomia, mas, principalmente, pela possibilidade desse astrônomo romper com uma astronomia alicerçada na concepção de um universo fechado entre esferas sólidas de cristais, em que os movimentos eram determinados por uma faculdade anímica, o que impossibilitava um tratamento de cunho estritamente mecanicista.

Após Brahe ter escrito uma série de cartas a Kepler, elogiando e criticando a hipótese dos sólidos perfeitos, ele pede a Kepler que venha a se unir a ele na Dinamarca, argumentando que Kepler poderia, se assim o fizesse, obter dados mais relevantes sobre as excentricidades dos planetas. Kepler une-se a Tycho em 1600, e a partir desse encontro começa a desenhar-se o seu trabalho subsequente em astronomia, obtendo seu ponto máximo com a redação da *Astronomia Nova*, que contém as suas duas primeiras leis dos movimentos planetários.

Na realidade, o encontro entre os dois astrônomos ligou-se a interesses de ambas as partes. Kepler, como foi dito, precisava de Brahe para alcançar dados mais precisos sobre os planetas, para a comprovação da sua hipótese dos sólidos perfeitos, Por outro lado, Brahe, conhecendo o *Mysterium Cosmographicum* e, consequentemente, o talento de Kepler para elaborar uma teoria do universo, precisava que ele, de uma certa forma, justificasse a sua teoria híbrida de movimentos planetários.

Tycho Brahe elaborou um sistema alternativo ao de Copérnico e Ptolomeu. Enquanto que Copérnico posicionava o Sol no centro e os planetas movimentando-se ao seu redor, e Ptolomeu a Terra ao centro e o Sol e os planetas perfazendo movimentos ao redor dessa, Brahe, por ser um aristotélico e, portanto, considerar como determinantes as objeções de caráter físico contra o movimento da Terra, elaborou um sistema híbrido, no qual a Terra está imóvel no centro de movimentos, o Sol e a Lua giram ao seu redor, enquanto que os planetas giram ao redor do Sol.

Assim, em 1600 os dois travam relações, e dessas surgem os elementos observacionais para Kepler elaborar a *Astronomia Nova*. Esses elementos são, principalmente, os dados do planeta Marte, coletados por Brahe, com os quais Kepler passará a trabalhar.

Notas

(1) O axioma platônico de movimentos circulares e uniformes pregava que as irregularidades (não observação dos movimentos dos planetas como circulares e uniformes) constatadas deveriam ser corrigidas mediante a composição dos movimentos até se chegar ao instituído pelo axioma. Desse modo, os astrônomos gregos e medievais construíram uma série de artifícios geométricos, tais como o epiciclo com deferente, para a adequação das irregularidades ao princípio exposto pelo axioma.

(2) A interpretação instrumentalista da astronomia dessa época estava alicerçada na crença da impossibilidade do intelecto humano determinar a verdade ou a falsidade das hipóteses astronômicas, de modo que os astrônomos deveriam elaborar hipóteses que procuravam determinar os posicionamentos dos planetas, para a confecção de tabelas, da maneira mais simples e precisa possíveis, sem se preocuparem com a veracidade ou não das suas conjecturas. Essa postura metodológica adotada na astronomia pré-kepleriana era um reflexo do estatuto dessa ciência; ela era considerada uma ciência matemática, que importava os princípios físicos necessários para a elaboração de tabelas da filosofia natural, sem se preocupar em estudá-los.

(3) Galileu, assim como outros nomes importantes da época de Kepler, consideraram o *Mysterium Cosmographicum*, como uma obra não científica, mas de cunho místico. Isso se deu, principalmente, pela hipótese da inscrição e circunscrição dos sólidos perfeitos nas esferas das órbitas dos planetas, que era vista como um sonho, um fruto da imaginação, sem características de um procedimento científico.

(4) Excentricidade é a distância entre o centro físico de movimentos e o ponto que determina os movimentos como circulares e uniformes.

(5) Na época de Kepler, somente seis planetas eram conhecidos, na ordem: Saturno, Júpiter, Marte, Terra, Vênus e Mercúrio (isso, é claro, admitindo-se o sistema copernicano). Os outros planetas só foram descobertos após essa época. Netuno foi visto pela primeira vez no século XVIII; Urano, no século XIX, e Plutão, apenas no século XX.

