

AUTORIZADO o fornecimento de  
cópias da tese a interessados.

CLAUDEMIR ROQUE TOSSATO

***O PROCESSO DE ELABORAÇÃO DAS DUAS PRIMEIRAS  
LEIS KEPLERIANAS DOS MOVIMENTOS PLANETÁRIOS***

SBD-FFLCH-USP



141345

**Departamento de Filosofia  
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas  
Universidade de São Paulo  
São Paulo, Julho de 1997**

**SÃO PAULO  
1997**

CLAUDEMIR ROQUE TOSSATO

***O PROCESSO DE ELABORAÇÃO DAS DUAS PRIMEIRAS  
LEIS KEPLERIANAS DOS MOVIMENTOS PLANETÁRIOS***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia da Faculdade de Filosofia, Ciências Humanas e Letras da Universidade de São Paulo, como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Filosofia.

Claudemir Roque Tossato

Prof. Dr. Pablo Rubén Mariconda  
Orientador

**Departamento de Filosofia  
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas  
Universidade de São Paulo  
São Paulo, Julho de 1997**

**SÃO PAULO  
1997**

AOS MEUS PAIS, ROQUE E ÂNGELA

## AGRADECIMENTOS

À CAPES, pela bolsa de estudos concedida nos anos de 1993 a 1996.

Ao Pablo Rubén Mariconda, que orientou e incentivou o meu projeto desde a graduação, dando-me contínuas provas de respeito e honestidade, tanto no trabalho acadêmico, quanto no convívio pessoal.

Aos Profs. Caetano Ernesto Plastino e Luís Henrique dos Santos (Depto. de Filosofia da FFLCH/USP), que leram, comentaram e criticaram o texto apresentado no exame de qualificação e fizeram importantes sugestões para a continuação desta dissertação.

Ao Prof. Dr. Jean-Jacques Szczceniars da Universidade de Paris VII, pelas sugestões propostas para esta dissertação.

Aos colegas da pós-graduação, particularmente ao Paulinho, Robinson, Maurício, Fátima, Walter, Guilherme, Eduardo, Júlio, Regina, Bia, Alberto, Roberto, Vângela, Márcio e Zé, pelas discussões e incentivos propiciados ao longo do desenvolvimento da dissertação.

Aos funcionários do Departamento de Filosofia da Universidade de São Paulo pela atenção e auxílio dispensados durante a elaboração desta dissertação.

À Araci, que sempre me apoiou, principalmente nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos e familiares, em especial à minha irmã Luci, aos meus tunchados, e aos meus sobrinhos, particularmente ao Daniel.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	1
1. O AXIOMA PLATÔNICO.....	9
1.1. A Estipulação do Axioma Platônico.....	9
1.2. O Método Astronômico do Período Pré-Kepleriano.....	11
1.3. A Força do Axioma Platônico.....	15
1.4. A Astronomia Cinemática.....	19
1.4.1. Ptolomeu.....	20
1.4.2. Copérnico.....	25
2. <i>MYSTERIUM COSMOGRAPHICUM</i> : OS ANTECEDENTES DAS LEIS KEPLERIANAS DOS MOVIMENTOS PLANETÁRIOS.....	30
2.1. Introdução.....	30
2.2. Os Sólidos Perfeitos.....	33
2.3. A aceitação do Copernicanismo.....	38
2.4. O Esboço das Leis.....	45
2.5. Tycho Brahe e os Dados Observacionais.....	48
3. A OBTENÇÃO DA SEGUNDA LEI DOS MOVIMENTOS PLANETÁRIOS.....	52
3.1. O <i>Astronomia Nova</i> , seus Objetivos e Etapas.....	52
3.2. Primeiros Resultados - A Hipótese Vicária.....	59
3.3. O estudo do Movimento da Terra.....	74
3.4. O Conceito de Força - Primeira Formulação.....	78
3.4.1. A Postulação de uma Força Motriz para Explicar o Comportamento Irregular dos Movimentos Planetários.....	79
3.4.2. A Natureza da Força Motriz.....	87
3.4.3. Força Motriz e Circularidade.....	95
3.5. A Segunda Lei.....	100

4. A OBTENÇÃO DA PRIMEIRA LEI DOS MOVIMENTOS PLANETÁRIOS.....	114
4.1. Introdução.....	114
4.2. O Abandono da Hipótese Circular.....	117
4.3. A Hipótese da Órbita Oval.....	125
4.4. Segunda Formulação do Conceito de Força - O Movimento de Libração.....	138
4.5. A Obtenção da Primeira Lei.....	148
5. CONCLUSÃO.....	162
GLOSSÁRIO.....	172
BIBLIOGRAFIA.....	175

## INTRODUÇÃO

As duas primeiras leis dos movimentos planetários de J. Kepler, a lei que afirma que a forma desses movimentos é elíptica, sendo que o Sol está num dos focos (primeira lei), e a lei segundo a qual os planetas, ao longo de suas trajetórias elípticas, percorrem áreas iguais em tempos iguais (segunda lei), estipuladas na sua principal obra astronômica, *Astronomia Nova*, editada em 1609, ocupam um papel singular dentro da história da astronomia e da Revolução Científica do século XVII. Essas leis representam o rompimento com o padrão teórico que conduziu os trabalhos astronômicos desde a época de Platão até o surgimento dessas leis, o chamado axioma platônico de movimentos circulares e uniformes.

Esse axioma determinou todo o procedimento metodológico para a formulação de hipóteses astronômicas acerca dos posicionamentos planetários, transformando essa ciência numa cinemática celeste. Assim, a astronomia tratou as suas hipóteses como construções matemáticas, desprovidas de considerações de ordem física, ocorrendo uma separação entre essas duas ciências (Astronomia e Física). Todos, ou quase todos, os astrônomos dos gregos a Kepler aceitaram esse axioma no que concerne à estipulação de modelos descritivos dos posicionamentos planetários.

Kepler foi o primeiro astrônomo a não aceitar tal axioma como princípio condicionador das descrições dos movimentos planetários. Mas isso ocorreu só ao final de uma exaustiva tentativa de ajustamento dos dados observacionais a esse axioma. O rompimento da circularidade e uniformidade foi alcançado após diversas tentativas de adequação empírica a esse padrão teórico, de modo que o abandono do axioma platônico foi fruto da constatação de Kepler da impossibilidade de se alcançar tal objetivo.

A ruptura kepleriana deveu-se, fundamentalmente, a três pontos do seu tratamento astronômico.

Em primeiro lugar, a crença na existência de uma estrutura matemática subjacente aos acontecimentos do mundo celeste, isto é, o pitagorismo kepleriano, que condicionou os seus trabalhos na tentativa de encontrar um sistema harmônico descritivo e explicativo dos acontecimentos do Cosmo. A tentativa kepleriana de expressar a natureza de tais acontecimentos através de regularidades matematicamente formuladas, as chamadas leis naturais, é em parte responsável pelo abandono da perspectiva instrumentalista na astronomia kepleriana.

Em segundo lugar, o papel que os dados observacionais ocupam na formulação das leis dos movimentos planetários. Para Kepler, o fator empírico deve ser o responsável tanto pela formulação de hipóteses, quanto pelo teste dessas hipóteses. Em outras palavras, os dados observacionais passam a ter um papel central na aceitabilidade das soluções teóricas.

Finalmente, em terceiro lugar, e pode-se dizer que este é o fator mais importante, está a procura kepleriana de determinar as causas físicas dos movimentos celestes. Em outras palavras, Kepler, enquanto astrônomo, passa a procurar pela explicação dos movimentos planetários. Kepler foi o primeiro astrônomo da época moderna a tratar a astronomia não apenas como uma ciência matemática descritiva, ou uma cinemática, dos movimentos planetários, mas também, e principalmente, como uma dinâmica, elaborando hipóteses de caráter físico para explicar porque a órbita planetária tem uma determinada forma e satisfaz a uma relação matemática entre áreas e tempos. Tal explicação é tentada por Kepler mediante a introdução do conceito de “Força”, em que o Sol exerce sobre os planetas uma espécie de força magnética, que os faz moverem-se elipticamente, percorrendo nessa trajetória áreas iguais em tempos iguais. Com a introdução do conceito de força, Kepler pretendia mostrar que suas leis tinham um alcance maior do que a mera adequação empírica, mas podiam conduzir a uma explicação do comportamento planetário.

Neste sentido, a dissertação sobre o processo de elaboração das duas primeiras leis dos movimentos planetários objetiva apresentar a ruptura dessa elaboração com relação ao axioma platônico de movimentos circulares e uniformes, mostrando que tal ruptura foi fruto dos três pontos do tratamento kepleriano à astronomia, apontados acima: a suposição de uma estrutura matemática subjacente aos acontecimentos do mundo celeste; a utilização dos dados observacionais como parâmetros para a elaboração e o teste de hipóteses acerca dos



movimentos; e, principalmente, a admissão de causas físicas explicativas para as leis cinemáticas desses movimentos (dinâmica celeste). Mediante esse terceiro critério, Kepler pôde elaborar uma astronomia não meramente cinemática, mas uma astronomia dinâmica, rompendo, dessa maneira, com o princípio de circularidade e uniformidade, pelo fato desse princípio não permitir uma explicação de cunho natural, sendo empregado apenas, com boas razões, num contexto cinemático.

Deve-se destacar que a apresentação das leis é relatada tal como ela está exposta na obra que apresenta essas leis, o *Astronomia Nova*, em especial na terceira e quarta partes.

Para a realização dessa tarefa, será necessário destacar os principais pontos contidos no processo de ruptura com o axioma. A dissertação não tem como objetivo fazer uma história da astronomia dos gregos até Kepler, trabalho demasiadamente amplo, mas o de levantar os principais tópicos do processo de elaboração das duas primeiras leis, ressaltando sua principal consequência, a saber, o abandono gradativo do axioma platônico.

Desse modo, a dissertação procura fazer um levantamento das origens do axioma em Platão, seu caráter de condicionador das hipóteses astronômicas, relacionando essa problemática em Aristóteles. Também é apresentada a força do axioma não apenas sob o ponto de vista metafísico, mas, também, físico, isto é, a aplicabilidade do axioma na resolução de problemas práticos, de elaboração dos posicionamentos planetários.

Seguindo essa linha, a dissertação trata, mesmo que brevemente, do modelo adotado por Ptolomeu, que consolidou a separação entre astronomia e física.

No que concerne aos trabalhos de Kepler, se faz necessário apresentar as principais idéias contidas na sua primeira obra astronômica, o *Mysterium Cosmographicum* (1596), que contém as idéias básicas de Kepler, a sua defesa do copernicanismo, com especial ênfase na possibilidade de tratamento sistemático da astronomia; e, também, o esboço das leis, contidos na determinação da relação entre os tempos e as distâncias dos planetas ao Sol.

A dissertação exporá também a importância dos dados observacionais de T. Brahe, fazendo a relação entre a idéia do *Mysterium*, que não continha os dados de Brahe, e, desse modo, presa ainda a uma idéia puramente metafísica, e a formulação das leis, no

*Astronomia Nova*, que introduz no trabalho os dados observacionais de T. Brahe, conduzindo à ruptura com o axioma.

Quanto ao *Astronomia Nova*, a dissertação apresenta as principais etapas para a elaboração das duas primeiras leis, contidas principalmente na terceira e na quarta partes.

Para tanto, a dissertação está constituída por cinco capítulos, cujos conteúdos são expostos a seguir.

No primeiro capítulo faz-se uma exposição do “Paradigma da Circularidade e Uniformidade”. Nesse capítulo será apresentada a formulação do axioma platônico, os argumentos a seu favor e os principais sistemas astronômicos que estiveram sob o domínio desse paradigma, o modelo ptolomaico e o sistema copernicano.

A apresentação dos sistemas apontados acima concentrar-se-á na exposição do tratamento astronômico voltado para a adequação dos dados observacionais (que detectavam irregularidades quanto à circularidade e uniformidade dos movimentos planetários) ao axioma platônico<sup>1</sup>, destacando a ruptura ocorrida entre uma astronomia puramente descritiva e uma astronomia física, isto é, a procura de detectar melhores sistemas que ajustassem os dados à exigência do axioma levou a um abandono da astronomia em encontrar razões explicativas para os movimentos planetários, concentrando-se, apenas, em elaborar expedientes matemáticos que melhor descrevessem os movimentos, independentemente da verdade ou falsidade desses expedientes matemáticos. A astronomia não tratava de causas físicas, os princípios físicos necessários eram “importados” dos físicos. O trabalho astronômico ficou assim restrito a um tratamento cinemático<sup>2</sup>.

O capítulo 1 mostrará também que o axioma platônico é mantido mesmo pelo trabalho revolucionário de Copérnico, que ainda se mantém preso ao paradigma da circularidade e uniformidade.

No segundo capítulo são apresentados os antecedentes do pensamento kepleriano para a obtenção das duas primeiras leis dos movimentos planetários. Tais antecedentes

---

<sup>1</sup>A dissertação não terá como objetivo fazer uma exposição detalhada de todos esses sistemas, apenas destacará os elementos envolvidos na discussão sobre a quebra do axioma platônico, em especial os relativos às hipóteses de caráter descritivo.

<sup>2</sup>À exceção de Aristóteles, que procurou, mediante o sistema eudoxiano de esferas concêntricas encaixadas umas nas outras, admitir um centro físico de movimentos.

encontram-se na sua primeira obra astronômica, o *Mysterium Cosmographicum*, de 1596, obra essa que contém a hipótese dos sólidos perfeitos inscritos e circunscritos nas órbitas planetárias, sendo que isso, para Kepler, representaria a constituição do universo.

Essa obra apresenta os principais elementos da cosmologia, ou metafísica, kepleriana, de cunho eminentemente pitagórico. Para Kepler, o universo foi constituído segundo uma estrutura harmônica, que é subjacente aos fenômenos celestes. A astronomia pode encontrar tal estrutura.

Dessa maneira, o capítulo tratará da defesa ou aceitação do copernicanismo por parte de Kepler, tal como se encontra, principalmente, no primeiro capítulo do *Mysterium*. A sua aceitação reside basicamente no fato do copernicanismo permitir estruturar o universo, criando a idéia de um sistema ordenado (algo que o modelo ptolomaico não permitia, pelo motivo de fornecer aos movimentos planetários um tratamento particularizado para cada planeta, não relacionados a um todo). Em outras palavras, o copernicanismo permite ordenar o universo em forma de um sistema único, em que as partes têm relação com o todo; há uma simetria entre as partes e o todo.

Também será apresentada a primeira formulação (ou esboço) das leis, contidas no capítulo XX do *Mysterium Cosmographicum*. Esse esboço trata da relação entre tempos e distâncias percorridas pelo planeta em torno de seu centro (Sol).

Finalmente, discutirei a importância dos dados observacionais de Brahe. Os dados desse astrônomo foram importantes pois, posteriormente, no *Astronomia Nova*, permitiram a Kepler romper com o axioma platônico.

No terceiro capítulo, inicialmente, serão apresentados os objetivos do *Astronomia Nova* (obtenção de uma melhor teoria sobre os movimentos do planeta Marte, baseada em considerações físicas); em seguida, será apresentada a obtenção da segunda lei (lei das áreas); a qual foi obtida antes que a primeira (lei da forma elíptica da órbita planetária); assim, a dissertação manterá o mesmo itinerário kepleriano.

Serão apresentadas a seguir as etapas para a obtenção da lei das áreas, que são basicamente as seguintes:

1. Formulação da hipótese vicária (contida na segunda parte do *Astronomia Nova*). Essa hipótese consistia em assumir um equante ptolomaico para a determinação dos

posicionamentos do planeta Marte na linha das apsides com o objetivo de encontrar a excentricidade da órbita. Nesse estágio da investigação, e até o final da quarta parte do *Astronomia Nova*, Kepler trabalhou na determinação da órbita de Marte com base nos dados observacionais sobre os posicionamentos de Marte coletados por Brahe. Entretanto, a hipótese vicária estava formulada em completo respeito ao axioma platônico. Essa aceitação da circularidade e uniformidade dos movimentos celestes por parte da hipótese vicária estará na origem de muitos erros, cujo reconhecimento servirá posteriormente como instrumental de trabalho para a formulação das leis.

2. Estudo do movimento da Terra, contido na terceira parte do *Astronomia Nova*. Kepler elaborou o estudo dos movimentos da Terra para saber se este planeta move-se do mesmo modo que os outros, isto é, se também tem uma excentricidade. Como resultado, Kepler obteve uma primeira formulação da lei das distâncias (a velocidade é inversamente proporcional à distância do centro); uma formulação errada, mas que foi um passo importante na direção da formulação correta da segunda lei.

3. Estipulação do conceito de “força”, em sua primeira formulação, (contido na terceira parte do *Astronomia Nova*). Para explicar o comportamento dos planetas mediante o estipulado pela falsa lei das distâncias (o planeta perde velocidade quando está longe do Sol, e ganha quando está perto desse), Kepler postulou que isso se dá mediante uma espécie de força magnética exercida pelo Sol nos planetas. Subseqüentemente, na quarta parte, Kepler concluirá que essa força é a responsável pelo planeta mover-se elipticamente.

4. Obtenção da segunda lei (contida na terceira parte do *Astronomia Nova*). A segunda lei nasceu como uma hipótese suplementar, ou auxiliar, dentro do processo de obtenção da forma da órbita de Marte. Na tentativa de encontrar uma órbita que se adequasse aos dados de Brahe, Kepler notou que o planeta percorre áreas iguais em tempos iguais, sem saber, contudo, se essa lei era correta ou não. Somente após a formulação da primeira lei é que Kepler admitirá a formulação da segunda lei.

O quarto capítulo será dedicado à obtenção da primeira lei (contida na quarta parte do *Astronomia Nova*). Serão apresentadas as principais etapas para a formulação dessa lei, que são as seguintes:

1. Recusa da órbita como circular. Após ter formulado a hipótese suplementar (que é a lei das áreas), Kepler passa a investigar qual é a forma dos movimentos de Marte, realizando para isso um teste das hipóteses, tendo como critério os dados observacionais de Brahe. Como primeiro resultado, Kepler alcança a impossibilidade dessa órbita ser circular.

2. Elaboração e teste da hipótese ovalada. Pelos resultados obtidos até esse momento do *Astronomia Nova*, Kepler notou que a órbita se “achata” nas longitudes heliocêntricas (posições mais afastadas da linha das apsides), notando que essa órbita tem uma forma ovalada, sem saber, contudo, que espécie de oval ela é.

3. Apresentação da segunda estipulação do conceito de força, mostrando que os movimentos de oscilações ocorridos nos diâmetros dos epiciclos utilizados como instrumentos de trabalho são, na realidade, variações no raio vetor que une o planeta ao Sol, e, desta forma, a explicação dada mediante o conceito de força é adequada, como uma explicação natural, para a admissão da órbita como elíptica.

4. Obtenção da primeira lei. Kepler testou a hipótese ovalada, alcançando, mediante o concurso dos dados observacionais, da hipótese suplementar e do conceito de força, a primeira lei, que diz que a forma das órbitas planetárias é elíptica.

O capítulo quinto será uma conclusão acerca do procedimento kepleriano. Após a obtenção das duas primeiras leis, quebra-se com o pressuposto da circularidade e uniformidade. Neste sentido, a astronomia de Kepler rompe com a tradição desde Platão. O capítulo apresentará os resultados ou elementos, extraídos da obtenção das leis (a aplicação da matemática, o papel dos dados observacionais e o conceito de força), bem como a união entre física e astronomia operada por Kepler. Será destacado, também, o caráter de explicação que obtém o conceito de força, não como uma explicação formal, mas como um modelo que procura dar plausibilidade às especulações de ordem física (dinâmica) para a determinação dos movimentos planetários.

Além disso, uma pequena apresentação do caráter realista das hipóteses keplerianas, rompendo com a postura instrumentalista adotada em sua época na astronomia.

Deve-se destacar que as obras astronômicas de Kepler envolvidas na elaboração dessas duas primeiras leis, tanto o *Mysterium Cosmographicum*, quanto o *Astronomia Nova*, são de difícil leitura, impossibilitando um tratamento detalhado sobre todos os pontos

contidos nelas - algo que demandaria um trabalho de maior fôlego. Neste sentido, foram tratadas apenas as partes que dizem respeito diretamente à quebra com o axioma platônico. Além disso, a dissertação apoiou-se grandemente nos comentários feito por Alexandre Koyré, especialmente na sua obra *La Révolution Astronomique*, que apresenta comentários muito satisfatórios acerca do processo de elaboração das leis, e, também, na obra de Gérard Simon, *Kepler, Astronome Astrologue*, que apresenta informações extremamente salutares quanto às obras de Kepler, referidas acima, bem como às questões astronômicas envolvidas nos trabalhos de Kepler para a obtenção das suas duas primeiras leis dos movimentos planetários.

## 1. O AXIOMA PLATÔNICO

### 1.1. A Estipulação do Axioma Platônico

A astronomia pré-kepleriana foi profundamente marcada por um posicionamento metodológico que condicionou todas, ou quase todas, as formulações referentes à elaboração de modelos descritivos acerca dos movimentos planetários; tal posicionamento foi a aceitação de um princípio regulador para a construção dos referidos modelos, denominado de axioma platônico de movimentos circulares e uniformes.

Esse axioma pregava que os movimentos planetários são circulares, isto é, a trajetória do planeta em torno de seu centro de movimento tem uma forma circular, e esse movimento é realizado com velocidade uniforme, ou seja, o planeta percorre arcos de circunferência iguais em tempos iguais. Esse princípio era aplicado na elaboração de modelos descritivos dos movimentos planetários, que adequariam as irregularidades constatadas observacionalmente, isto é, os movimentos que não se apresentavam como sendo circulares e uniformes (as observações astronômicas não revelavam uma circularidade e uniformidade dos movimentos, necessitando, tendo como base a aceitação do axioma, a correção dessas irregularidades, até se encontrar um modelo descritivo que representasse os movimentos como circulares e uniformes, ou como compostos de movimentos circulares e uniformes).

O axioma platônico determinava um padrão matemático, objetivando dar inteligibilidade aos movimentos celestes; e os modelos descritivos astronômicos deveriam corrigir, mediante a combinação de movimentos circulares e uniformes, as irregularidades

observadas, ajustando-as ao que era expresso pelo axioma. Esse axioma pode ser bem compreendido segundo as palavras de Simplicio:<sup>3</sup>

“Platão admite, em princípio, que os corpos celestes se movem com um movimento circular, uniforme e constantemente regular; ele coloca então este problema aos matemáticos: quais são os movimentos circulares, uniformes e perfeitamente regulares que convém tomar como hipótese, a fim de poder salvar as aparências apresentadas pelos planetas?”

Mediante esse axioma, coube aos astrônomos aceitarem os princípios adotados pelos filósofos naturais (tais como a centralidade da Terra e a imutabilidade dos Céus), e elaborarem técnicas teóricas (geométricas) que objetivavam adequar as irregularidades constatadas observacionalmente (os movimentos de retrogradação<sup>4</sup> apresentados pelos planetas, a variabilidade das velocidades, a inconstância das distâncias dos planetas à Terra, etc.) ao modelo teórico de movimentos circulares e uniformes. Desta maneira, os astrônomos podiam criar artifícios distintos entre si, que salvavam igualmente as aparências. Podia-se “salvar as aparências” ou postulando que os planetas perfazem movimentos excêntricos, ou mediante a postulação de movimentos em epiciclos com deferentes, ou até, como fez Ptolomeu, postulando o equante. Assim, hipóteses matemáticas distintas podiam alcançar o mesmo resultado, isto é, podiam obter a mesma adequação empírica, sem que fosse possível discriminar entre elas.

Utilizando-se desse axioma, a astronomia anterior a Kepler passou a adotar um posicionamento metodológico que influenciou de uma forma sensível as suas formulações de hipóteses.

---

<sup>3</sup>Simplicio, *Aristotelis Quatuor Libros de Coelo Commentaria*, Livro 2, comentários 43<sup>a</sup> e 46. Retirado de Duhem, P., *Salvar os Fenômenos*, Cadernos de História da Filosofia da Ciência, p. 7.

<sup>4</sup>O leitor encontrará, no final da dissertação, um pequeno glossário contendo as definições dos termos técnicos e dos problemas astronômicos envolvidos na presente discussão.



## 1.2. O Método Astronômico do Período Pré-Kepleriano

Com esse procedimento estritamente matemático, desprovido de considerações de ordem física, várias hipóteses salvavam igualmente as irregularidades dos movimentos celestes, o que acarretou o abandono da determinação de qual sistema matemático seria o verdadeiro; o que contava era a resolução de problemas práticos, isto é, o sistema que melhor se adequasse aos posicionamentos planetários observados, tendo em vista a resolução de problemas tais como a elaboração de calendários, a determinação das estações, a elaboração de horóscopos, etc.

Essa questão foi bem apresentada por Aristóteles, que separou o objeto de estudo da física do objeto da astronomia, argumentando que nessa última - embora ela trate dos movimentos, da figura, se o universo é esférico ou não, se é a Terra ou outro astro o centro do universo, que são objetos do estudo da física - ela não o faz nos limites da primeira, isto é, seria objeto da física o estudo das causas dos movimentos, da centralidade do mundo, etc., enquanto que à astronomia restaria a utilização de tais princípios, para, a partir desses, construir o seu corpo de conhecimentos, segundo Aristóteles:<sup>5</sup>

“...como a astronomia difere da física ou do departamento dela? Parece absurdo dizer que os físicos mostrem supor conhecer a natureza do Sol ou da Lua, mas não conhecem os seus atributos essenciais, particularmente como nos escritos físicos que discutem suas figuras e também se a Terra ou o mundo são esféricos ou não.

“Ora, os matemáticos, embora eles também tratem dessas coisas, todavia eles não as tratam como os limites de um corpo físico, e nem consideram os seus atributos indicados como os atributos de tais corpos.”

Através dessa separação entre trabalhos de cunho físico, que tratam das causas físicas, e ciências que tratam das linhas, dos pontos, etc., isto é, ciências matemáticas - sendo que a astronomia era uma ciência matemática -, ocorreu um tratamento metodológico distinto entre essas duas áreas de pensamento, que se refletiu nos trabalhos astronômicos.

---

<sup>5</sup>Aristóteles, *Física*, Livro II, cap. 2, 193b25 - 33.

Mediante a accitação do axioma platônico como princípio de inteligibilidade, e, conseqüentemente, a possibilidade de termos hipóteses distintas que alcançavam o mesmo resultado, isto é, todas elas salvavam igualmente as aparências com um mesmo grau de precisão ( em média com um erro de apenas 10' de arco, tanto no modelo ptolomaico, quanto no sistema copernicano), a astronomia passou a ter uma caracterização metodológica distinta das outras ciências naturais. A astronomia não tinha como objetivo a determinação de proposições que descrevessem os acontecimentos reais do mundo celeste; suas elaborações estavam desvinculadas da realidade, sendo, apenas, construções que objetivavam resolver problemas práticos. Os princípios físicos necessários para a elaboração dos sistemas astronômicos (como é o caso de Ptolomeu, que admitiu a centralidade da Terra, baseada nos princípios aristotélicos, como vemos no primeiro livro do *Almagesto*), eram dados pela filosofia natural, e à Astronomia restaria construir hipóteses matemáticas, construções teóricas, que ajustassem os dados observacionais ao axioma platônico. Podemos notar claramente a função do astrônomo segundo as palavras de Gêminos,<sup>6</sup>

“...Frequentemente o físico prender-se-á à causa e levará sua atenção ao poder que produz o efeito que ele estuda, enquanto o astrônomo tirará suas provas das circunstâncias exteriores que acompanham esse mesmo efeito; ele não tem a capacidade de contemplar a causa que produz a forma esférica da terra e dos astros....Não cabe ao astrônomo, portanto, de modo algum, conhecer qual corpo está em repouso por natureza, e de que qualidade são os corpos móveis; ele coloca como hipótese que tais corpos são imóveis, que tais outros estão em movimentos, e examina quais são as suposições com as quais concordam as aparências celestes. É do físico que ele obtém seus princípios, princípios segundo os quais os movimentos dos astros são regulares, uniformes e constantes; depois, por meio desses princípios, explica as revoluções de todas as estrelas, tanto daquelas que descrevem círculos paralelos ao equador quanto dos astros que descrevem círculos oblíquos.”

---

<sup>6</sup>Citado por Simplicio, *Aristotelis Physicorum Libros Quatuor Priores Commentaria*, Livro 2, cap. 2. Retirado de Duhem, P., *Salvar os Fenômenos*, p. 11.

Desse modo, como não era função do astrônomo tratar das causas dos movimentos planetários, sendo que os princípios físicos necessários para a elaboração dos sistemas descritivos dos astrônomos eram dados pelos filósofos naturais, as hipóteses da astronomia eram entendidas como equivalentes, isto é, adotava-se uma posição instrumentalista na astronomia: suas hipóteses não tinham o estatuto de serem verdadeiras ou falsas, elas nada diziam acerca da natureza ou realidade dos movimentos, apenas procuravam descrever, segundo um padrão teórico prévio (o axioma platônico), o que se observava nos céus. Pela limitação da capacidade humana de encontrar qual é a hipótese correta, aceitava-se a que descrevesse os movimentos e posicionamentos com o maior grau de precisão e simplicidade. A posição da astronomia, antes dos trabalhos de Kepler, é bem resumida por Duhem<sup>7</sup>-

“Portanto, a astronomia não capta a essência das coisas celestes, dá somente uma imagem delas, esta imagem em si não é exata, apenas aproximada: a astronomia se contenta com a aproximação. Os artifícios geométricos que nos servem de hipóteses para salvar os movimentos aparentes dos astros não são nem verdadeiros, nem verossímeis. São puras concepções que não poderiam ser tomadas como reais sem se formular absurdos. Combinadas com o único propósito de fornecer conclusões de acordo com as observações, elas não são determinadas sem ambigüidades. Hipóteses muito diferentes podem conduzir a conseqüências idênticas que salvam igualmente as aparências. Por outro lado, essas características da astronomia não nos devem espantar. Elas indicam simplesmente que o conhecimento do homem é limitado e relativo, que a ciência humana não poderia rivalizar com a ciência divina.”

Esse tratamento dado às hipóteses astronômicas permiti que se elaborassem hipóteses distintas que alcançavam o mesmo resultado, isto é, podia-se salvar as aparências mediante a postulação ou de movimentos em epiciclos (que determina que cada planeta perfaz um movimento circular em torno de um círculo de referência, chamado de deferente, sendo que esse, por sua vez, perfaz um movimento circular em torno do centro do sistema); ou através da postulação de movimentos excêntricos (em que o planeta perfaz um

---

<sup>7</sup>Duhem, P. *Salvar os Fenômenos*, p. 20.

movimento circular e uniforme em relação a um ponto fora do centro); ou também, como fez Ptolomeu, através do *punctum aequans*, ou equante, que é um ponto matemático que não está no centro do círculo; esse ponto move-se de tal maneira que uma reta traçada de um ponto no círculo até o p.a. percorre ângulos iguais em tempos iguais, o que significa que o planeta realiza um movimento uniforme em relação ao equante. Neste sentido, qualquer uma dessas hipóteses alcançavam o mesmo resultado, tanto uma quanto outra salvava as aparências, sem possibilidade de discriminar qual delas corresponderia à realidade dos movimentos planetários.

Para o instrumentalismo, segundo Duhem, as hipóteses astronômicas são expressões ou símbolos matemáticos, construídas com a intenção de auxiliar o astrônomo a predizer fatos do mundo celeste, em que o caráter de verdade de tais hipóteses não entra em consideração, pois são abstrações da mente do astrônomo, sem respaldo com o mundo real dos acontecimentos celestes, isto é, as hipóteses astronômicas são meros símbolos, mas não a expressão da realidade. Isso acarreta a equivalência das hipóteses, não entra em consideração qual é a verdadeira. Todas são equivalentes sob o ponto de vista da verdade, isto é, existe uma que é a verdadeira, mas como as que formulamos são meros símbolos matemáticos, não podemos saber qual é essa hipótese. Assim, o sistema a ser aceito deve ser o que melhor determinar os posicionamentos planetários, e que seja o mais simples possível (não sob o ponto de vista ontológico, mas sob o ponto de vista da utilização do menor número de construções matemáticas), mas tal sistema não tem o estatuto de verdadeiro. Dessa forma, não entram em consideração as causas verdadeiras dos movimentos celestes.

Através desse procedimento, pode-se apontar as seguintes características do método astronômico do período dos gregos antigos até Kepler:

- A. Procura de obtenção dos melhores posicionamentos planetários; isto é, procura de precisão.
- B. Utilização do menor número de artifícios matemáticos (princípio de simplicidade)
- C. Não preocupação com a obtenção das causas físicas dos movimentos.

D. Não preocupação com a verdade ou falsidade das hipóteses astronômicas.

Seguindo a adoção dessa metodologia, a astronomia passará a construir modelos descritivos que objetivaram, até Kepler, elaborar os melhores modelos tendo-se em vista uma construção voltada mais para a prática do que para a aquisição de conhecimentos acerca da natureza dos movimentos planetários. À astronomia restou um tratamento eminentemente cinemático, pois as questões dinâmicas não entrariam em consideração na adoção de uma astronomia restrita a um mapeamento celeste, que por isso se denominou astronomia de posição.

### 1.3. A Força do Axioma Platônico

A questão da justificação do axioma da circularidade e uniformidade dos movimentos planetários, ou compostos de tais movimentos, é extremamente difícil. Pode-se dizer que tal princípio condicionador dos movimentos foi dado pela “dignidade” que a circularidade e uniformidade tinham para os astrônomos e filósofos gregos, herdada pela tradição medieval. Tanto Platão quanto Aristóteles consideravam os movimentos circulares e uniformes como os mais perfeitos de todos. Segundo Aristóteles, o único movimento eterno e contínuo, que não permite alterações em suas trajetórias, é o circular<sup>8</sup>, ocasionando, dessa forma, uma argumentação para a defesa de que os movimentos celestes devem, por serem de natureza distinta dos movimentos terrestres -isto é, em virtude da tese de incorruptibilidade dos céus -, ser circulares com trajetórias compostas por percursos uniformes.

Porém, a questão pode ser enfocada não meramente sob o ponto de vista metafísico, mas pela aplicabilidade técnica que os movimentos circulares e uniformes obtiveram quando aplicados numa astronomia restrita a um tratamento cinemático.

Os artifícios matemáticos utilizados pela astronomia cinemática anterior aos trabalhos de Kepler, tais como o epiciclo com deferente, permitiam conjugar as observações ao princípio de circularidade e uniformidade, construindo qualquer tipo possível de

composições de movimentos para a obtenção dessa circularidade e uniformidade. Em outras palavras, era possível mediante esses artifícios construir qualquer tipo de órbita, tanto uma circular, quanto uma triangular, quadrada ou até mesmo uma órbita elíptica.

Isso era obtido graças as combinações de epiciclos em relação às longitudes, a sua posição em relação à eclíptica, etc., aumentando ou diminuindo o número de epiciclos. Desta forma, construía-se qualquer órbita desejada, como as dadas nas figuras abaixo:

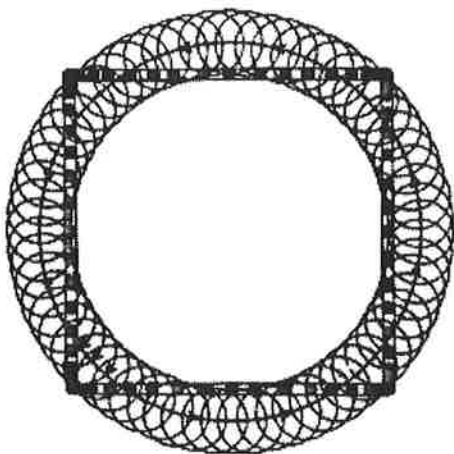


Figura 1<sup>9</sup>  
Órbita quadrada gerada a partir de epiciclos

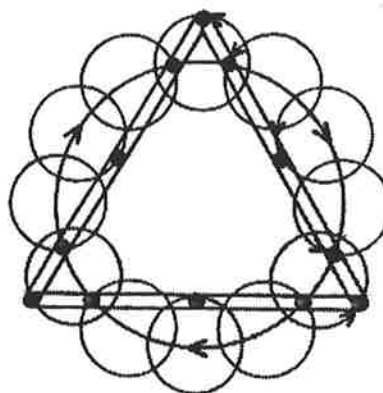


Figura 2<sup>10</sup>  
Órbita triangular gerada a partir de epiciclos

Desta forma, podia-se construir qualquer tipo de órbita, sendo que as órbitas ovais ou elípticas, que foram geradas por Kepler no *Astronomia Nova*, também podiam ser representadas, conforme as figuras abaixo:

---

<sup>8</sup>Aristóteles, *Física*, Livro VIII, cap. VIII, 264a8 - 265a27.

<sup>9</sup>Retirada de Hanson, N. R., *Constelaciones y Conjeturas*, p. 125.

<sup>10</sup>*Idem*, p.123.

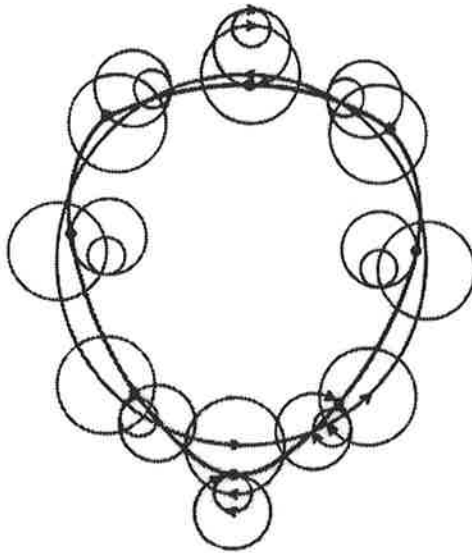


Figura 3<sup>11</sup>  
Órbita oval de Kepler construída via epiciclos.

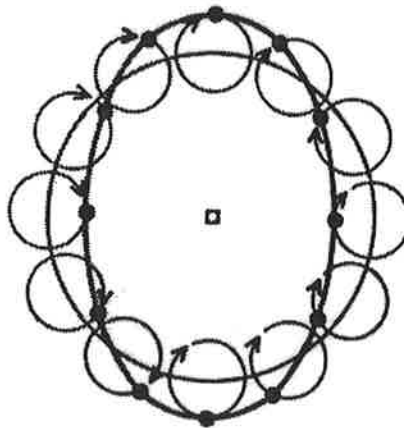


Figura 4<sup>12</sup>  
Órbita elíptica gerada por epiciclos.

Na realidade, qualquer tipo de órbita elíptica poderia ser gerada, com qualquer excentricidade, até mesmo a que foi obtida por Kepler no *Astronomia Nova*, mediante os resultados dos dados observacionais de Brahe, pois os movimentos em epiciclos permitiam construir qualquer movimento em forma elíptica, conforme nos mostra a figura 5, abaixo:

<sup>11</sup>Idem, p. 127.

<sup>12</sup>Idem, p. 120.

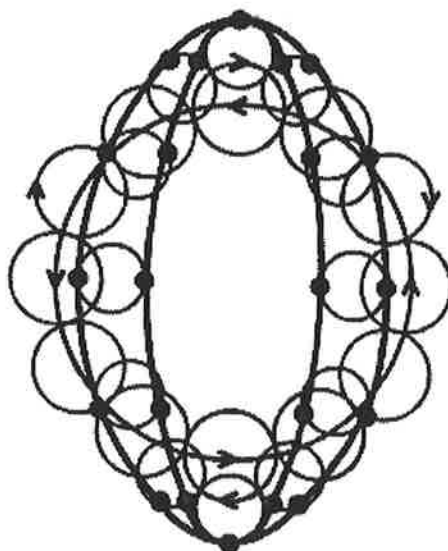


Figura 5<sup>13</sup>

A geração de uma infinidade de elipses a partir de epiciclos.

Assim, as construções podiam ser feitas pelos astrônomos tradicionais, pois o epiciclo com deferente era um artifício extremamente engenhoso, que obtinha, pela composição de movimentos circulares, qualquer forma para as órbitas planetárias.

Desse modo, a nossa questão acima, a do porquê a aceitação do axioma platônico de movimentos circulares e uniformes estava tão enraizada nas concepções dos astrônomos do período que antecede aos trabalhos de Kepler, de 1609 - ano da publicação do *Astronomia Nova*-, pode ser respondida tendo-se em vista essa via prática que alcançava uma astronomia meramente cinemática, desprovida de considerações dinâmicas, ou propriamente físicas, isto é, a utilização de movimentos circulares e uniformes é mais condizente para a satisfação dos requisitos de simplicidade e precisão exigidos pela astronomia instrumentalista pré-kepleriana.

A utilização de movimentos não circulares, como o elíptico, por exemplo, implicaria o uso de um número maior de artifícios geométricos, abalando, talvez, a precisão obtidas nos posicionamentos e tabelas via a hipótese da circularidade. Desta maneira, a astronomia tradicional via nos artifícios matemáticos criados para “salvar as aparências” um modelo plausível para se considerar que os movimentos planetários são circulares e uniformes, ou

---

<sup>13</sup>Idem, p. 126.



compostos de circulares e uniformes, pois não entrava em consideração a natureza física, dinâmica, de tais movimentos e de suas verdadeiras formas orbitais.