(6) Primeiro Movimento é o movimento que o planeta realiza sobre o seu próprio eixo, chamado de movimento de rotação.

(7) Copérnico restringiu a sua astronomia a uma cinemática celeste ao aceitar, inquestionavelmente, o axioma platônico. Por ser um fiel seguidor do princípio da circularidade e uniformidade, Copérnico foi obrigado a posicionar o centro de movimentos não no próprio corpo do Sol, mas num ponto no interior da órbita da Terra, de modo que esse ponto é, na realidade, um ponto matemático, e não físico. Copérnico assim o fez para poder compor os movimentos irregulares, tal como o movimento não uniforme – dado pela variabilidade das distâncias de um planeta ao Sol.

(8) Deve-se salientar que Kepler, quando redigiu o *Mysterium Cosmographicum*, discutiu apenas dois sistemas de mundo, o geocêntrico e o heliocêntrico, não considerando, pois não conhecia, ainda, o sistema de Brahe. Na *Astronomia Nova*, Kepler considerará o sistema de Brahe; e argumentará não apenas com a intenção de mostrar a primazia de Copérnico sobre Ptolomeu ou sobre Brahe, mas no sentido de dar provas suficientes da verdade do heliocentrismo e, também, procurará deixar claro a impossibilidade de qualquer outro sistema ser adequado para fornecer explicações e descrições dos movimentos celestes.

(9) Movimento retrógrado era uma irregularidade dos movimentos dos planetas constatada pelas observações astronômicas. Um planeta, qualquer que seja, é visto, ao longo de seu trajeto anual, com alterações em seu percurso. Num determinado momento, o planeta parece parar, noutro, volta e, depois, continua o seu percurso. Isso era entendido como uma retrogradação dos movimentos do planeta. Ver figura 2.

(10) Epiciclos e deferentes eram artifícios matemáticos utilizados para dar conta das irregularidades dos movimentos planetários. O planeta realiza movimentos circular ao longo do epiciclo, cujo centro realiza movimento circular sobre o círculo deferente, o qual contém o centro de movimentos, de modo a se pode conjugar os movimentos dos planetas como circulares e uniformes, adequando os movimentos ao axioma platônico.

(11) Esse objetivo só foi plenamente obtido com a terceira lei dos movimentos planetários, que afirma que o cubo das distâncias é proporcional ao quadrado dos tempos; essa lei é denominada de "lei harmônica", e está exposta na obra de Kepler *Harmonia do Mundo*, de 1619.

(12) Utilizamos, para essa citação, a tradução de ª Koestler, contida na sua obra *Os Sonâmbulos*, p. 176.

(13) Equante, ou *punctum aequans*, era um artifício matemático utilizado por Ptolomeu para explicar as mudanças de velocidades dos planetas, isto é, para explicar a não uniformidade dos movimentos dos planetas. O equante era um ponto matemático, localizado fora do centro físico de movimentos, e por ele se pode obter arcos de circunferência iguais em tempos iguais.

(14) As tabelas confeccionadas segundo as hipóteses heliocêntricas, existentes quando Kepler redigiu o *Mysterium Cosmographicum*, apresentavam erros sensíveis para a precisão dos posicionamentos dos planetas. Somente com Brahe é que tal problema diminui.

(15) Os posicionamentos planetários eram determinados segundo a divisão do zodíaco em 360 graus, dividindo-se cada grau em 60 minutos e cada minuto em 60 segundos. Assim, 10' de erro correspondiam a 1 sexto de grau.

(16) Na verdade, Kepler não utilizou a hipótese dos sólidos perfeitos na *Astronomia Nova*, mas nunca abandonou a idéia de obter a representação harmônica do cosmo. Na sua obra de 1619, *Harmonia do Mundo*, na qual está exposta a sua terceira lei dos

movimentos planetários, ele retoma a utilização dos sólidos, mas os substitui pela idéia de que o cosmo foi formado via uma harmonia semelhante à estrutura musical.

Referências Bibliográficas

1. COHEN, I.B. *O Nascimento de uma nova física*. São Paulo, Edart, 1976.
2. HANSON, N.R. *Constelaciones y conjeturas*. Madrid, Alianza Universidad, 1985.
3. KEPLER, J. *Mysterium Cosmographicum*. New York, 1981.
4. Koyré, A. *La révolution astronomique*. Paris, 1961.