Neste sentido, a introdução de questões relativas à dinâmica dos movimentos planetários, levantada por Kepler com o seu conceito de força, adquirirá uma grande importância para o rompimento com o axioma platônico, pois será via essa tentativa de construção de uma explicação de cunho físico que possibilitará à astronomia romper com as exigências puramente cinemáticas, obtendo, também, explicações que relatem os acontecimentos do mundo físico dos movimentos planetários. Dessa maneira, como veremos mais adiante<sup>14</sup>, a aceitação da forma elíptica será dada por Kepler quando ele obtiver uma explicação de cunho físico que satisfaça as observações de Brahe, sendo que essa explicação é dada pela sua dinâmica, alicerçada no conceito de força magnética exercida pelo Sol nos planetas, mostrando, a partir disso, que a exigência de circularidade e uniformidade não mais é relevante para a construção dos movimentos planetários.

#### 1.4. A Astronomia Cinemática

O paradigma da circularidade e uniformidade prevaleceu na elaboração dos modelos acerca dos movimentos planetários de Platão até os trabalhos astronômicos de Kepler. Em todo esse período, a circularidade das órbitas planetárias e a uniformidade dos arcos de circunferências percorridos pelos planetas em tal órbita foram aceitas como princípios condicionadores das hipóteses construídas na ciência astronômica. O peso desse princípio era tão grande que nenhum astrônomo o considerou como uma hipótese a ser testada, admitindo-o como um axioma que possibilitava a elaboração dos modelos astronômicos. Neste sentido, tanto Ptolomeu, quanto Copérnico, Brahe e Galileu, entre outros, admitiram o axioma platônico, mantendo a astronomia nesse padrão teórico.

Assim, o paradigma da circularidade e uniformidade prevaleceu na elaboração de modelos descritivos dos movimentos celestes por um período de quase dois mil anos, de Platão a Kepler, influenciando a metodologia aplicada a essa ciência, que gerou, no limite, a

---

<sup>14</sup>Nos capítulos 3 e 4 desta dissertação.

impossibilidade de se tomar uma decisão acerca do valor de verdade das hipóteses construídas para a obtenção da forma das órbitas planetárias, bem como as relações entre tempos e percursos dos planetas nessas órbitas.

Será apenas com os trabalhos astronômicos de Kepler que a ciência astronômica deixará de aceitar o axioma platônico como algo incontestável, procurando novas formas e relações para as órbitas planetárias, tratando as suas hipóteses como aptas a serem tratadas como verdadeiras ou falsas.

#### 1.4.1 Ptolomeu<sup>15</sup>

Claudius Ptolomeu (100 - 178) foi, sem dúvida, o maior representante da astronomia desvinculada de considerações físicas. Seus trabalhos em astronomia, principalmente o *Almagesto*, refletiram a aceitação de que a ciência dos movimentos planetários deve construir hipóteses matemáticas que consigam “salvar as aparências”, sem precisar relatar ou demonstrar se essas hipóteses correspondem ou não à realidade dos movimentos em questão. Para Ptolomeu, as hipóteses astronômicas devem ser elaboradas com o intuito de descrever os movimentos planetários de uma forma tal que se obtenham elaborações de tabelas dos movimentos passados e de posicionamentos futuros, admitindo os princípios físicos necessários para tal empresa da filosofia natural.

Nesse sentido, Ptolomeu escreveu o *Almagesto*, obra que apresenta os modelos cinemáticos para a obtenção dos posicionamentos planetários da forma mais elaborada e frutífera até os trabalhos de Copérnico e Kepler. O *Almagesto* é composto de 13 livros, sendo que o primeiro apresenta os princípios físicos necessários para a construção das

---

<sup>15</sup>Esta dissertação não tem como objetivo fazer uma história da astronomia de Platão até Kepler, mas apenas mostrar a ruptura kepleriana em relação ao axioma platônico de circularidade e uniformidade dos movimentos planetários. Neste sentido, apresentaremos apenas dois dos maiores expoentes da história da astronomia que construíram os seus sistemas astronômicos segundo tal paradigma, Ptolomeu e Copérnico- destacando as hipóteses e princípios por eles admitidos. Porém, muitos outros astrônomos compartilharam da aceitação do axioma platônico, tais como Eudoxo e Aristóteles, bem como os astrônomos medievais. Para uma apreciação dos trabalhos desses astrônomos, ver Hanson, N.W., *Constelaciones e Conjeturas*, Dreyer, *A History of Astronomy from Thales to Kepler* e Russo, F., “L'Explication des Mouvements des Planètes des Grecs à Kepler”, in *Cahiers d'Histoire & Philosophie des Sciences*.

hipóteses astronômicas de cunho eminentemente geométricas, aplicadas nos 12 livros restantes da obra.

O livro 1 tem como base a física de Aristóteles<sup>16</sup>, que permite justificar os princípios físicos adotados por Ptolomeu, tais como a esfericidade do Universo e da Terra, bem como as hipóteses geocêntricas que são a base para a construção cinemática do *Almagesto*. Logo no início desse livro, escreve Ptolomeu<sup>17</sup> acerca da constituição aristotélica em três tipos de conhecimento:

“Pois, de fato, Aristóteles propriamente dividiu o conhecimento teórico em três gêneros: o físico, o matemático e o teológico....E a espécie de conhecimento que nos mostra qualidade com respeito às formas e movimentos locais, figura, número e magnitudes, e, também, lugar, tempo e coisas similares, podem ser definidas como matemáticas.”

Ptolomeu adotará os princípios físicos de esfericidade da Terra e dos céus, de circularidade e uniformidade e, subseqüentemente, os aplicará à justificação das hipóteses geocêntricas de centralidade da Terra e de duplo movimento dos céus, como ele sintetiza na sua constituição do mundo<sup>18</sup>:

“E assim, de uma forma geral, podemos estabelecer que os céus são esféricos e se movem esfericamente; que a Terra, enquanto figura, é sensivelmente esférica quando nós a tomamos como um todo; em posição, liga-se em linhas retas no meio dos céus, semelhante a um centro geométrico; em magnitude e distância, tem a razão de um ponto com respeito a esfera das estrelas fixas, não tendo em si nenhum movimento local.”

A partir desses princípios físicos e das hipóteses geocêntricas, Ptolomeu construiu a sua cinemática celeste, procurando derivar os melhores posicionamentos planetários,

---

<sup>16</sup>A física de Aristóteles tinha como base o posicionamento da Terra no centro de movimentos planetários, derivando dessa a distinção entre a física terrestre, na qual ocorrem mudanças qualitativas, geradas pela teoria dos quatro elementos - terra, fogo, ar e água, e a composição entre eles -, e o mundo celeste, em que só o elemento éter estaria presente.

<sup>17</sup>Ptolomeu, C., *The Almagest*, Livro 1, cap. 1, p.5.

<sup>18</sup>*Idem*, p. 7.

construindo e aplicando hipóteses matemáticas que objetivavam conjugar as observações astronômicas, que constatavam irregularidades quanto ao axioma de movimentos circulares e uniformes. Neste sentido, as hipóteses utilizadas não tinham a intenção de serem verdadeiras ou falsas, seguindo a concepção instrumentalista para a astronomia da época.

Ptolomeu utilizou hipóteses distintas para “salvar as aparências”. Assim, para dar conta da primeira desigualdade - a não observação de um movimento uniforme, tanto dos planetas quanto do Sol, pois eles percorrem arcos iguais de circunferência em tempos distintos - ele utilizou movimentos sobre epiciclos com deferente. Assim, escreveu Ptolomeu:<sup>19</sup>

“Visto que agora devemos explicar a irregularidade aparente do Sol, devemos assumir primeiramente e de uma forma geral que os movimentos dos planetas na direção contrária aos movimentos dos céus são todos regulares e circulares por natureza, semelhante ao movimento do Universo na outra direção. Isto é, as linhas retas, concebidas como girando as estrelas sobre seus círculos, cortam em tempos iguais os ângulos em arcos iguais da circunferência aos centros de cada uma; a sua aparente irregularidade resulta das posições e arranjos dos círculos sobre suas esferas, pelos quais elas produzem esses movimentos, mas nada afeta, em realidade, a natureza das suas imutabilidades, em observação a suposta desordem de suas aparências.

“Mas a causa dessa aparência irregular pode ser resolvida por meio de duas hipóteses primárias simples. Pois se seu movimento é considerado com respeito a um círculo no plano da eclíptica, concêntrico com o Cosmo, de forma que nossos olhos estão no centro, então é necessário supor que eles fazem seus movimentos regulares ou ao longo de círculos não concêntricos com o Cosmo, ou ao longo de círculos concêntricos; não com esse simplesmente, mas com outros círculos sobre eles, chamados de epiciclos. Pois, segundo as nossas hipóteses, deverá parecer possível para o planeta passar aparentemente, em períodos iguais de tempo, através de arcos desiguais do círculo eclíptico, o qual é concêntrico com o Cosmo.”

---

<sup>19</sup>Ptolomeu, *The Almagest*, Livro III, cap. 3, pp. 86 -87.

Isto é, Ptolomeu usa o movimento do epiciclo sobre o deferente, que permite “salvar as aparências”, corrigindo a irregularidade apresentada pelo Sol - e, também, pelos planetas- ao não percorrer arcos de circunferência iguais e tempos iguais, constatada observacionalmente, pela composição de movimentos circulares e uniformes em relação ao centro do epiciclo com o centro do círculo deferente.

Essa primeira desigualdade era apresentada pelos planetas e pelo Sol, mas a segunda, a da observação de movimentos retrógrados, era dada apenas pelos planetas. Neste sentido, Ptolomeu elaborou um novo artifício para a resolução dessa desigualdade, conjugada à resolução da primeira, a saber, a introdução do movimento pelo equante.

O equante ptolomaico objetivava determinar ângulos iguais em tempos iguais, isto é, o planeta realizaria um movimento uniforme não mais sobre o centro do deferente, ou sobre o centro do círculo excêntrico, mas sobre o equante, conforme a figura 6, abaixo:<sup>20</sup>

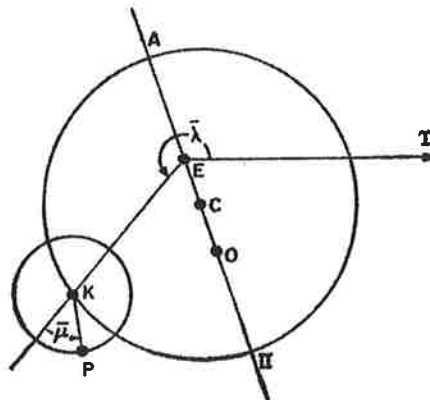


Figura 6

Nessa figura, O é a Terra, C o centro do deferente, E o equante. A é o apogeu, II é o perigeu, K é o centro do epiciclo, P é um planeta. P perfaz um movimento uniforme e circular, salvando a primeira e a segunda desigualdades, conjuntamente, fazendo movimento epicíclicos, tendo como centro do movimento o ponto E, que é um ponto fictício (geométrico). Desta forma, por E o planeta move-se com velocidade angular constante. Com isso, Ptolomeu objetivou “salvar as aparências” em relação às duas

desigualdades conjuntamente, pois o planeta realizaria um movimento composto de artifícios geométricos que determinariam as desigualdades como aparências, quando computadas a partir do ponto equante.

Porém, o equante ptolomaico era um ponto não-físico, mas matemático<sup>21</sup>, o que acarretava uma astronomia eminentemente matemática. Desta forma, com a hipótese do movimento sobre equante a astronomia obteve um grau satisfatório na determinação dos posicionamentos planetários, para a confecção de tabelas astronômicas, com uma margem de erro chegando a 10' de arco<sup>22</sup>.

Nesse modelo astronômico de Ptolomeu eram usados um grande número de artifícios- equante, epiciclos, deferentes - o que conduziu a uma complexidade muito grande na determinação dos movimentos planetários; considerando-se, também, que os posicionamentos eram dados tendo-se em conta cada planeta em particular, isto é, cada planeta tinha o seu número específico de artifícios, podendo-se considerar os posicionamento em separado. Com isso, a astronomia de Ptolomeu não satisfazia o requisito de sistematização do Cosmo, algo que o copernicanismo obteve, implicando a aceitação deste último por parte Kepler, como veremos mais abaixo<sup>23</sup>.

Em síntese, a astronomia ptolomaica foi o maior expoente de uma astronomia eminentemente cinemática,- podendo-se chamá-la, como o faz Hanson<sup>24</sup>, de uma maquinaria preditiva - desprovida de considerações físicas, objetivando apenas construir hipóteses matemática, as mais simples e econômicas possíveis, para a determinação dos

---

<sup>20</sup>Retirada de Evans, J., "Fonction et Origine Probable du Point Équant de Ptolémée", in *Revue d'Histoire des Sciences*. p. 194.

<sup>21</sup>Segundo Koyré, a introdução do equante por Ptolomeu acarretava uma violação ao axioma platônico, pois o uso de tal ponto implicava um abandono da procura de causas físicas para os movimentos celestes, levando a uma ruptura entre astronomia matemática e astronomia física: "Isso era uma coisa muito grave, pois abandonando o princípio do movimento circular e uniforme, abandonava-se a explicação física dos fenômenos. É a partir de Ptolomeu, justamente, que encontramos uma ruptura entre astronomia matemática e astronomia física." *Estudos de História do Pensamento Científico*, p. 85. Porém, deve-se salientar que a astronomia era considerada, mesmo antes de Ptolomeu, como uma ciência matemática, que se utilizava de princípios dos físicos, como vemos em Aristóteles.

<sup>22</sup>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 corresponderiam a 1 sexto de grau.

<sup>23</sup>Capítulo 2 desta dissertação.

<sup>24</sup>Hanson, N. R., *Contelaciones y Conjeturas*.

posicionamentos planetários, inserida no respeito ao princípio de “salvar as aparências”, como bem nos escreve Cohen:<sup>25</sup>

“Resulta claramente do livro [*Almagesto*], que Ptolomeu nunca se empenhou na questão de saber se havia ‘realmente’ verdadeiros epiciclos e verdadeiros deferentes nos céus. Como podemos concluir da leitura, parece muito mais provável que para ele o sistema que descreveu era um ‘modelo’ do universo, e não necessariamente a ‘verdadeira’ descrição - seja o que for que estas palavras possam significar. Isto era o ideal grego, atingindo o seu ponto mais alto nos escritos de Ptolomeu, de construir um modelo que habilitasse o astrônomo a prever as observações ou - para usar a expressão grega - ‘Salvar as Aparências’.”

Assim, com Ptolomeu a astronomia tradicional obteve um grau satisfatório para conjugar as observações astronômicas ao princípio condicionador das hipóteses dessa ciência: a de conjugar as irregularidades à circularidade e uniformidade dos movimentos.

#### 1.4.2. Copérnico

O modelo geocêntrico de Ptolomeu forneceu à astronomia uma máquina de cálculos suficientemente razoável para a elaboração de tabelas preditivas sobre os movimentos planetários. As suas hipóteses físicas assumidas, em especial as de centralidade da Terra e de movimento do Sol ao longo do zodíaco, estavam em conformidade<sup>26</sup> com a física aristotélica, que pregava também tais hipóteses acerca do posicionamento da Terra e do movimento solar, possibilitando, assim, construir uma descrição cinemática satisfatória dos posicionamentos planetários. Neste sentido, o modelo ptolomaico prevaleceu na astronomia

---

<sup>25</sup>Cohen, B., *O Nascimento de uma Nova Física*, p.35.

<sup>26</sup>Na verdade, a astronomia ptolomaica, postulando o equante -ponto matemático, não físico -, feria a exigência da física aristotélica de que o centro de movimentos deve ser um centro físico, e não fictício, o que gerou uma certa incompatibilidade entre os adeptos do aristotelismo em relação aos astrônomos que seguiam os ensinamentos do *Almagesto*. Ver Dijksterhuis, E. J., *The Mechanization of the World Picture*, pp. 209 - 219.

por todo o período medieval, pois estava condizente com a postura metodológica de “Salvar as Aparências”.

Neste contexto de “Salvar as Aparências” surgem os trabalhos astronômicos de Copérnico, que partindo de hipóteses físicas distintas das de Ptolomeu, a saber, que o centro do sistema planetário não é o corpo terrestre, mas o centro da órbita dessa, que está perto do Sol; e de que a Terra, da mesma forma que os outros planetas, é dotada de movimentos, tais como o de rotação, em que a Terra gira sobre seu próprio eixo em um período de vinte e quatro horas, e, também, do movimento de translação, girando ao redor do centro de seu sistema de movimento. Com essas hipóteses, Copérnico realiza uma ruptura quanto à cosmologia aristotélica, retirando a Terra do centro dos movimentos celestes, possibilitando um tratamento distinto para a construção de hipóteses astronômicas.

Essa concepção heliocêntrica do sistema planetário foi exposta na obra de Copérnico, publicada em 1543, intitulada *As Revoluções dos Orbes Celestes*. Esse livro é composto de seis partes. Na primeira, Copérnico apresenta as hipóteses físicas por ele assumidas, tratando a astronomia como uma ciência apta a descrever a realidade dos acontecimentos celestes.

Isso é notado pela resolução imediata da segunda desigualdade - a do movimento retrógrado -, pois, colocando-se a Terra em movimento em torno do Sol, pode-se explicar as retrogradações como movimentos aparentes, gerados pela relatividade entre velocidade e distâncias dos planetas entre si e o centro.

Dentre as principais hipóteses assumidas por Copérnico, temos a aceitação de que o Universo é esférico e a de que a Terra também é esférica. Essas concordam com as hipóteses assumidas por Ptolomeu. Copérnico também aceitou, incontestavelmente, o axioma de circularidade e uniformidade, pois nos relata esse astrônomo:<sup>27</sup>

“O Movimento dos corpos celestes é uniforme, perpétuo e circular ou composto de movimentos circulares.”

“Depois do que foi anteriormente dito, referiremos que o movimento dos corpos celestes é circular. Com efeito, o movimento apropriado de uma esfera é uma

---

<sup>27</sup>Copérnico, N., *As Revoluções dos Orbes Celestes*, Livro, I, cap. IV, p. 25.



rotação num círculo, reproduzindo a sua própria forma no próprio ato como corpo extremamente simples em que não se pode indicar princípio nem fim, nem distinguir-se um do outro, enquanto através dos mesmos move-se sobre si mesma.”

Copérnico era um grande defensor do axioma platônico de circularidade e uniformidade dos movimentos planetários. Isso, de uma certa forma, fez com que ele escrevesse os livros restantes do *Revoluções* (II a VI) não mais de uma maneira que se relatasse a realidade dos acontecimentos planetários, pois Copérnico foi obrigado a utilizar, para dar conta da primeira desigualdade, movimentos em epiciclos com deferente.

Ao negar o equante ptolomaico, Copérnico viu-se na situação de, para manter o estipulado pelo axioma platônico, não admitir que o centro de movimentos estivesse localizado no próprio corpo do Sol, mas nas imediações desse, que ele chamou de centro da órbita terrestre, dando à Terra, de uma certa forma, uma primazia na computação dos movimentos planetários. Com isso, a astronomia copernicana, apesar de objetivar um tratamento não meramente cinemático para os movimentos planetários, realizou mais uma astronomia matemática do que física<sup>28</sup>. Toda a construção para a adequação das observações aos princípios de uniformidade e circularidade foram dadas mediante a utilização dos artifícios da astronomia cinemática, utilizando os critérios metodológicos de simplicidade e de menor número possíveis de artifícios.

Copérnico obteve um grau de precisão semelhante ao do modelo ptolomaico, atingindo cerca de 10' de erro.

Porém, apesar do sistema heliocêntrico proposto por Copérnico ficar restrito, quanto à resolução da primeira desigualdade, a uma astronomia cinemática, ele foi extremamente importante para a elaboração das duas primeiras leis keplerianas dos movimentos planetários, pois forneceu a Kepler um sistema organizado, no qual se pode estudar todas as simetrias que o Cosmo nos apresenta. Segundo Copérnico, dentre as razões que o levaram a estipular novas hipóteses para a astronomia, distintas das do modelo ptolomaico, está a

---

<sup>28</sup> A questão da negação do equante por parte de Copérnico, e as conseqüências que isso determinou para a sua astronomia são relatadas mais adiante, no capítulo 3, seção 3.2.

questão da impossibilidade desse modelo geocêntrico descobrir a simetria do Universo, segundo Copérnico:<sup>29</sup>

“...É que em primeiro lugar eles [os adeptos do modelo ptolomaico] se encontram de tal maneira inseguros quanto os movimento do Sol e da Lua que nem a duração regular do ano corrente são capazes de explicar e formular.

“Em segundo lugar, ao determinarem os movimentos das esferas do Universo e dos cinco planetas não usam até dos mesmos princípios e premissas que nas demonstrações dos movimentos e revoluções aparentes. Com efeito, uns apenas se servem de círculos concêntricos e outros de círculos excêntricos e de epiciclos com os quais, porém, não atingem completamente o que pretendem... Também não conseguiram descobrir ou concluir a partir desses círculos um fato de mais interesse, ou seja a forma do Universo e a justa simetria das suas partes, mas aconteceu-lhes como a alguém que fosse buscar a diferentes pessoas mãos, pés, cabeça e outros membros, perfeitamente apresentados sem dúvida mas sem formarem um corpo uno, e sem qualquer espécie de correspondência mútua entre si, de tal maneira que resultaria deles mais um monstro do que um homem.”

Isto é, o terceiro motivo nos mostra que o modelo ptolomaico não correspondia às exigências para se formar uma astronomia sistematizada, na qual as partes mantêm uma relação de simetria entre si. Traduzindo a imagem de Copérnico, o geocentrismo de Ptolomeu não poderia formar uma astronomia sistematizada porque ele era apenas um modelo para efetuar cálculos acerca dos posicionamentos planetários - isto é correto, pois cada planeta tinha o seu próprio modelo, não interferindo na elaboração dos modelos dos outros planetas.

No sistema de Copérnico, a postulação do Sol ao centro e a Terra movendo-se ao seu redor permite que se considere o Universo de uma forma coerente e sistematizada, possibilitando relacionar os movimentos dos planetas todos entre si, mostrando a simetria existente no Cosmo<sup>30</sup>.

<sup>29</sup>Copérnico, N., *As Revoluções dos Orbes Celestes*, prefácio a sua Santidade Paulo III, Sumo Pontífice, pp. 7 - 8.

<sup>30</sup>A questão da sistematização do Copernicanismo aceita por Kepler é tratada mais detidamente no capítulo 2 desta dissertação.

Desse modo, a astronomia pré-kepleriana foi marcada profundamente pela aceitação incontestada do axioma platônico de movimentos circulares e uniformes, influenciando a construção das hipóteses sobre os movimentos planetários, obrigando a astronomia a criar artifícios matemáticos que não relatavam a verdade ou falsidade dos acontecimentos do mundo físico astronômico.

## **2. *Mysterium Cosmographicum*: Os Antecedentes das Leis Keplerianas dos Movimentos Planetários**

### **2.1. Introdução**

O rompimento com o axioma platônico realizado por Kepler foi paulatino. No seu primeiro trabalho astronômico, o *Mysterium Cosmographicum* (1596), Kepler era um astrônomo preso ao princípio da circularidade e uniformidade. 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, da qual falaremos mais abaixo, 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 do movimento de Marte. A ruptura, obtida plenamente no *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, que é, pode-se dizer, uma das principais características do procedimento adotado no *Astronomia Nova*, de 1609, - obra em que estão formuladas as suas duas primeiras leis dos movimentos planetários - esse trabalho kepleriano de 1596 apresenta três pontos importantes para a compreensão do processo de ruptura com o axioma no *Astronomia Nova*, a saber:

O primeiro é o caráter eminentemente metafísico, 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 fruto da construção de hipóteses via a utilização dos dados observacionais. Em outras palavras, a construção cosmológica do *Mysterium Cosmographicum* representa a força que tinha a crença kepleriana na existência de uma estrutura harmônica subjacente aos fenômenos celestes observados; nessa obra, os dados empíricos não tiveram nenhum papel relevante para a construção da hipótese dos sólidos perfeitos. Esse caráter é importante, pois fez com que o trabalho de 1596 ficasse restrito a uma cinemática celeste, sem considerações de ordem física, dinâmica, que marcará o processo de obtenção das leis, no *Astronomia Nova*, mediante o conceito de força magnética exercida pelo Sol nos planetas. Desse modo, o ponto relevante sobre as diferenças entre o trabalho de 1596 e o trabalho de 1609 foi a ruptura com uma postura cinemática, em benefício de um tratamento dinâmico; pode-se afirmar que isso foi obtido graças aos dados de Brahe - que Kepler teve em mãos após a morte de Brahe, em 1601-, e do caráter explicativo do *Astronomia Nova*, em que 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 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 no *Astronomia Nova*.

Finalmente, o *Mysterium Cosmographicum* apresenta a defesa do copernicanismo por parte de J. Kepler. 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 dois pontos. O primeiro é de interesse histórico. Kepler foi, se não o primeiro, um dos pioneiros em defender o copernicanismo. A obra é de 1596, anterior às descobertas de Galileu com o telescópio, relatadas no *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 era dada mais em função de uma postura metafísica do que propriamente como resultado de uma pesquisa científica, como foi o caso do *Astronomia Nova*. Porém, isso não tira o mérito da defesa contida no *Mysterium Cosmographicum*.

O segundo é de cunho epistemológico e cosmológico, que é a apresentação desse sistema como apto a descrever o Cosmo sob o ponto de vista de uma ordem harmônica, sistematizada, em que cada elemento faz parte de uma estrutura única, e a 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.

## 2.2. Os Sólidos Perfeitos

No ano de 1596, em Tübingen, foi publicada a primeira edição de um pequeno livro sobre astronomia, intitulado *Mysterium Cosmographicum*. O seu autor, J. 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<sup>31</sup>, 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 acontecimentos. 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 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 a procura da determinação da estrutura harmônica subjacente aos fenômenos astronômicos, na qual as partes mantêm uma relação (razão harmônica) constante com o todo. Em outras palavras, ele objetivava encontrar *a priori* a estrutura e as leis dos acontecimentos 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*<sup>32</sup>

“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 relação harmônica entre as partes e o todo, isto é, todas as partes do universo (planetas, Sol, etc.) mantêm 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 feito ao acaso,

---

<sup>31</sup>Na época de Kepler, apenas seis planetas eram conhecidos: Saturno, Júpiter, Marte, Terra - para os adeptos do heliocentrismo -, Vênus e Mercúrio. Netuno foi descoberto no século XVIII, Urano no século XIX e Plutão apenas no século XX.

<sup>32</sup>Kepler, J., *Mysterium Cosmographicum*, p. 63.

mas por uma necessidade harmônica, que é determinada pelo arranjo desses planetas com os Sólidos Perfeitos, segundo Kepler.<sup>33</sup>

“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 ao Espírito Santo.”

Por essa passagem, nota-se a semelhança 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 de encontrar essa harmonia foram frutos, basicamente, dos defeitos que os modelos astronômicos de sua época apresentavam - em especial o sistema copernicano, pelo fato de que nesse sistema não ocorria uma concordância entre os cálculos efetuados para encontrar o número, o tamanho e o movimento do círculo da órbita planetária -; mas isso não o desanimou, pois o próprio Cosmo apresenta essa harmonia, devendo o astrônomo esforçar-se por encontrá-la.<sup>34</sup>

“...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 com as distâncias, e que sempre existiu uma grande diferença entre as esferas, que existe sempre entre os movimentos. 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.”

Assim, Kepler partirá para a procura da determinação dessas relações constantes entre os números de planetas existentes, os tamanhos de suas órbita e suas distâncias ao centro de movimentos. Dessa procura, que é a origem do processo de elaboração das suas leis dos movimentos planetários, formulou, no *Mysterium Cosmographicum*, a sua teoria

---

<sup>33</sup> *Idem.*



dos sólidos perfeitos, a sua primeira tentativa de elaborar um sistema descritivo e explicativo do Universo, mediante a sua posição cosmológica e metafísica, de cunho pitagórico, de que o Universo contém - e é apta de ser conhecida - uma estrutura harmônica por detrás dos movimentos observados. 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<sup>35</sup>

“...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 do porque do número de planetas existentes.”

Assim, considerando-se inicialmente o planeta mais externo (Júpiter), temos a seguinte estrutura planetária:

---

<sup>34</sup> *Idem.*

<sup>35</sup> *Idem*, p. 69.

Esfera de Saturno  
Cubo

Esfera de Júpiter  
Tetraedro

Esfera de Marte  
Dodecaedro

Esfera da terra  
Icosaedro

Esfera de Vênus  
Octaedro

Esfera de Mercúrio  
Sol

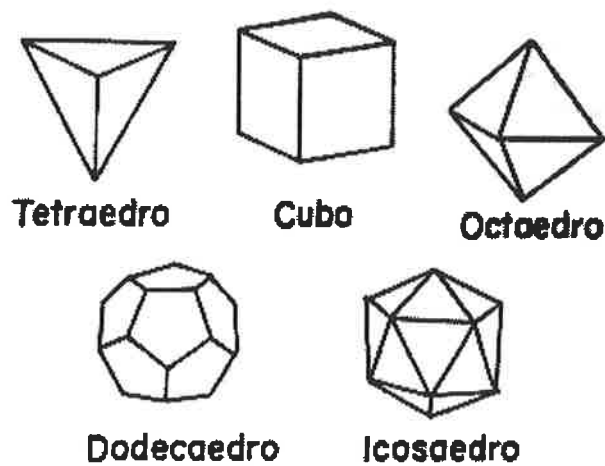


Figura 7 <sup>36</sup>  
Os cinco Sólidos Perfeitos

<sup>36</sup>Cohen, I. B., *O Nascimento de uma Nova Física*, p. 142.

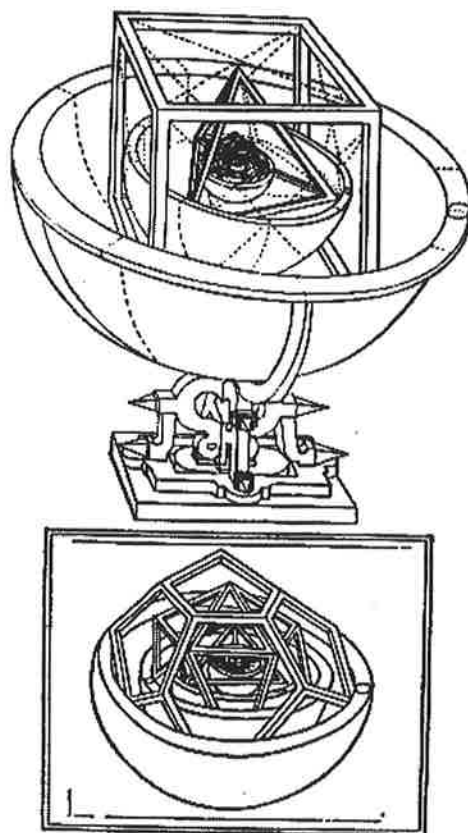


Figura 8<sup>37</sup>

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.

Kepler acreditou plenamente nessa estrutura cósmica. Todo seu trabalho posterior foi uma tentativa, e frutífera em partes, de demonstrar que o universo foi assim construído. Os resultados positivos dessa sua idéia original foram, posteriormente, a elaboração das suas leis dos movimentos planetários.

Entretanto, 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. Neste sentido, o *Mysterium Cosmographicum*, é uma obra que apresenta as teses metafísicas de Kepler, a idéia básica de uma harmonia cósmica, que sempre o acompanhará. Porém, a posição adotada nesse trabalho de 1596 não permitiu a ele romper com o primado do axioma platônico. Será apenas com o caráter explicativo, sob o ponto de vista dinâmico, que esse astrônomo atingirá tal resultado.

### 2.3. A Aceitação 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 epistemológicos e metafísicos keplerianos, presentes já no *Mysterium*, e que tomaram uma maior consistência no *Astronomia Nova*. Logo no prefácio do *Mysterium*, Kepler arrolou razões de ordem metafísica e epistemológica para a aceitação do heliocentrismo.<sup>38</sup>

“...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<sup>39</sup>, 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 mostra dois pontos relevantes para o entendimento do procedimento astronômico kepleriano. O primeiro é de cunho metafísico, que é justamente a crença kepleriana na possibilidade de haver uma estrutura harmônica subjacente aos acontecimentos observados. Essa estrutura permite à astronomia expressar, em formas de leis, as regularidades constatadas entre as relações das distâncias e tempos de percurso dos planetas ao seu centro, o Sol. Kepler era um fiel seguidor do pitagorismo; para esse

---

<sup>37</sup>Cohen, I. B., *O Nascimento de uma Nova Física*, p. 144.

<sup>38</sup>Kepler, J., *Mysterium Cosmographicum*, p. 63.

<sup>39</sup>Primeiro movimento é o movimento que o planeta realiza sobre o seu próprio eixo, chamado movimento de rotação.

astrônomo, o universo pode ser entendido a partir da sua constituição harmônica entre os planetas e o Sol.

O segundo ponto está ligado aos critérios epistemológicos kepleriano; está justamente nas razões físicas que Kepler irá adotar, no *Astronomia Nova*, com o conceito de força, para obter uma explicação dos movimentos apresentados pelos planetas. Enquanto Copérnico deu razões matemáticas, Kepler irá desenvolver razões de ordem física, isto é, Copérnico, como veremos<sup>40</sup>, restringiu-se a uma cinemática celeste, enquanto que Kepler desenvolveu uma dinâmica celeste.

Porém, no *Mysterium*, Kepler adota uma postura mais de cunho metafísico do que físico. Nessa obra, estão presentes os elementos da sua harmonia celeste, que é a idéia dos sólidos perfeitos como a estrutura do universo. Será somente no *Astronomia Nova*, tendo em mãos os dados de Brahe, que Kepler desenvolverá a parte física da sua astronomia.

No primeiro capítulo do *Mysterium*, Kepler desenvolve a sua defesa do copernicanismo sob um ponto de vista dos problemas relacionados à determinação dos movimentos planetários:<sup>41</sup>

“...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 resumir 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.

---

<sup>40</sup> A questão do copernicanismo ficar restrito a uma cinemática celeste será desenvolvida no terceiro capítulo desta dissertação, seção 3.2..

<sup>41</sup> Kepler, J., *Mysterium Cosmographicum*, cap. I, p. 75.

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 determinação com um grau equivalente de precisão. Esses dois critérios podem ser interpretados apenas como uma formulação cinemática, 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 Kepler 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, a aceitação do sistema copernicano possibilitou Kepler realizar uma dinâmica celeste. A defesa do copernicanismo apresenta algumas etapas, umas lógicas, outras epistemológicas.

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:<sup>42</sup>

“...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.”

---

<sup>42</sup>Idem.

As palavras de Kepler significam que não é possível as premissas copernicanas, as teses heliocêntricas, serem falsas, e, por elas, os fenômenos serem salvos, identicamente à posição instrumentalista da astronomia de sua época; neste sentido, continua Kepler:<sup>43</sup>

“...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 ou para baixo, para inferir um movimento do outro....vós não terá dificuldades em qualquer ponto, se elas [hipóteses] são autênticas, e mesmo a partir dos mais intrincados 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 -, e posicionar o Sol no centro e dar movimentos à Terra é dar premissas que correspondem a essas exigências do silogismo.

Mas o forte da argumentação kepleriana não está nessas considerações lógicas. Essas servem apenas para sustentar os seus argumentos seguintes, que objetivam mostrar que as teses ptolomaicas não satisfazem às exigências lógicas, pois por essas não se pode retirar conseqüências e nem explicar as premissas; enquanto que o copernicanismo permite tal coisa. Continua Kepler:<sup>44</sup>

“...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 razoável para as aparências, e concordam com as observações, Copérnico não as nega, mas as adota e as explica.”

---

<sup>43</sup> *Idem.*

<sup>44</sup> *Idem*, pp. 75 - 77.

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<sup>45</sup>. Assim, o importante é saber a razão que levou Kepler a adotar o copernicanismo. Essa razão é fundamentada, principalmente, no caráter de sistematização e de racionalidade que o copernicanismo possibilita nas questões de determinação dos movimentos planetários.

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 eram 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 necessidade de conjugá-las em relação 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 eram salvos mediante a criação de um grande número de artifícios para representar, em forma de epiciclos, 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 9, abaixo.

---

<sup>45</sup>*Idem*, p. 81.



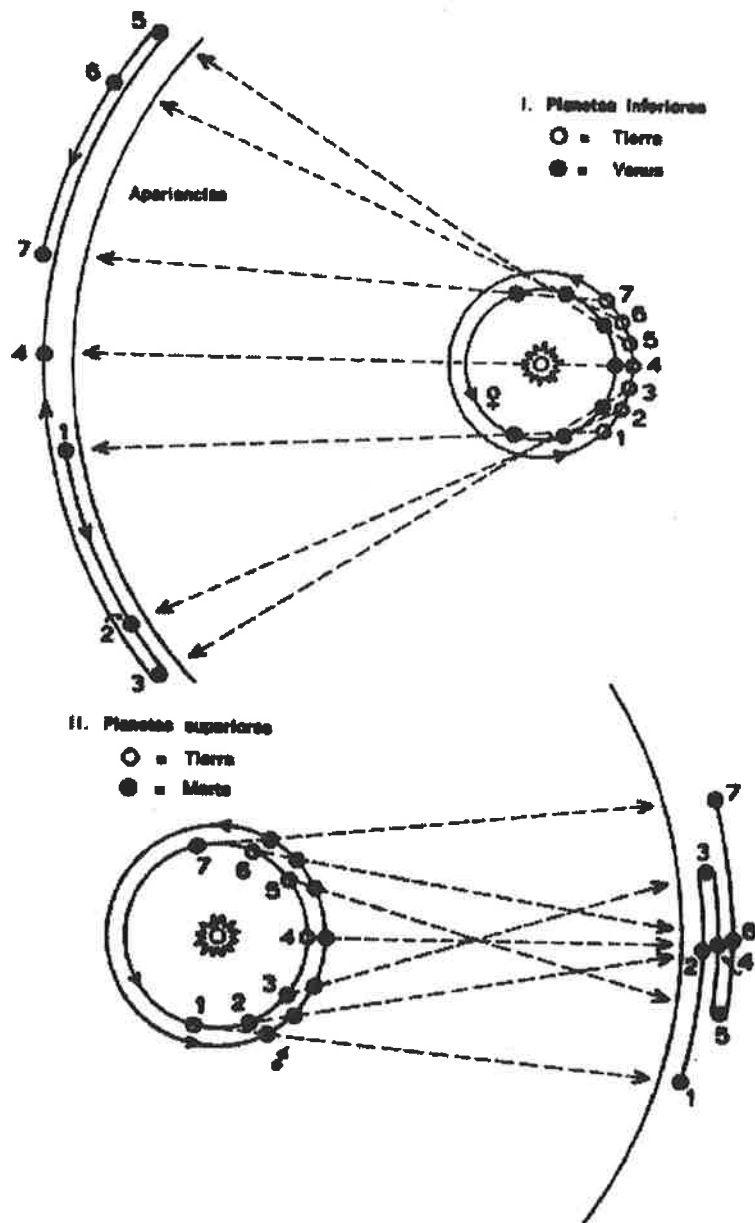


Figura 9<sup>46</sup>

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

<sup>46</sup>Retirada de Hanson, R. N., *Constelaciones y Conjeturas*, p. 206.

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:<sup>47</sup>

“.....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 usou o copernicanismo no *Mysterium Cosmographicum* em relação a uma fundamentação cosmológica. A defesa, pode-se dizer, forte desse astrônomo a favor de tal sistema consolidar-se-á no *Astrologia Nova*, que utilizará o sistema copernicano como o único a permitir uma explicação sob o ponto de vista dinâmico.

---

<sup>47</sup>Hanson, R. N., *Constelaciones y Conjeturas*, p. 204.

## 2.4. O Esboço das Leis

Além dessa defesa do copernicanismo, o *Mysterium* apresenta uma 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<sup>48</sup>. No capítulo XX, 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. Assim, Kepler lançou duas hipóteses para explicar porque um planeta perde velocidade quando está mais afastado do Sol, segundo ele:<sup>49</sup>

“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

---

<sup>48</sup>Esse objetivo só foi conseguido com a terceira lei dos movimentos planetários, que afirma que o cubo das distâncias é proporcional ao quadrado dos tempos; lei essa denominada de “Lei harmônica”, contida no *Harmonia do Mundo*, de 1619.

<sup>49</sup>Kepler, J., *Mysterium Cosmographicum*, cap. XX, p. 199. Utilizamos, para essa citação, a tradução de Koestler, A., na sua obra *Os Sonâmbulos*, p. 176.

distâncias - constante, e, a partir dessa admissão, construir leis universais para detectar essa relação apresentada pelos movimentos planetários.

Na astronomia 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, cada planeta tinha o seu modelo descritivo, não havendo relação entre eles. Assim, esse procedimento astronômico não se perguntava porque há uma relação entre os tempos e distâncias dos planetas entre si; e nem queria saber o que leva os planetas a terem mais velocidade quando perto do centro, e menos quando longe desse.

Com Kepler, a astronomia pergunta-se sobre essas questões; e é acerca dessas questões que a astronomia kepleriana obterá significação, quando desenvolver as explicações dinâmicas que levam à investigação das causas físicas dos movimentos celestes.

Porém, no *Mysterium Cosmographicum*, Kepler não tinha condições de operacionalizar uma dinâmica celeste. Nessa obra, 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 ptolomaico. Segundo Kepler, é mediante esse expediente de cálculo que se pode descrever os movimentos a partir da relação entre as variações de velocidades como os tempos.<sup>50</sup> Assim, nessa obra de 1596, Kepler usava os artifícios matemáticos de sua época, para salvar as aparências dos movimentos planetários.

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, no *Astronomia Nova*, por razões dinâmicas.

Porém, 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

---

<sup>50</sup>O equante ptolomaico permitia mostrar uma relação entre os tempos, computados pela anomalia mediana, em relação às distâncias do planeta ao ponto equante. Kepler usou o equante no *Astronomia Nova*,

hipótese dos sólidos perfeitos. O seu problema era que pelo sistema de Copérnico ele tinha a deficiência dos dados, das observações astronômicas, para o ajustamento desses à teoria, isto é, Kepler não dispunha de dados observacionais suficientemente precisos, pelo sistema de Copérnico, que permitissem com que se comprovasse a sua hipótese dos sólidos perfeitos. As observações utilizadas por Copérnico, 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, conseqüentemente, 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 (distância que é obtida do centro físico até o ponto em que são calculados os movimentos como circulares e uniformes). O problema era que pelas tabelas Prutênicas, baseadas na teoria de Copérnico, a excentricidade estava no centro da órbita terrestre<sup>51</sup>, o que ocasionava erros de 10' de arco para as previsões dos movimentos, isto é, pelas tabelas Prutênicas, os posicionamentos previstos não eram precisos, implicando a impossibilidade de Kepler encaixar as esferas nos sólidos. Para resolver isso, deve-se, segundo Kepler, corrigir as excentricidades admitidas até então,<sup>52</sup>

“...Pois, é minha opinião que após a descoberta dessas proporções no céu, tudo o qual 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.”

---

substituindo esse ponto fictício ao relacionar os tempos com as áreas percorridas, quando obteve a sua segunda lei. Ver capítulo 3 desta dissertação, na seção 3.5.

<sup>51</sup>Isso pelo fato de que Copérnico era um grande defensor do axioma platônico, que gerou dificuldades para adequar a primeira desigualdade a tal axioma, pois ele foi obrigado, para compor os movimentos como circulares e uniformes via epiciclos e deferentes a admitir que o centro de movimentos não está propriamente no corpo do Sol, mas no centro da órbita terrestre. Mais detalhes sobre essa questão, ver capítulo 3, seção 3.2. desta dissertação.

<sup>52</sup>Kepler, J., *Mysterium Cosmographicum*, cap. XVIII, p. 181.

Em vista desses problemas, Kepler não rejeitou a sua teoria, mas o tratamento dado por Copérnico em colocar o centro de movimentos não no Sol, mas no centro da órbita terrestre. Subseqüentemente, ao obter os dados de Brahe, passará a procurar um valor para as excentricidades que corroborem a sua hipótese dos sólidos perfeitos, não obtendo sucesso quanto a essa intenção.

## 2.5. Tycho Brahe e os Dados Observacionais

Assim, na procura de melhores dados para a comprovação da hipótese dos sólidos perfeitos, Kepler virá, em 1600, a se encontrar com o melhor astrônomo observacional de sua época, o dinamarquês Tycho Brahe<sup>53</sup>, que obteve as melhores observações planetárias conhecidas até esse momento, com um erro de apenas 2' de arco; algo que era mais eficiente do que qualquer outra observação já realizada.

Tycho Brahe tomou conhecimento do *Mysterium Cosmographicum* de Kepler. De uma certa forma Brahe apreciou-os, no que concerne ao tratamento engenhoso de Kepler para encaixar os sólidos perfeitos nas esferas celestes, mas levantou uma série de críticas que, pode-se afirmar, conduziram às elaborações do *Astronomia Nova*. As críticas estão dirigidas basicamente contra a metafísica kepleriana - a crença kepleriana de elaborar uma defesa *a priori* do copernicanismo, obtendo, desse modo, mais uma cosmologia do que uma astronomia física-; na hipótese dos sólidos perfeitos (pois, Brahe descobriu que os cometas não são fenômenos atmosféricos, mas corpos celestes que se movem em torno a um centro, o que, conseqüentemente, refuta a idéia de esferas sólidas de cristais); e, principalmente, 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 criticou a defesa kepleriana do copernicanismo, sendo que por essa Kepler não se

---

<sup>53</sup>Não tratarei neste texto do relacionamento pessoal entre Kepler e Brahe. Para melhores dados sobre esse relacionamento ver o livro de Koestler *Os Sonâmbulos*.

deixou influenciar. Essas objeções de Brahe aparecem na correspondência entre os dois; por exemplo, numa carta de Brahe a Kepler de 1598 é escrito:<sup>54</sup>

“Mas eu não direi que podeis ter razão em tudo. Se utilizardes os valores verdadeiros das excentricidades dos planetas, que eu estou procurando, num trabalho de vários anos, poderia-se obter uma verificação mais precisa.”

Brahe critica os dados de Kepler, que não mostram valores suficientemente precisos para as excentricidades planetárias. Porém, numa outra carta, de 1599, escreve Brahe:<sup>55</sup>

“...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 pela hipótese dos sólidos perfeitos, que é fruto mais da intencionalidade de se obter uma representação harmônica sobre os movimentos celestes, do que uma investigação dos dados observacionais, construindo, 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 empírica, justamente pelo caráter apriorístico de Kepler dado no *Mysterium*. Para o astrônomo dinamarquês, a astronomia deve ser alicerçada sobre bases empíricas:

Kepler levará em conta essas críticas de Brahe no *Astronomia Nova*. Nessa obra de 1609, os dados observacionais obterão um peso significativo, pois eles não serão, em

---

<sup>54</sup>Carta de Brahe a Kepler de 11/04/1598. Retirada de Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, p. 160.

<sup>55</sup>Carta de Brahe a Kepler de 09/12/1599. Retirada de Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, p. 162.

nenhum momento dessa obra, colocados em dúvida, e servirão como elementos de elaboração e testes das hipóteses sobre a forma das órbitas planetárias.

Além dessa questão epistemológica, uma outra contribuição brahiana para os trabalhos 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, conseqüentemente, 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 abaladas -, não é viável que existam sólidos perfeitos inscritos e circunscritos nas esferas das órbitas. Mediante isso, Kepler passará a procurar, no *Astronomia Nova*, uma nova explicação para os movimentos planetários, não mais vinculada à uma explicação dada pela hipótese dos sólidos perfeitos.

Em segundo lugar, a descoberta de Brahe representou, para Kepler, a possibilidade de utilização de uma dinâmica, baseada 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 e as observações astronômicas, uma influência muito sensível de Brahe. Não apenas pelo caráter empírico obtido por Kepler, 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.

Além disso, as observações astronômicas de Tycho foram elementos possibilitaram compor as leis keplerianas, não no sentido de rompimento com o axioma platônico, mas pelo caráter de elaboração e testes de hipóteses, pois os dados observacionais, apenas, não possibilitariam romper com o axioma, pelo fato de que poderia-se construir qualquer curva mediante a utilização dos dados de Brahe. Colabora também para a quebra da circularidade a concepção dinâmica de Kepler, que procura fornecer uma explicação física dos

SBD/FELCH/USP



movimentos planetários. O ponto importante acerca dos dados é seu papel de elaboração e teste de hipóteses<sup>56</sup>.

Assim, após Brahe ter escrito uma série de cartas a Kepler, elogiando e criticando a teoria 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 do *Astronomia Nova*, que contém as suas duas primeiras leis dos movimentos planetários.

Na realidade, o encontro dos dois astrônomos ligava-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 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, em que 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 o *Astronomia Nova*. Esses elementos são, principalmente, os dados do planeta Marte, coletados por Brahe, com os quais Kepler passará a trabalhar.

---

<sup>56</sup>Ver capítulo 4 desta dissertação, onde é exposto o papel que os dados observacionais atingem para a construção e teste de hipóteses em astronomia.

### 3. A OBTENÇÃO DA SEGUNDA LEI DOS MOVIMENTOS PLANETÁRIOS

#### 3.1. *Astronomia Nova*, seus Objetivos e Etapas

O *Mysterium Cosmographicum* inaugurou as especulações astronômicas keplerianas acerca da relação existente entre os tempos e as distâncias dos percursos planetários, computadas a partir do Sol como centro de movimentos. Nessa obra, Kepler apresentou razões relacionadas mais a uma cosmologia, ou metafísica, do que propriamente razões ligadas a uma explicação física. No *Mysterium*, esse astrônomo argumenta em favor do copernicanismo tendo-se em vista a possibilidade desse sistema astronômico equacionar os tempos e as distâncias dos planetas em relação ao Sol; mas isso ligado ao seu, pode-se dizer, pitagorismo, o apego à procura de encontrar uma harmonia nas partes do mundo celeste - o número de planetas, tamanhos das distâncias, etc. -, relacionando-as num corpo de conhecimento organizado. Aliado a essa postura, Kepler acreditava piamente na existências das esferas celestes, algo comum na astronomia de sua época, e também na utilização dos dados observacionais anteriores às observações de Brahe, que, de uma certa forma, apresentavam erros relevantes que impediam a determinação de um modelo mais preciso. Em suma, o *Mysterium Cosmographicum* representou um ponto de partida interessante para a obtenção das suas leis dos movimentos planetários, como vimos no capítulo anterior, mas, por outro lado, apenas esboçou o ponto principal relativo ao processo de elaboração dessas leis, que fazem parte da dinâmica kepleriana, detalhadamente tratada no *Astronomia Nova*.

No *Astronomia Nova*, publicado em 1609, mas redigido entre 1600 e 1606, Kepler apresenta as suas duas primeiras leis dos movimentos planetários (lei da forma elíptica, e a lei das áreas), mudando o enfoque dado no *Mysterium*. No *Astronomia Nova*, Kepler deixa de considerar a astronomia como uma ciência que pode ser obtida aprioristicamente, como

era feito no *Mysterium Cosmographicum*, e passa a tratá-la como uma ciência apta a obter explicações físicas acerca dos seus fenômenos- causas físicas no sentido de obter explicações acerca do comportamento real apresentado pelos planetas em seus movimentos, admitindo-se o Sol verdadeiro, e não mediano, como o centro para tais movimentos - isto é, passa-se de uma metafísica para uma dinâmica celeste. No *Astronomia Nova*, uma nova teoria dos movimentos planetários é elaborada, unindo os dados de Brahe (os dados mais precisos de sua época) como base para tal elaboração, com a explicação dinâmica, representada por leis em linguagem matemática, como nos diz corretamente Koyré:<sup>57</sup>

“É justamente para precisar a natureza da força que move os planetas, mais exatamente para substituir por uma força magnética a força ‘animal’ do *Mysterium Cosmographicum*, e para determinar as leis estritamente matemáticas que regem a sua ação, elaboradas sob as bases dos dados de observação que foram fornecidos pelas obras de Tycho Brahe, que foi construída uma nova teoria dos movimentos dos planetas, relatada por Kepler no *Astronomia Nova*.”

Em linhas gerais, o *Astronomia Nova* é um relato do tratamento dado por Kepler aos dados observacionais coletados por Tycho Brahe para o planeta Marte. Mediante esses dados, Kepler objetivava obter a verdadeira forma da órbita de Marte, bem como elaborar tabelas mais precisas dos posicionamentos desse planeta ao longo do seu trajeto anual. Segundo o próprio Kepler, o *Astronomia Nova* tem como finalidade:<sup>58</sup>

“Meu objetivo no presente trabalho é o de reformar a teoria astronômica (especialmente para o movimento de Marte) em todas as suas três formas de hipóteses [ptolomaica, copernicana, brahiana], de modo que se possa construir tabelas que correspondam aos fenômenos celestes.”

Até a formulação desse objetivo Kepler pode ser classificado como um astrônomo ligado ao procedimento habitual dado à astronomia de sua época, restrito a uma cinemática celeste, que procurava obter representações matemáticas dos movimentos planetários,

<sup>57</sup>Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, p. 159.

concordantes com as exigências do axioma platônico. Porém, prossegue o nosso astrônomo:<sup>59</sup>

“...Eu inquiri sobre as causas físicas e naturais dos movimentos. O resultado eventual dessas considerações é a formulação de argumentos claros que mostram que a opinião de Copérnico sobre o mundo (que sofre pequenas mudanças) é a verdadeira, e que as outras duas são falsas.”

ou seja, Kepler fará considerações sobre as causas físicas que geram os movimentos dos planetas, sendo que é justamente com essas considerações que o livro adquire significado em relação a ruptura com a astronomia tradicional. É por meio das especulações físicas que a astronomia kepleriana rompe paulatinamente com o reinado do axioma de movimentos circulares e uniformes.

Essas especulações físicas devem ser entendidas como a substituição do centro fictício para a computação dos movimentos planetários, tal como o equante ou o círculo excêntrico, etc., pelo centro físico de movimentos, que no caso da astronomia kepleriana é o Sol, e, a partir disso, derivar as razões que levam os planetas a se comportarem segundo o que se observa. Dessa forma, a renovação dada para a astronomia está no fato de Kepler não utilizar centros fictícios ou aproximativos, como era o caso de Copérnico e Brahe, ou de um centro físico, mas desalocado de função, como era o caso de Ptolomeu, com a postulação da Terra como centro físico, mas com um equante como centro de movimentos; no lugar dessas, Kepler utiliza um centro real, o corpo solar.<sup>60</sup>

“Ora, o primeiro passo em direção à determinação das causas físicas [dos movimentos dos planetas] está em demonstrar que os planos de todos os excêntricos intersectam-se em nenhum outro lugar a não ser o centro do corpo solar (e não em algum ponto próximo), contrário ao que pensavam Copérnico e Brahe.”

---

<sup>58</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, Introdução, p. 48.

<sup>59</sup>*Idem.*

<sup>60</sup>*Idem.*

Assim, no *Astronomia Nova* o Sol não tem apenas uma função arquitetônica, ou estética, a de ser o centro dos movimentos dos planetas, alicerçadas numa postura metafísica, como foi, de uma certa maneira, representado no *Mysterium*. No trabalho de 1609, mediante a introdução do conceito de força, Kepler dá ao Sol a função de ser o corpo central por ele produzir as irregularidades constatadas observacionalmente. Dessa substituição entre o Sol matemático para o Sol físico, que representa a base para a formulação de uma dinâmica celeste, está, justamente, a ruptura com o axioma de movimentos circulares e uniformes. A união da astronomia com a física é alicerçada, principalmente, na tentativa de explicação dos movimentos celestes através de conceitos representativos das ocorrências fenomênicas desses movimentos, não havendo, segundo Kepler, a possibilidade do axioma dos movimentos circulares e uniformes representar os movimentos e dar, ao mesmo tempo, as razões físicas para a explicação desses movimentos.

Para obter os objetivos básicos do *Astronomia Nova*, Kepler apresenta essa obra como uma discussão entre os três modelos, ou hipóteses, como Kepler as chamou, astronômicos de sua época, a saber, o ptolomaico, o copernicano e o de T. Brahe. Kepler discute a possibilidade de cada uma dessas hipóteses permitir uma representação física dos movimentos do planeta Marte, obtendo como resultado a defesa do copernicanismo como o único que alcançaria tal representação. Na verdade, Kepler defende o seu próprio modelo astronômico. A utilização das teses copernicanas de centralidade do Sol e mobilidade da Terra foram utilizadas, mas o posicionamento do centro de movimentos não era o mesmo que o de Copérnico. Como veremos mais adiante, Copérnico não podia admitir um centro físico para os movimentos planetários, justamente por ele estar por demais preso ao axioma platônico, impedido, conseqüentemente, de elaborar explicações físicas dos movimentos, o que o levou a restringir-se a uma cinemática celeste. A utilização de uma explicação física não representou apenas a afirmação do Sol como o centro dos movimentos, mais do que isso, representou a ruptura com um padrão prévio, gerando a substituição desse pela construção do conhecimento através dos dados observacionais e pela elaboração de hipóteses.

O *Astronomia Nova* é composto de cinco partes, sendo que apenas a segunda, a terceira e a quarta partes interessam no que concerne à ruptura com o axioma platônico, pois são nelas que estão contidas as elaborações das duas primeiras leis dos movimentos celestes. A primeira parte faz uma apresentação das hipóteses copernicanas, ptolomaicas e brahianas, e mostra também os argumentos para comprovar a equivalência observacional que ocorre entre essas três hipóteses. Pode-se dizer que essa é uma parte cinemática, em que Kepler apresenta as três hipóteses como obtendo resultados equivalentes no que diz respeito aos posicionamentos dos planetas, com a utilização de expedientes distintos. Porém, Kepler argumenta que todas elas pecam quanto à determinação das causas físicas dos movimentos planetários. A intenção kepleriana é dada quanto à ruptura com a astronomia de sua época, que não tratava de uma dinâmica celeste. A quinta parte, trata das latitudes, na qual Kepler comenta algumas observações dos astrônomos antigos, relacionado a essas os resultados a que chegou nas outras partes do *Astronomia Nova*.

O projeto kepleriano nessa obra de 1609 foi obter um rompimento em relação ao tratamento tradicional dado à astronomia, restrita a um mapeamento celeste. Para Kepler, essa ciência não deve ficar restrita à determinação a mais exata possível dos posicionamentos dos planetas ao longo de seus percursos; mais do que isso, a astronomia deve fornecer explicações físicas dos comportamentos irregulares apresentados pelos planetas; sendo que essas irregularidades devem ser expressas em forma de leis matemáticas que representem a estrutura harmônica subjacente aos fenômenos observados. Em síntese, no *Astronomia Nova*, Kepler admite as teses metafísicas de harmonia celestes, já contidas no *Mysterium Cosmographicum*, mas rompe com a postura apriorística que é marca dessa última, inserindo, na obra de 1609, especulações dinâmicas para a obtenção da explicação dos comportamentos observados dos planetas.

Em relação à astronomia tradicional, o projeto kepleriano implicou a admissão de novos elementos, que de uma certa forma retiraram o caráter “simplificado” que era obtido pela astronomia cinemática de Ptolomeu, Copérnico e Brahe. Numa astronomia meramente descritiva, - em que seu objetivo é o de simplesmente “Salvar as Aparências”, independentemente de seus modelos serem ou não expressões da realidade celeste - os artifícios construídos bastam para os seus propósitos de representação dos posicionamentos

planetários, acarretando que esses artifícios utilizados devem ser os mais simples possíveis, e com a utilização do menor número deles. Com a introdução da procura de explicações físicas, rompe-se com esse modelo simplificado; a astronomia não poderá apenas descrever cinematicamente os movimentos, mas, além disso, deve explicar o comportamento irregular desses movimentos. Aliado a isso, Kepler ainda tinha o problema do grande respeito que o axioma platônico representava na astronomia de sua época, implicando que o seu modelo devia, além de obter bons resultados quanto aos posicionamentos planetários, explicar fisicamente os movimentos planetários de modo a condicionar essa explicação a uma adequação aos princípios de circularidade e uniformidade, o que, de uma certa maneira, aumentou o trabalho de Kepler.

Porém, quando Kepler obteve as suas duas leis, todas as complicações que ele enfrentou foram substituídas por uma simplificação no resultado final. Em outras palavras, o aumento representado na admissão de causas físicas no tratamento astronômico levou, no processo de construção desse conhecimento, a uma complicação excessiva em relação à astronomia cinemática, mas, quando findo o trabalho, essas complicações eliminaram todos os recursos geométricos utilizados na tentativa de adequação dos movimentos observados ao axioma de circularidade e uniformidade, como nos diz corretamente Koyré:<sup>61</sup>

“Assim, paradoxalmente, as inovações keplerianas [na astronomia]: a introdução das concepções dinâmicas na teoria dos movimentos planetários, transferindo a origem das órbitas para o Sol real, permitiram, ou implicaram, complicações que resultaram em inovações que a simplificaram extraordinariamente; tanto assim que por uma uniformização surpreendente da estrutura cinética do mundo astral, levaram, pela primeira vez na história da astronomia, os movimentos dos planetas a se efetuarem realmente sobre os círculos.”

As especulações dinâmicas operadas no *Astronomia Nova* representaram não apenas uma postura de defesa do copernicanismo, com a admissão da centralidade do Sol e mobilidade da Terra; mais do que isso, tal dinâmica é a tentativa de expressão da realidade do mundo físico celeste. Dessa maneira, pode-se entender as complicações que Kepler foi obrigado a enfrentar na sua “guerra contra Marte”, pois teve que construir a sua teoria sobre

os movimentos desse planeta tanto sob o ponto de vista de uma cinemática, quanto de uma dinâmica, tendo-se em vista as dificuldades de romper com o modelo de circularidade e uniformidade dos movimentos planetários.

Assim, o problema do *Astronomia Nova* era o de construir uma astronomia física, que não existia em sua época, utilizando inicialmente os conhecimentos da astronomia cinemática e substituindo paulatinamente os elementos dessa pelos resultados físicos obtidos que concordam, ou melhor, são corroborados pelos dados observacionais de Brahe e, dessa forma, construir uma nova astronomia que não mais necessitará dos artifícios extremamente complexos da astronomia geométrica pré-kepleriana.

Desse modo, pode-se entender a dificuldade da leitura do *Astronomia Nova*, pois Kepler nos relata todo o seu processo de elaboração das leis; tanto os resultados positivos, quanto os negativos são narrados, passo a passo, nos seus mínimos detalhes. E é justamente nessa narrativa completa que se entende todo o grau de dificuldade que esse astrônomo enfrentou. Kepler teve que construir a sua astronomia, substituindo a anterior pelos novos resultados obtidos sem saber, ao certo, se ele estava correto ou não; disso procederam os vários problemas que ele enfrentou. Somente quando Kepler chegou às suas duas primeiras leis é que ele pôde romper com a metodologia instrumentalista, que impunha uma astronomia meramente cinemática, alicerçando a astronomia sobre bases físicas.

Mediante essa visão do alto grau de dificuldade enfrentado por Kepler, pode-se entender também o método por ele utilizado no *Astronomia Nova*. Kepler foi, antes de tudo, um formulador de hipóteses, seja no que concerne às hipóteses centrais, acerca da verdadeira forma da órbita de Marte - testou tanto a circular, quanto a ovalada, até chegar à elíptica -, seja na construção de hipóteses auxiliares, tais como a vicária, ou a hipótese das superfícies, transformada, no final da obra, na sua segunda lei dos movimentos planetários; bem como, e o ponto talvez mais importante, a postulação de conceitos teóricos, inobserváveis, como o conceito de “força”, para a obtenção de uma explicação física. Assim, a construção da astronomia kepleriana foi feita de tentativas, de conjecturas, acerca de qual é a realidade dos acontecimentos celestes, sendo que os resultados obtidos foram

---

<sup>61</sup>Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, p. 170.



frutos do trabalho de construir um conhecimento que retirava a astronomia da posição de uma ciência que não trata do mundo real.

Assim, a exposição que se seguirá nesta dissertação tem como finalidade apresentar essas etapas percorridas por Kepler para a obtenção das suas duas primeiras leis dos movimentos planetários, mostrando que a ruptura com o axioma platônico deveu-se à necessidade desse astrônomo em instaurar explicações de caráter dinâmico na elaboração de sistemas acerca das órbitas e movimentos dos planetas. Assim, este texto defende a idéia de que a quebra com circularidade e uniformidade foi fruto da impossibilidade de adequar tais requisitos a uma explicação de caráter físico.

### **3.2. Primeiros Resultados - A Hipótese Vicária**

Os primeiros resultados relevantes obtidos por Kepler no *Astronomia Nova*, relativos à formulação das suas duas primeiras leis astronômicas, são relacionados a um tratamento puramente cinemático, em que as considerações dinâmicas não aparecem. Tais resultados são a descoberta da não variação da órbita de Marte e, também, a formulação da hipótese vicária, ou hipótese suplementar, que consistia em assumir um ponto equante para, a partir dele, conjugar uniformemente os movimentos numa órbita circular excêntrica.

Como foi dito acima, Kepler narrou detalhadamente todas as etapas de seu procedimento. Assim, ele nos relata os motivos que o levaram a adotar esse procedimento cinemático antes de realizar o seu tratamento dinâmico. Os motivos eram dados primeiramente pelo fato dele ter que ir rompendo paulatinamente com o primado de uma astronomia eminentemente cinemática, construindo degrau por degrau a união entre a física e a astronomia, ocasionando a necessidade de operar uma retomada dos problemas e procedimentos adotados pela astronomia tradicional, interessada mais em “Salvar as Aparências” do que construir uma astronomia física.

Desta maneira, Kepler inicia o *Astronomia Nova*, em sua primeira parte, com a apresentação dos problemas da astronomia de sua época, tais como a constatação das duas irregularidades apresentadas pelos planetas - a não-uniformidade entre arcos e tempos

(primeira), e a retrogradação (segunda)<sup>62</sup>. A seguir, apresenta os três modelos astronômicos desse período, o ptolomaico, copernicano e brahiano argumentando que eles são equivalentes sob o ponto de vista da determinação dos posicionamentos planetários, isto é, todos eles conseguem, utilizando artifícios distintos (Copérnico e Brahe usam o concêntrico com epiciclos, enquanto Ptolomeu utiliza o equante), obter dados relativamente satisfatórios para a determinação dos posicionamentos planetários. Porém, todos eles pecam por não tratarem a astronomia sob o ponto de vista físico<sup>63</sup>. Para todos esses modelos, os planetas perfazem movimentos circulares, excêntricos, epicíclicos, etc., pela “inteligência” que eles teriam para poder percorrer essas determinadas curvas, implicando em uma interpretação anímica para a explicação dos movimentos dos planetas. Kepler opor-se-á violentamente a essa postura, implicando essa sua crítica na elaboração do seu conceito de força, que é a base de sua dinâmica.

Na segunda parte do *Astronomia Nova*, Kepler apresenta um tratamento cinemático para a resolução da primeira desigualdade - a da variação dos arcos de circunferência percorridos pelos planetas em seu trajeto ao redor do centro físico de movimentos -, sendo que essa postura cinemática foi feita mediante o procedimento dado pelos astrônomos antigos, isto é, sem considerações sobre as causas físicas desses movimentos; admitindo, apenas, artifícios geométricos para “Salvar as Aparências”.

Ao iniciar a segunda parte do *Astronomia Nova*, capítulo VII, Kepler apresenta as razões que o levaram a tratar do planeta Marte, quando iniciou os seus trabalhos com Brahe, e que, subsequente, permitiram-no formular a sua teoria sobre esse planeta. Essas razões eram relacionadas à necessidade kepleriana de encontrar dados mais significativos no que concerne às excentricidades dos planetas, para a obtenção de uma teoria que concordasse com a sua hipótese dos sólidos perfeitos do *Mysterium Cosmographicum*; desta forma, escreve Kepler:<sup>64</sup>

“...Quando eu vim a visitá-lo [Brahe] no início de 1600, eu objetivava obter as excentricidades corretas dos planetas. Mas como eu notei, durante as minhas primeiras caminhadas, que, da mesma forma que Copérnico e Ptolomeu, ele

<sup>62</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. I.

<sup>63</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, caps. II a VI.

<sup>64</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. VII, pp. 184 - 185.

[Brahe] fez uso do movimento mediano do Sol, sendo que o movimento aparente pode estar mais de acordo como o meu pequeno livro (*Mysterium Cosmographicum*), comecei a fazer uso das observações à minha maneira. Nessa época, seu auxiliar Christian Severinus [Longomontanus] estava trabalhando na teoria de Marte.....Se ele tivesse tratado de um planeta diferente, eu poderia ter tido muitas dificuldades para realizar os meus objetivos.”

Kepler trabalhou, portanto, com os dados sobre o planeta Marte. Esse fato é muito importante, pois esse planeta apresenta, à exceção de Mercúrio, a maior excentricidade, o que permitiu a Kepler obter a forma elíptica desse planeta. Caso ele tivesse em mãos dados de um outro planeta, talvez, a astronomia não obteria as suas duas primeiras leis dos movimentos planetários nessa época.

Tendo em mãos os dados de Marte, Kepler passa a procurar uma teoria acerca dos movimentos desse planeta diferente da obtida por Brahe. Esse astrônomo tinha, através dos dados sobre Marte, conjugados com a sua teoria híbrida de centralidade da Terra e movimentos dos planetas em torno do Sol, elaborado uma teoria que representava satisfatoriamente as posições de Marte quando em oposição ao Sol, com um erro de aproximadamente 2' de arco no que concerne às longitudes; mas a teoria não se mostrou eficaz em relação às latitudes, com uma margem de erro relevante. Isso levou Kepler a procurar uma teoria que representasse corretamente as latitudes de Marte.

Como primeiro resultado dessa procura, Kepler chegou à descoberta de que a órbita de Marte não tem uma variação na sua inclinação em relação à eclíptica<sup>65</sup>. Com isso, ele rompe com a posição adotada por Ptolomeu e Brahe, de que as órbitas planetárias têm uma variação em relação à eclíptica, sendo que isso foi obtido pelo fato de Kepler não partir de um ponto fictício, como fizeram os outros dois, mediante a posição do Sol mediano, mas, pelo contrário, de que o plano da órbita de Marte, e também dos outros planetas, passam pelo próprio corpo de Sol. Desta forma, o primeiro triunfo de Kepler em relação à Marte é determinar que i) a inclinação do plano da órbita de Marte, e dos outros planetas, é constante (algo que Copérnico e Galileu já tinham notado para o caso da Terra); ii) que ela

---

<sup>65</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XIV.

tem um valor de  $1^{\circ} 50'$  em relação à eclíptica; iii) que o plano da órbita passa pelo corpo do Sol, e não sobre o centro representado pelo Sol mediano.

Com esses resultados, Kepler passa a trabalhar na sua primeira tentativa, no *Astronomia Nova*, de determinar uma teoria acerca da órbita do planeta Marte. Partindo da aceitação de que o plano da órbita de Marte passa pelo corpo do Sol, ele precisava encontrar os seguintes elementos dessa órbita, a saber: 1) a posição da linha das apsides (precisava saber em que posição o planeta está mais afastado e em que posição ele está mais próximo do Sol); 2) o valor da excentricidade; 3) a anomalia mediana para qualquer posição de Marte em seu trajeto ao redor do Sol.

Para obter esses elementos, Kepler fez uso da sua hipótese vicária<sup>66</sup> (formulada no capítulo XVI do *Astronomia Nova*), ou hipótese suplementar, como ele mesmo a denominava. Tal hipótese consistia em assumir o ponto equante ptolomaico, e, a partir desse ponto, conjugar as irregularidades das velocidades dos planetas ao princípio de circularidade e uniformidade, e, dessa forma, representar a forma da órbita de Marte. Com a utilização dessa hipótese, Kepler procurou recuperar as especulações iniciadas no *Mysterium Cosmographicum*, nas quais os planetas, no caso Marte, perfazem movimentos em torno do Sol verdadeiro, com uma velocidade variando de acordo com o aumento ou diminuição de suas distâncias a esse centro.

Essa introdução do equante é de capital importância para o processo de elaboração das leis, pois, apesar do equante ser um expediente de cálculos matemáticos, ele serviu como instrumento de trabalho, e mostra também o valor que o critério empírico assume no *Astronomia Nova*, até a formulação de uma teoria significativa acerca das razões físicas dos movimentos planetários.

Ptolomeu usou o equante bisetando a excentricidade, isto é, posicionou o centro das órbitas exatamente no meio da distância entre o centro físico (Terra) e o ponto equante, que é o ponto em que os planetas perfazem movimentos uniformes. Para tanto, Ptolomeu podia utilizar apenas 3 oposições do planeta, pois fazia esse trabalho *a priori*<sup>67</sup>. Kepler,

---

<sup>66</sup>O significado da palavra vicária é aquele que faz as vezes de outrem ou de outra coisa, (conferir Aurélio, *Novo Dicionário da Língua Portuguesa*). Por essa significação, pode-se entender que a hipótese vicária faz-se passar por outra, isto é, pela hipótese física, a segunda lei, que será justificada mais adiante no *Astronomia Nova*, cap. LIX.

<sup>67</sup>Isso porque um círculo pode ser construído a partir de três pontos dados.

porém, procura determinar o equante de uma forma empírica, e utiliza não 3, mas 4 oposições do planeta Marte para obter a posição do equante nas apsides.

Kepler utilizou quatro oposições do planeta Marte, catalogadas por Tycho nos anos de 1587, 1591, 1593 e 1595. Por meio de um raciocínio geométrico sobre esses dados (pela determinação das distâncias pela semelhança entre os lados e ângulos dos triângulos<sup>68</sup> formados entre essas oposições com o equante, o centro da órbita e o Sol verdadeiro), Kepler obteve o seu objetivo. O procedimento de Kepler foi basicamente o seguinte:

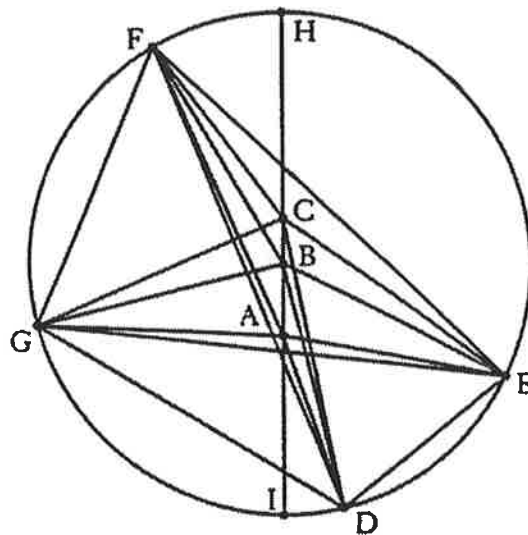


Figura 10<sup>69</sup>

Na figura 10 acima, D, G, F e E<sup>70</sup> são as quatro oposições do planeta Marte; B é o centro do excêntrico BG; C é o equante; A é Sol; HI a linha das apsides. O problema de Kepler era o de posicionar as oposições de Marte (D, G, F e E) sobre o excêntrico BG, de forma que B, C e A estejam posicionadas sobre as apsides de uma maneira tal que os valores (das excentricidades) dessas sejam constantes e, conseqüentemente, possibilitem a computação dos ângulos HCF e HAF (anomalia mediana e verdadeira, respectivamente) para qualquer posição de Marte. Em outras palavras, para determinar qualquer posição de Marte sobre o zodíaco, era necessário encontrar um valor fixo para a excentricidade - para, dessa maneira, elaborar tabelas sobre os posicionamentos do planeta. Para tanto, Kepler

<sup>68</sup>Baseada nas proposições do livro VI do *Elementos* de Euclides.

<sup>69</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XVI, p. 252.

precisou ajustar as quatro oposições de Marte, de modo que AB fosse igual a BC; isso foi dado através do ajustamento das oposições - uma por vez, para em seguida, relacionar todas com todas. Kepler foi obrigado a fazer várias tentativas, do tipo ensaio e erro<sup>71</sup>, aproximando os dados e tentando construir esse círculo excêntrico. Por exemplo, no ponto F, o ângulo FAH, anomalia verdadeira, é dado pelas observações de Brahe, e, desta forma, o ângulo FCH também o é<sup>72</sup>. Assim, a partir de F pode-se localizar C na linha das apsides, de uma forma provisória. Após isso, deve-se localizar os outros pontos (G, D e E) de maneira que a posição de C seja igual para todos - isto é, CB tenha o mesmo valor em relação a cada oposição; após isso, BA também tem que ter o mesmo valor de C (CB = BA). Kepler obteve os resultados finais<sup>73</sup> de que a longitude no afélio é de 28° 48' 55" de Leão; como o valor de BA = 11332, e CB = 7232, sendo o raio avaliado como igual a 100.000.

A partir desses resultados, Kepler investigou se o centro do círculo excêntrico ligasse ou não à linha AB. A conclusão a que esse astrônomo chegou foi que, para isso ocorrer, deve-se alterar ou assumir outra direção de HI e dos ângulos HBF e HAF.

Kepler notou que a excentricidade do planeta não era fixa, mas oscilava na linha das apsides, acarretando que ao se dividir o círculo de movimentos em 360°, o planeta, quando está em 90° (isto é, quando está no primeiro quadrante) tem um erro de 2' de arco, um erro desprezível para a época; mas testando quando está em 45° ou 135° (isto é, quando está no primeiro octante do primeiro quadrante, e no primeiro octante do segundo quadrante) o erro obtido foi de 8' de arco, o que para Kepler era algo inconcebível<sup>74</sup>.

A introdução do ponto equante, isto é, a formulação da hipótese vicária kepleriana, deve ser tratada mais detalhadamente, pois representa uma etapa no processo de elaboração das leis que, apesar de não operar uma dinâmica, possibilita compreender o método

---

<sup>70</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XVI, p. 252 e seguintes.

<sup>71</sup>Na verdade, Kepler escreveu cerca de 900 páginas (não incluídas todas no *Astronomia Nova*), na tentativa de ajustar a órbita circular a esses elementos.

<sup>72</sup>A anomalia mediana era obtida através do conhecimento da anomalia verdadeira e da equação ótica. Ver seção 3.5. desta dissertação.

<sup>73</sup>O procedimento geométrico completo kepleriano para a formulação hipótese vicária é extremamente difícil e longo; apresentamos apenas um esquema desse procedimento. Para maiores informações ver o capítulo XVI do *Astronomia Nova*, bem como Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, pp. 173 -175; e Simon. G., *Kepler, Astronome Astrologue*, pp. 316 -317.

<sup>74</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XIX.

kepleriano para obtenção de suas leis. Kepler aceitou as teses centrais do copernicanismo (centralidade do Sol e mobilidade da Terra), mas rompe, de uma certa forma, com o procedimento de Copérnico quanto à derivação dos posicionamentos planetários ao assumir o equante que foi, pode-se dizer, o motivo central da ruptura entre Copérnico com Ptolomeu.

O equante tinha em Ptolomeu a função de uniformizar as inconstâncias entre os arcos de circunferência percorridos pelos planetas com os tempos gastos em tais percursos, ou seja, o equante ptolomaico objetivava determinar ângulos iguais em tempos iguais. O equante era um ponto matemático, sem relação com o centro físico de movimentos planetários<sup>75</sup>.

Para Ptolomeu, a astronomia tinha a tarefa de construir modelos descritivos dos movimentos planetários, procurando corrigir as irregularidades constatadas pelas observações, com o intuito de descrever da maneira mais exata possível os posicionamentos dos planetas. A astronomia tinha como objetivo realizar uma cinemática; mas não era sua função realizar considerações cosmológicas ou dinâmicas, isto é, não caberia a ela tentar explicar os movimentos planetários. Ptolomeu não se preocupou com a questão de qual modelo construído para “Salvar as Aparências” era o verdadeiro, ou qual não era.

Desse modo, o equante ptolomaico pode ser entendido como um expediente de cálculos matemáticos, desprovido de caráter físico, operacionalizado apenas com o intuito de derivar os melhores posicionamentos planetários possíveis, acarretando que o princípio de circularidade e uniformidade é derivado a partir de um ponto fictício.

Copérnico aboliu de seu sistema astronômico a utilização do equante como expediente de cálculos para os posicionamentos planetários. Essa sua recusa faz parte da sua crença no axioma platônico de movimentos circulares e uniformes. Para Copérnico, as órbitas dos planetas e a relação entre as distâncias percorridas (arcos de circunferência) com os tempos devem ser circulares e uniformes em relação a um centro físico de movimentos, e não, como em Ptolomeu, a um centro matemático, não físico. Para Copérnico, quando Ptolomeu utilizou o equante, ele feriu a possibilidade de utilização do axioma platônico aos fenômenos celestes.

---

<sup>75</sup>A questão do equante como expediente matemático foi discutido no capítulo I desta dissertação.

Na sua primeira obra astronômica, o *Commentariolus*, Copérnico escreve na terceira exigência:<sup>76</sup>

“Todos os orbes giram em torno do Sol, como se ele estivesse no meio de todos; portanto, o centro do mundo está perto do Sol.”

Por essa exigência, nota-se que o Sol ocupa um papel importante, pois é a partir dele que os movimentos serão computados como circulares e uniformes, e, dessa forma, retira o papel do equante como centro de computação dos movimentos. Porém, é nas *Revoluções das Orbes Celestes*, que se nota o peso da aceitação do Sol como centro dos movimentos planetários.

Copérnico, nas *Revoluções*, Livro IV, cap. II, ao comentar o tratamento astronômico dos antigos no que concerne à determinação de movimentos circulares e uniformes para a Lua, (sendo que essa mesma crítica será empregada, no Livro V, para qualquer planeta) critica a utilização do expediente ptolomaico do equante. Para Copérnico, a utilização do equante faz que a tentativa de adequar o movimento aparente não uniforme da Lua ao movimento não uniforme apresentado pelo epiciclo (que é uniforme em relação ao equante) fira o axioma da uniformidade:<sup>77</sup>

“Mas se é assim, que diremos acerca do axioma segundo o qual o movimento dos corpos celestes é uniforme e só aparentemente apresenta-se como não uniforme, quando o movimento aparente uniforme do epiciclo é, de fato, não uniforme, coisa absolutamente contrária ao princípio estabelecido e à afirmação feita?”

Desse modo, Copérnico rejeita o equante. Suas razões estão ligadas a um forte respeito ao axioma platônico de movimentos circulares e uniformes; tal crença impedirá Copérnico, como veremos mais<sup>8</sup> adiante, de resolver o problema da não uniformidade aparente dos planetas (primeira desigualdade).

---

<sup>76</sup>Copérnico, N., *Commentariolus*, p. 104.

<sup>77</sup>Copérnico, N., *As Revoluções das Orbes Celestes*, Livro IV, cap. II, p. 319.



Kepler, porém, introduz o equante em sua teoria, isto é, utiliza a sua hipótese vicária para a determinação dos movimentos do planeta Marte. Neste estágio do *Astronomia Nova*, a hipótese vicária trabalha com o princípio da circularidade e uniformidade, sem considerar as causas físicas para a determinação dos posicionamentos de Marte. De uma certa forma, Kepler está preso à crença aceita pela tradição astronômica de sua época, o respeito incontestável ao axioma da circularidade e uniformidade, como nos diz Kepler na Introdução ao *Astronomia Nova*, acerca do capítulo XVI.<sup>78</sup>

“Portanto, à imitação dos antigos, as causas físicas não sendo consideradas, se põe que o caminho do planeta é circular; e coloca-se que existe um certo ponto contido em seu interior, ao redor do qual o planeta percorre ângulos iguais em tempos iguais; e que entre ele (ponto) e o centro do Sol encontra-se o círculo do centro planetário a uma distância desconhecida. Estando isso colocado, e sendo tomadas quatro observações anacrônicas com as posições sobre o zodíaco e os intervalos de tempo, é pesquisado por um método muito laborioso a posição de um e de outro centro sobre o zodíaco, a distância do centro do Sol e a proporção da excentricidade dos dois, de uma parte entre elas mutuamente, de outra parte ao raio do círculo.”

Porém, nesse estágio de formulação da hipótese vicária, Kepler rompe, de um certo modo, com o copernicanismo, pois a reintrodução do equante pela hipótese vicária implica um abandono em relação ao axioma platônico -isso se aceitarmos as críticas de Copérnico quanto ao equante. Pode-se argumentar, contudo, que a utilização do equante por Kepler tem a característica de ser uma hipótese de trabalho, uma hipótese instrumental sem considerações físicas; subseqüentemente, com as suas duas primeiras leis dos movimentos planetários, o equante é abolido, tornando-se as leis as expressões dos acontecimentos celestes.

Pode-se justificar essa posição pela utilização do equante no desenvolvimento do *Astronomia Nova*. Ele será utilizado e substituído pela lei das distâncias, lei física kepleriana, mediante a hipótese das superfícies (segunda lei). Isto é, Kepler substituirá o

---

<sup>78</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, Introdução, p. 85. A tradução dessa citação foi feita a partir da tradução do *Astronomia Nova* de Jean Peyroux, p. XXXII.

equante por uma hipótese física, mostrando que os resultados satisfatórios obtidos pela hipótese vicária também são dados por essa hipótese física, como veremos na seção 3.5 desta dissertação.

Além disso, como salienta Koyré, a hipótese vicária também apresenta uma face da postura kepleriana de não construir a astronomia, no *Astronomia Nova*, sob o ponto de vista *a priori*. A hipótese vicária kepleriana foi construída mediante os dados de Brahe, sem ter como referência o centro orbital de Copérnico, que deslocava o centro físico de movimentos para o centro da órbita terrestre, necessitando a utilização de deferente e epiciclos. Em outras palavras, a hipótese vicária apresenta o caráter empirista da epistemologia de Kepler - pois ele utilizou dados observacionais fornecidos pelas observações de Brahe para a construção da hipótese vicária, e não a construiu mediante expedientes matemáticos, como afirma Koyré:<sup>79</sup>

“...A teoria que nos expomos -que Kepler chamará de *hipótese vicária*, ou *hipótese suplementar*-, tem, portanto, para ele o valor de um instrumento de trabalho. Para nós, contudo, o valor é outro. Ela não é técnica; ela é psicológica. Ela nos mostra um aspecto da mentalidade kepleriana, um aspecto que pode ser denominado de ‘Tycho Brahiano’, ou ainda ‘empirista’ ....que nos faz compreender os limites, ou melhor, a própria estrutura do seu *a priorismo*.”

Assim, a utilização do equante ptolomaico por parte de Kepler foi condicionado a sua exigência de relacionar os movimentos mediante os dados empíricos de Brahe, retirando o caráter meramente apriorístico presente no *Mysterium*. Nesse estágio do *Astronomia Nova*, sem considerações dinâmicas, a hipótese vicária representa uma tentativa de construir uma representação dos movimentos de Marte, conjugados à circularidade e uniformidade, sob o ponto de vista empírico, e não meramente metafísico.

Voltando para a formulação da hipótese vicária, Kepler, após constatar que a excentricidade não é fixa, acarretando erros significativos no que concerne aos octantes, passa a pôr em dúvida essa hipótese, iniciando, o seu tratamento de crítica aos princípios

---

<sup>79</sup>Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, pp. 175 -176.

que conduziram a astronomia desde Platão; escreve Kepler, sobre os 8' de erro obtidos pela hipótese vicária :<sup>80</sup>

“...Portanto, alguma dessas coisas que nos assumimos deve ser falsa. Mas o que nos assumimos foi: que a órbita sobre a qual o planeta se move é um círculo perfeito; e que existe apenas um único ponto sobre a linha das apsides numa distância fixa e constante a partir do centro do excêntrico, sobre a qual Marte descreve ângulos iguais em tempos iguais. Portanto, dessas, uma deve ser falsa, ou ambas devem ser falsas, pois as observações não são falsas.”

Isso apresenta algo muito importante. De fato, o erro está na aceitação da circularidade, algo que Kepler não sabia nessa época; com a descoberta da forma elíptica, a falsidade da circularidade será corroborada. O importante é notar a força que os dados de Brahe tinham. Em nenhum momento de sua “guerra contra Marte” Kepler duvidará desses dados, tanto que continua mais adiante:<sup>81</sup>

“Mas quanto a nós, que pela bondade divina, pudemos dispor de um observador tão exato como Tycho Brahe, convém que reconheçamos essa dádiva divina e a usemos..... Logo, irei para o alvo segundo as minhas próprias idéias, porque se tivesse acreditado podermos ignorar os oito minutos, teria aceitado, de acordo, a minha hipótese. Visto, porém, não ser possível ignorá-los, esses oito minutos apontam o caminho para uma completa reforma da astronomia; tornaram-se o material de construção de grande parte desta obra.”

Essas palavras de Kepler devem ser tratadas mais detalhadamente. Podem-se apontar dois elementos importantes contidos nela. O primeiro é o respeito desse astrônomo pelos dados observacionais, e a procura de precisão. O segundo é a sua afirmação de que não ignorar os 8' apontam para uma reforma da astronomia.

O primeiro elemento mostra um dos critérios keplerianos para o tratamento dos movimentos celestes, a saber, os dados observacionais de Brahe como elementos de testes das hipóteses dos movimentos, que são utilizados plenamente na quarta parte do

---

<sup>80</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XIX, pp. 283 - 284.

<sup>81</sup>*Idem*, p. 286. Utilizamos, para essa citação, a tradução de Koestler, A., na sua obra *Os Sonâmbulos*, p. 221.

*Astronomia Nova*. Embora nesse momento do *Astronomia Nova* Kepler trabalhe com o paradigma da circularidade e uniformidade,- pois a hipótese vicária procura uniformizar os movimentos aparentemente não uniformes dos planetas, sendo que não há qualquer referência às causas físicas desses movimentos, o que implica que Kepler faz um tratamento cinemático, nos mesmos moldes que a astronomia de sua época, o que lhe permitiria satisfazer-se com esses 8' de erro (tanto Copérnico quanto Ptolomeu tinham uma margem de erro superior a da hipótese vicária, tinham 10' para cada um)-ele rejeita os 8'. Neste sentido, os dados observacionais são tratados não apenas como informações para a procura de uma melhor adequação entre a observação e a teoria, mas como um elemento de teste de hipóteses<sup>82</sup>.

O segundo elemento, a afirmação kepleriana de que os 8' apontam para uma reforma da astronomia, é um ponto central na história da determinação dos movimentos planetários. Essa reforma dar-se-á justamente quando Kepler romper com o axioma platônico. Subseqüentemente, nas partes III e IV do *Astronomia Nova*, Kepler irá paulatinamente rompendo com o pressuposto de circularidade, sendo essa idéia substituída pela forma elíptica, e o pressuposto de uniformidade entre arcos e tempos será substituído pela uniformidade entre áreas e tempos.

Até Kepler nenhum astrônomo tinha colocado em dúvida o axioma da circularidade e uniformidade. Sua aceitação era dada como parte integrante do arcabouço científico, cultural e filosófico herdado dos antigos.<sup>83</sup> Como nos diz Hanson, esse princípio não poderia ser colocado em questionamento, dado o contexto intelectual dos antigos e assumidos pelos astrônomos pré-keplerianos<sup>84</sup>

---

<sup>82</sup>Em uma astronomia cinemática, como a de Ptolomeu, os dados observacionais eram elementos de adequação das hipóteses a esses dados, pois, nessa astronomia, devia-se construir hipóteses que sejam simples e econômicas, não entrando em consideração a verdade ou falsidade de tais hipóteses, como vimos no capítulo 1 desta dissertação. O que está em jogo com os dados de Brahe, é que, para Kepler, o alto grau de precisão obtidos por esses dados representam a possibilidade de obter uma representação que corresponda à realidade dos movimentos observados; sendo assim, Kepler utilizará esses dados como elementos que possam confirmar ou refutar hipóteses acerca da realidade física dos movimentos planetários, como veremos mais detidamente no capítulo 4 desta dissertação.

<sup>83</sup>Os argumentos a favor do axioma foram tratados mais detalhadamente no primeiro capítulo desta dissertação.

<sup>84</sup>Hanson, N. R., *Constelaciones y Conjeturas*, p. 255.

“Nunca se chegou a por em dúvida esse juízo (circularidade e uniformidade) durante os 2000 anos de astronomia computacional técnica. Copérnico não o fez, e Ptolomeu não o poderia ter feito. Como poderia alguém por em dúvida tal princípio dado o contexto intelectual em que se movia o pensamento antigo? As razões dessa aceitação completa eram em parte observacionais e em parte filosóficas, estando fortemente reforçadas por outros fatores estéticos e culturais.”

Os trabalhos astronômicos pré-keplerianos respeitaram o axioma platônico sem colocá-lo em questionamento. O que levou Kepler a romper com esse princípio é uma questão complicada. Pode-se conjecturar que os dados observacionais de Brahe foram elementos necessários, porém insuficientes. Aliados aos dados observacionais está a procura em determinar as causas físicas dos movimentos planetários, o que Kepler faz na terceira parte do *Astronomia Nova*, mediante a introdução do conceito de força. E é justamente com esse conceito dinâmico que Kepler começa a romper com a crença na circularidade e uniformidade, realizando o que Copérnico não fez, isto é, a proposta copernicana de descrição da realidade dos acontecimentos celestes é realizada, se não plenamente pelo menos em partes, com as duas primeiras leis keplerianas.

O sistema copernicano partia de hipóteses distintas das de Ptolomeu, o Sol no centro do sistema e a Terra movendo-se ao seu redor, da mesma forma que os outros planetas conhecidos na época. Como vimos acima, Copérnico interpretou o axioma platônico de modo que o centro de movimentos deve ser um centro físico, e não matemático, isto é, Copérnico aboliu o equante ptolomaico.

Porém, essa exigência de Copérnico implicou a impossibilidade de seu sistema descrever os movimentos planetários sem a utilização dos expedientes da astronomia condicionada a uma cinemática celeste, pelo fato de que a aceitação do princípio de circularidade e uniformidade dos movimentos planetários levou Copérnico a retirar o centro do corpo do Sol e posicioná-lo no centro da órbita terrestre. Assim, a crença copernicana de que a órbita é circular com movimentos uniformes entre os arcos e tempos percorridos, mediante a colocação do Sol no centro e dos movimentos da Terra, possibilitou duas coisas:

A primeira foi a resolução imediata da segunda desigualdade, isto é, os movimentos de retrogradação apresentados tanto pelos planetas internos quanto pelos externos não são

mais descritos mediante a utilização de epiciclos, deferentes, etc., mas se mostram aparentemente retrógrados pela relação entre as distâncias e velocidades relativas entre a Terra e os outros planetas. Em outras palavras, como a Terra movimenta-se ao redor do Sol, assim como fazem os outros planetas, isso faz com que ocorram variações nas velocidades e distâncias desses planetas ao redor do centro físico, do Sol, pois cada planeta tem distâncias distintas do centro, implicando velocidades distintas desses planetas; deste modo, ao observar os movimentos dos planetas da Terra, um observador notará que os planetas não fazem um movimento contínuo ao redor do Sol, mas ora se apresentarão movimentando-se para adiante, ora apresentam-se parar e ora parecem retroceder. Assim, visto da Terra os planetas mostram movimentos irregulares, acarretando uma retrogradação; mas quanto a Terra é posta em movimentos, tal retrogradação desaparece e percebe-se que isso é fruto das variações entre as distâncias e velocidades dos planetas<sup>85</sup>.

A segunda, que é o problema do sistema copernicano ficar restrito a uma cinemática celeste, consiste na necessidade de utilização dos artifícios geométricos para a resolução da primeira desigualdade (a não uniformidade entre arcos, (distâncias) e tempos), pois a colocação do Sol no centro do sistema e a admissão do axioma da circularidade e uniformidade impossibilitaram que Copérnico descrevesse os movimentos sem a utilização de epiciclos. Desta maneira, o sistema copernicano restringiu-se a uma cinemática celeste no que concerne à determinação dos movimentos planetários.

O sistema copernicano implicava que as suas descrições celestes fossem condicionadas a um modelo único, o de órbitas circulares e uniformes. Isso restringiu a elaboração de um sistema alternativo, isto é, impossibilitou a obtenção de uma órbita não circular. Kepler, utilizando os dados observacionais de Brahe e, também, procurando determinar uma explicação dinâmica para os movimentos planetários, possibilita a tentativa de procura de outras formas de movimentos orbitais, tais como a ovalada e a elíptica, não se restringindo meramente às formas circulares e uniformes.

---

<sup>85</sup>Ver figura capítulo 2, seção 2.3, figura 9, desta dissertação.

Voltando para o *Astronomia Nova*, no cap. XX Kepler começa a pôr em dúvida a circularidade. Como a excentricidade não é fixa, mas muda na linha das apsides, pois para que elas percorram ângulos iguais em tempos iguais não é possível fixá-la.<sup>86</sup>

“...Pois, mantendo isso, concluímos que o ponto excêntrico do planeta, no qual o planeta deveria sempre percorrer ângulos iguais em tempos iguais, não é certo e fixo. Com efeito, seria preciso que nós o balançássemos sobre a linha das apsides (se mantivermos as hipóteses da órbita circular dos astros). Verei se ela pode ser conciliada com os princípios físicos.”

Assim, a hipótese vicária não pôde determinar a órbita de Marte, e nem os seus posicionamentos com precisão. Kepler adotará outro procedimento, que se iniciará na terceira parte do *Astronomia Nova*. Kepler procurará elaborar uma teoria pretendendo explicar os movimentos através de considerações não meramente cinemáticas, mas considerações físicas, utilizando-se para tanto do conceito de força. Para Kepler, as oscilações ocorridas nos valores da excentricidade nas apsides não poderão ser subsequenteiramente explicadas por razões naturais; essas variações ocorrem pela aceitação errônea da circularidade e uniformidade.

A hipótese vicária servirá, na terceira e quarta partes do *Astronomia Nova*, como uma hipótese confiável para a determinação dos movimentos e dos posicionamentos de Marte sob o ponto de vista de uma astronomia meramente cinemática - os erros de 8' dessa hipótese são inferiores aos erros do sistema de Copérnico, 10' de arco, e do modelo de Ptolomeu, que também alcançava erros de 10' de arco - utilizando o artifício do equante e dos instrumentos de cálculos como as anomalias mediana e verdadeira. Essa hipótese vicária será substituída, nos capítulos LVI e LVII, pela explicação dinâmica, alicerçada na idéia de existência de uma força magnética exercida pelo Sol sobre os planetas, que explica porque o planeta foge 8' nos octantes, e também a variação nos valores da excentricidade, que são devidos à aceitação do princípio de circularidade e uniformidades das órbitas planetárias.

---

<sup>86</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XX, pp. 292 - 293. Utilizamos, para essa passagem, a tradução de Jean Peyroux, p. 145.

Desse modo, a hipótese vicária só será substituída, quando Kepler obtiver a sua explicação dinâmica, que deverá, além de obter erros menores que os 8' da hipótese vicária, explicar o comportamento irregular, mas real, dos planetas nas suas "fugas" da circularidade e uniformidade.

### 3.3. O Estudo do Movimento da Terra

A hipótese vicária apresentou, como dissemos, um erro de 8' de arco nos octantes do primeiro e do segundo quadrantes, o que levou Kepler a considerar tal hipótese como não admissível. Porém, nos próximos estágios do *Astronomia Nova*, Kepler a utilizará como um instrumento de trabalho, pois ela, apesar dos seus 8' de erro, mostrava-se mais eficaz do que os resultados obtidos pelos sistemas de Copérnico, Ptolomeu e Brahe.

Deste modo, na terceira parte do *Astronomia Nova*, iniciam-se as tentativas propriamente keplerianas de resolução da órbita do planeta Marte, que resultará na formulação das suas duas primeiras leis.

A partir da terceira parte, principalmente com a utilização do conceito de força, Kepler começa a romper com os métodos tradicionais da astronomia de sua época. Porém, essa não é a sua primeira modificação; a primeira foi considerar em separado a resolução da primeira e da segunda desigualdade, algo que não era feito na astronomia tradicional. Desta forma, a terceira parte procura investigar a segunda desigualdade, ou o movimento de retrogradação aparente dos planetas. Na quarta parte, é tratada a primeira desigualdade, a não uniformidade apresentada entre os arcos de circunferência percorridos pelos planetas com os tempos empregados para percorrê-los.<sup>87</sup>

"Abordarei primeiramente a segunda desigualdade nessa terceira parte, e, por meio de demonstrações, confirmarei-as ou rejeitarei-as, por meio de observações indubitáveis, ....na quarta parte eu abordarei a primeira desigualdade."

---

<sup>87</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap., XXII, p. 305.



A primeira etapa para a resolução da segunda desigualdade - que determina os movimentos dos planetas como retrógrados, segundo Ptolomeu; enquanto que em Copérnico isso é fruto das velocidades dos planetas em relação às suas distâncias do centro da órbita planetária - está em investigar os movimentos do nosso centro de observações, isto é, investigar os movimentos da Terra. Para Kepler isso é de extrema importância. Os modelos geocêntricos não precisavam investigar os movimentos de sua base de observações pelo motivo de que esse centro estava parado, fixo. Mas a postulação de uma Terra em movimento exige essa investigação, justamente para se saber duas coisas: a primeira é determinar os movimentos da Terra para daí termos melhores observações sobre os planetas; a segunda é saber se de fato a Terra se move como os outros planetas, isto é, se ela também tem movimentos não uniformes, com variações no seu percurso, implicando na necessidade de assumir um equante para esse planeta.

Assim, Kepler investiga os movimentos da Terra. Neste estudo, ele utiliza a hipótese vicária como instrumento de trabalho; porém, de uma forma diferente daquela feita no cap. XVI, em que o equante era tratado sem ser relacionado às causas físicas. Na terceira parte do *Astronomia Nova*, o equante é relacionado com a tentativa de determinação das causas físicas dos movimentos:<sup>88</sup>

“De mais, porque a órbita anual está aumentando e diminuindo, um gênio [uma idéia] me falou que isso provém do fato que a órbita anual de Copérnico, ou o epiciclo de Ptolomeu, não estão igualmente distantes do centro ao redor do qual é posto que os ângulos iguais são acompanhados de tempos iguais. Com efeito, por qual causa física o circuito do centro do sistema planetário (para Tycho) ou o circuito da Terra (para Copérnico) ou o epiciclo portando o astro (para Ptolomeu), se mostram como aumentando ou diminuindo? .... Mas existe uma possibilidade oportuna para essa coisa. Ela vem da minha suposição derivada do meu *Mysterium Cosmographicum*, que é a condição de que um equante seja introduzido na teoria do Sol.”

---

<sup>88</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XXII, p. 306.

Deve-se notar que o equante é utilizado como um instrumento matemático de trabalho, que, por razões do realismo kepleriano, será abolido e substituído pela lei das áreas.

O procedimento de Kepler para alcançar tal objetivo é o de transportar o centro de observações da Terra para o planeta Marte, para daí observar os movimentos da Terra, determinando sua órbita e calculando suas posições; isso é feito pela lei dos triângulos (isto é, por um procedimento de cálculo astronômico que opera com semelhança entre os lados e ângulos dos triângulos), como nos diz o próprio Kepler:<sup>89</sup>

“...Irei utilizar [das observações de Brahe] três, ou qualquer número, de observações pelos quais o planeta se encontraria sempre no mesmo lugar do excêntrico, e a partir disso, pela lei dos triângulos (isto é, trigonometricamente), determinar as distâncias ao ponto equante de um número igual de pontos do epiciclo ou da órbita anual da Terra.”

O procedimento geométrico de Kepler foi basicamente o seguinte:

Na figura 11, S é o Sol; E1, E2 e E3 representam as posições da Terra correspondentes a cada uma das posições observadas de Marte, por Brahe; M é Marte.

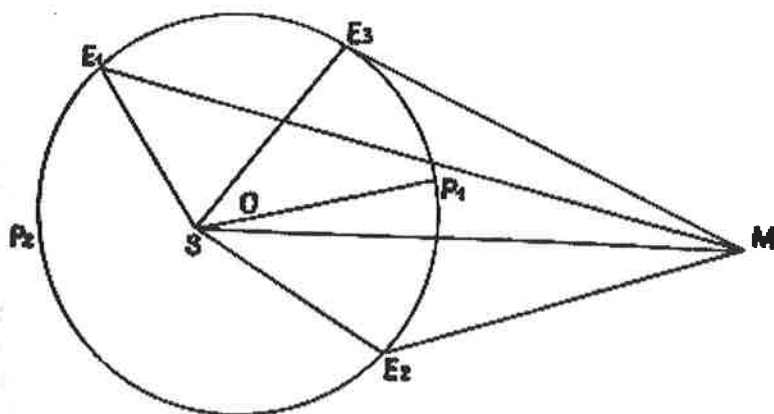


Figura 11<sup>90</sup>

<sup>89</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XXIV. p. 316. Utilizamos a tradução de Jean Peyroux, p. 163.

<sup>90</sup>Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, p. 183.

Os passos da demonstração podem, grosseiramente, ser formulados assim<sup>91</sup>:

1) Kepler utilizou três posições de Marte, dadas por Tycho, correspondentes ao ano desse planeta (cada posição corresponde a um ano de Marte, isto é, uma revolução completa desse planeta ao redor do Sol). Utilizou as posições da Terra em cada uma dessas posições.

2) A hipótese vicária determinava a longitude heliocêntrica de Marte (posição em que Marte está mais afastado do Sol).

3) As longitudes heliocêntricas da Terra foram dadas pela teoria de Tycho.

4) Assim pela lei dos triângulos, tínhamos os ângulos formados pela distância da Terra ao Sol com a distância do Sol à Marte. As observações de Tycho davam os ângulos formados entre a distância da Terra ao Sol com a distância da Terra à Marte; e também os ângulos entre a distância do Sol à Marte com a distância da Terra à Marte. Desta forma, tendo como base a distância do Sol até Marte, determina-se a distância entre a Terra e o Sol. E como um círculo é construído através de três pontos, Kepler determinou a órbita da Terra ao redor do Sol.

Esquemáticamente, esses quatro passos podem ser dados assim:

As observações de Brahe determinam os ângulos SE1M, SE2M e SE3M, e também os ângulos SME1, SME2, SME3.

Comparando os ângulos desses triângulos, conseguem-se os ângulos E1SM, E2SM e E3SM.

Dessa forma, Kepler pôde encontrar as distâncias entre a Terra e o Sol, nas três posições observadas de Marte.

Com esses cálculos Kepler chegou à conclusão de que a Terra, assim como os outros planetas, deve ter uma excentricidade bisetada (isto é, deve ter um *punctum aequans*), e dessa forma, considerou que essa excentricidade não é fixa, mas que se move

---

<sup>91</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, caps. XXIV - XXVI. Essa exposição também teve como base o livro de Koyré, *La Révolution Astronomique*, pp. 183 - 184.

na linha das apsides. A nossa Terra tem uma variação de velocidades ao longo de seu percurso ao redor do Sol.

Kepler, utilizando esse estudo dos movimentos da Terra, juntamente com as suas especulações físicas, obteve a sua lei das distâncias, que será tratada na próxima seção.

### 3.4. O Conceito de Força - Primeira formulação

Nos capítulos XXXII ao XXXIX do *Astronomia Nova*, é apresentado a primeira formulação do conceito de força kepleriano; sendo retomada essa discussão nos capítulos LVI e LVII, que é a segunda formulação. Pode-se entender essas duas formulações no sentido de que agora, na primeira, Kepler lança as bases de sua dinâmica, alicerçadas no seu conceito de força magnética exercida pelo Sol nos planetas conjuntamente com a sua inércia, que é a tendência natural que os corpos têm de se manterem em repouso; porém, Kepler não questiona a circularidade e uniformidade nesse estágio de seu trabalho, construindo uma explicação dinâmica para justificar os movimentos planetários como irregulares sob o ponto de vista do axioma; deste modo, a primeira formulação procura investigar a natureza da força magnética e, além disso, questionar as concepções de alma e inteligência, que levam a sérias dificuldades para a admissão de uma explicação dinâmica aliada a uma aceitação do axioma platônico. Será apenas quando Kepler, na quarta parte do *Astronomia Nova*, testar a circularidade e uniformidade, tornando-a uma hipótese, e encontrando a impossibilidade de mantê-la, - elaborando conseqüentemente as hipóteses da órbita oval e, finalmente, a elíptica (que é condizente com a sua dinâmica) - que ele retomará as discussões dinâmicas, realizando, assim, a sua segunda formulação, que permitirá explicar os comportamentos irregulares dos planetas. Desta maneira, a primeira formulação apresenta os princípios keplerianos para uma astronomia física, sem contudo poder admitir tais princípios como explicações reais para essa ciência. Na segunda formulação, a dinâmica de Kepler torna-se elemento que dá boas razões para entender o seu conceito de força como uma explicação voltada para uma visão mecanicista do mundo, rompendo com a idéia de almas ou inteligências planetárias.

### 3.4.1. A Postulação de uma Força Motriz para Explicar o Comportamento Irregular dos Movimentos Planetários

Nos capítulos XXXII e XXXIII do *Astronomia Nova*, Kepler postulou que os planetas perfazem movimentos irregulares em torno de seu centro físico de movimentos pela ação de uma força motriz localizada nesse centro de movimentos; com isso, o nosso astrônomo pretendia explicar porque os planetas ganham velocidade quando estão perto do centro de movimentos, e, assim, percorrem arcos de circunferências em tempos menores, e perdem velocidade quando estão longe desse centro, percorrendo arcos em tempos maiores; preocupação essa que já aparecia no *Mysterium Cosmographicum*. Com tal postulação, Kepler formulou a sua lei das distâncias, que permite descrever o comportamento irregular dos planetas ao longo de seu trajeto anual; segundo essa lei, os tempos de percurso do planeta ao centro são proporcionais às suas distâncias a esse; assim, quando o planeta está perto do centro físico, ele ganha velocidade, quando está longe ele perde velocidade.

Nesses capítulos XXXII e XXXIII, Kepler apresenta a sua lei das distâncias, bem como as suas investigações acerca do que leva o planeta a ter um comportamento que apresenta uma proporcionalidade entre tempos e distâncias, argumentando que isto está justamente na força exercida pelo centro físico de movimentos; Kepler também investiga qual é esse centro de movimentos - a Terra, para Ptolomeu e Brahe, ou o Sol, para Copérnico.

Seu procedimento foi primeiramente o de assumir o equante ptolomaico e, a partir desse, demonstrar que o planeta perfaz um movimento proporcional entre tempos e distâncias, computadas a partir do centro físico de movimentos; a seguir, Kepler transfere essa relação para um centro físico, abandonando o ponto equante, que é um ponto matemático, fictício. Segundo o autor do *Astronomia Nova*:<sup>92</sup>

“.....Ora, no meu *Mysterium Cosmographicum*, publicado há oito anos, eu adiei a discussão sobre o equante ptolomaico pela razão de que ela não poderia ser feita sob as bases de uma astronomia ordinária, sobre o ponto se é a Terra ou o Sol que usa um ponto equalizador, e tem uma excentricidade bissetada. Entretanto,

<sup>92</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XXXII, pp. 372 - 373.

agora que nós temos a confirmação por uma astronomia mais profunda, mostro que é transparentemente claro que existe um equante na teoria do Sol ou da Terra. E, afirmo, agora que isso foi demonstrado, que é correto aceitar como verdade e legitimar a causa que eu assinalei, isto é, o equante ptolomaico no *Mysterium Cosmographicum*, visto que ele é universal e comum para todos os planetas. Assim, nessa parte do trabalho eu faço uma outra declaração para a causa.

“.....o leitor poderá conhecer que em todas as hipóteses constringidas segundo a forma de Ptolomeu, quando maior é a excentricidade, a velocidade no periélio e a lentidão no afélio são muitos proporcionais às linhas traçadas do centro do mundo ao planeta.”

Assumindo que o equante ptolomaico pode demonstrar que a velocidade dos planetas são proporcionais às suas distâncias aos centros em que são computadas as uniformidades dos planetas - isto é, o equante ptolomaico determina a proporcionalidade entre as distâncias e tempos dele ao planeta -, Kepler passa a transferir essa relação para o centro físico de movimentos. Seu raciocínio pode ser compreendido da seguinte forma: pela figura 12, abaixo, Kepler escreve:<sup>93</sup>

“Agora, eu próprio afirmo que  $\nu\chi$ , assim designadas como o arco de tempo (como apontou Ptolomeu) está para o arco  $\delta\psi$ , o qual o planeta atravessa, aproximadamente como  $\alpha\delta$ , a distância do arco  $\delta\psi$  a partir do centro do mundo, está para  $\delta\beta$ , a distância mediana dos pontos  $\pi$  e  $\rho$  a partir de  $\alpha$ . E, igualmente, o arco de tempo  $\phi\tau$  está para o arco do movimento do planeta  $\epsilon\omega$ , aproximadamente como  $\alpha\epsilon$ , a distância do arco  $\epsilon\omega$  a partir do centro do mundo  $\alpha$ , está para  $\epsilon\beta$  e  $\alpha\tau$ , a distância mediana do centro do mundo, a qual pode ser encontrada pelos pontos  $\pi$  e  $\rho$ .”

---

<sup>93</sup>Idem, p. 373.

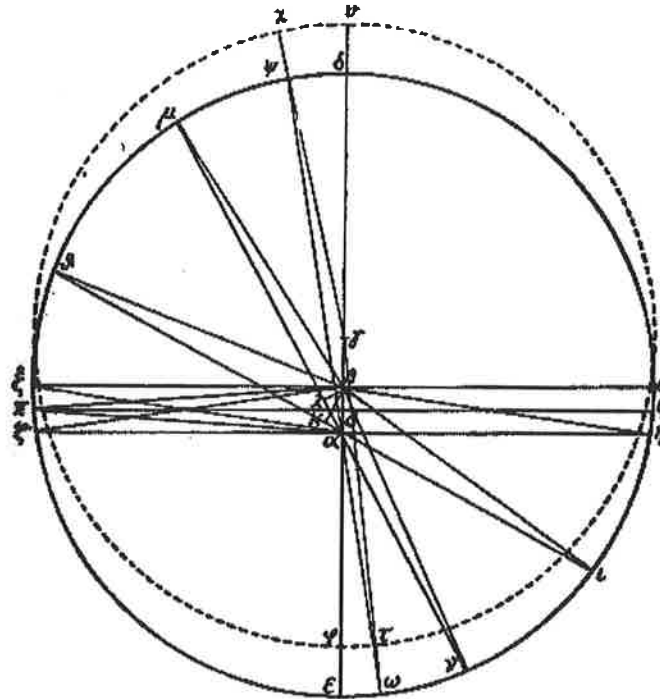


Figura 12<sup>94</sup>

Basicamente, a figura mostra o movimento real do planeta (caso o percurso seja circular), representado pelo círculo contínuo, e o movimento excêntrico, dado pela circunferência tracejada;  $\alpha$  representa o centro do mundo, isto é, o centro físico de movimentos;  $\gamma$  é o equante, o ponto fictício que determina os arcos de tempo  $\chi\nu$  e  $\phi\tau$  como iguais, isto é, esses arcos são uniformes, pois seus tempos de percurso são idênticos.

Kepler demonstra, mediante a teoria geral da proporcionalidade, que os arcos de tempos obtidos pelo equante,  $\chi\nu$  no afélio (ou apogeu) e  $\phi\tau$  no periélio (ou perigeu), são proporcionais aos arcos das distâncias computadas a partir do centro físico de movimentos,  $\psi\delta$  no afélio e  $\epsilon\omega$  no periélio; e isso ocorre em razão da relação entre a excentricidade dada pelo centro do mundo e centro físico (lembrando que a excentricidade foi bisetada),  $\alpha\beta$ .

Assim, a relação seria:

$$\nu\chi : \delta\psi :: \alpha\delta : \delta\beta, \text{ para as posições no afélio; e } \phi\tau : \epsilon\omega :: \alpha\epsilon : \epsilon\beta, \text{ no periélio.}$$

<sup>94</sup>Idem.

Assim, essa proporcionalidade indica que o planeta percorre arcos de tempos desiguais conforme ele esteja mais próximo ou mais afastado do centro físico de movimentos. Kepler inferiu, a partir dessa relação, e por uma série de cálculos que não vem ao caso nós nos remetermos a eles, que essa oscilação de tempo se dá pela ação do centro físico  $\alpha$  nos arcos de tempo, considerando que essa ação é determinada pela distância do planeta ao centro de movimentos. Kepler generalizou, erroneamente, essa relação entre o centro físico com o afélio e o periélio para todas as distâncias orbitais do planeta, formulando a lei que ficou conhecida como lei das distâncias, que pode ser expressa, segundo Kepler, da seguinte maneira:<sup>95</sup>

“...que a rapidez no periélio e a lentidão no afélio são proporcionais, o mais que possível, às linhas unidas do centro do mundo ao planeta.”

Em outras palavras, as distâncias do planeta ao centro físico de movimentos faz que ele (planeta) perca ou ganhe velocidade, diminuindo ou aumentando o tempo de percurso dos arcos de tempo (entendendo-se esses arcos de tempo como o trajeto de uma posição a outra, que podem ser computadas mediante o cálculo entre as anomalias medianas e verdadeiras e a equação ótica).

Assim, Kepler utilizou o equante ptolomaico para obter as relações entre os tempos de percurso; após isso, transfere o problema para o centro físico de movimentos, que é o que de fato interessa na procura de explicar os deslocamentos desiguais dos arcos percorridos pelos planetas em seus movimentos. Para explicar essa relação entre tempos e distâncias, Kepler postulou o seu conceito de força, iniciando a sua pesquisa acerca da causa física que gera o comportamento irregular dos planetas.

Após ter demonstrado geometricamente que as distâncias dos planetas ao centro físico dos movimentos são as responsáveis pelas variações de velocidades dos planetas em suas trajetórias orbitais, o que faz que esses percorram arcos de circunferência (da órbita) em tempos desiguais, - que levou Kepler a formular a sua lei das distâncias - Kepler passa a investigar qual é o centro físico de movimentos, isto é, ou a Terra (defendido por Brahe e Ptolomeu), ou o Sol (postulado por Copérnico).

---

<sup>95</sup>*Idem.*



Até o capítulo XXXII, o tratamento dado por Kepler pode ser considerado como cinemático, pois tanto a hipótese de centralidade da Terra, como a de centralidade do Sol levariam, sob o ponto de vista de determinação do melhor, ou melhores, posicionamentos planetários, a uma equivalência observacional. Em outras palavras, não há geometricamente diferença significativa na defesa da Terra ou do Sol como centro dos movimentos. A partir do capítulo XXXIII, Kepler passa a tratar da dinâmica celeste, defendendo que o Sol é o centro dos movimentos planetários. Com isso Kepler adere ao sistema copernicano.

Nesse capítulo XXXIII, Kepler posiciona o Sol como centro físico dos movimentos, defendendo que ele é o responsável pelas variações dos tempos e das velocidades dos planeta, dando-se tal coisa mediante a ação de uma espécie de força exercida pelo Sol nos planetas.

A argumentação kepleriana procede pela investigação acerca de onde se localiza a fonte em que reside a força que leva os planetas a realizarem o estipulado pela lei das distâncias: ou ela está no próprio planeta, ou ela se localiza no corpo central de movimentos:<sup>96</sup>

“...É necessário, portanto, que a causa desse caminhar (isto é, o movimento do planeta pela ação da lei das distâncias) esteja ou no próprio corpo do planeta, sob uma força motiva localizada nele, ou no suposto centro do mundo”

Kepler argumenta que o planeta, por si só, não poderia realizar um tal movimento, isto pelo fato de que ele não é dotado de “pés” ou “asas”, que lhe permitiriam realizar um movimento complexo de alterar as suas velocidades conforme se alterasse as suas distâncias ao centro de movimentos. E, além disso, como Brahe provou, as órbitas não são sólidas, o que acarretaria que esse tipo de movimento feito pelo planeta seria muito difícil.<sup>97</sup>

“.....Além disso, que existe uma força animal, a qual o movimento dos céus sugerem que esteja situada no corpo móvel do planeta, resistindo intencionalmente e remissão muitas vezes, sem mesmo tornar-se cansado.....isso é absurdo de se afirmar. Também, é impossível de se entender como essa força animal poderia

<sup>96</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XXXIII, p. 376.

<sup>97</sup>*Idem*, p. 377.

conduzir seu corpo através dos espaços do mundo, visto que não existe nenhuma órbita sólida, como Brahe provou. E. por outro, lado, um corpo rodando sem o auxílio de pés ou asas...”

Assim, mediante essas especulações iniciais de sua dinâmica, Kepler considera que localizar a força motriz no próprio corpo do planeta não oferece boas razões para explicar o comportamento que decorre da relação estipulada pela lei das distâncias, isto é, uma alma ou inteligência planetária não poderiam conduzir o planeta a ganhar ou perder velocidade conforme as suas distâncias do centro aumentem ou diminuam. Desse modo, conclui Kepler:<sup>98</sup>

“Portanto, a única possibilidade restante é que a causa dessa intensificação e caminhada reside no ponto final, a saber, o ponto que é tomado como sendo o centro do mundo, a partir do qual as distâncias são medidas.”

Apesar da argumentação forte kepleriana acerca da centralidade do Sol e a ação da força exercida por ele nos planetas estar contida na sua obra *Epítome*, de 1621, portanto 12 anos após a publicação do *Astronomia Nova*, no capítulo XXXIII, Kepler argumenta que o Sol é o centro mediante uma analogia com a balança e a alavanca, segundo o próprio Kepler:<sup>99</sup>

“Se, portanto, o afastamento do centro do mundo a partir dos corpos dos planetas, garantem a lentidão do planeta, e a aproximação a rapidez, é necessário que a fonte de virtude motriz se encontre no centro do próprio mundo. Com efeito, supondo isso, a forma da causa será visível, pois nós a compreenderemos se os planetas forem entendidos como uma balança ou alavanca. Com efeito, o planeta, pelo fato dele estar mais longe do centro, será movido mais dificilmente (certamente mais lentamente) pela virtude do centro; e isso é certamente o mesmo que se eu dissesse que os pesos que estão na parte mais longa do braço da balança são mais pesados; isso não acontece por ele mesmo, mas por causa da força sustentada do braço nessa distância. Com efeito, nos dois casos, o da

---

<sup>98</sup>*Idem.*

<sup>99</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XXXIII, pp. 377 - 378. Utilizamos, para essa passagem, a tradução de Jean Peyroux, p. 216.

balança ou da alavanca, e do movimento dos planetas, essa fraqueza ocorre em decorrência das distâncias.”

Kepler utiliza a analogia com a balança e alavanca ( aliás, a utilização de analogias é muito comum na argumentação kepleriana acerca do conceito de força, mostrando que nesse estágio de seu trabalho, ele ainda não tinha uma concepção clara acerca da ruptura com a posição medieval de inteligência planetária conduzindo os movimentos dos planetas; além disso, a analogia com a alavanca e a balança implica remeter a discussão para os princípios da mecânica) para, subseqüentemente, localizar o Sol no centro. O raciocínio kepleriano é de que, como não existem órbitas sólidas, como demonstrou Brahe, o que conduz a dificuldades no entendimento dos movimentos feitos pelos próprios planetas; e como o planeta é movido mais lentamente conforme está mais afastado da fonte, seria muito difícil atribuir ao planeta a causa desse afastamento; por outro lado, admitir o Sol como centro de movimentos, e, assim, como causa desse afastamento apresenta-se como uma resposta mais plausível. Assim, prossegue Kepler:<sup>100</sup>

“Ora, o próprio Tycho Brahe destruiu a noção de órbitas reais, e eu na terceira parte demonstrei irrefutavelmente que existe um equante na teoria do Sol ou Terra. A partir disso, segue-se que o movimento do próprio Sol (se ele é movido) é intensificado e remetido quando ele estiver mais próximo ou mais afastado da Terra, e portanto que o Sol é movido pela Terra. Mas, se, por outro lado, a Terra está em movimento, ela também deverá ser movida pelo Sol, com velocidade maior ou menor quando ela estiver mais próxima ou mais afastada dele, sendo que o poder no corpo do Sol permanecerá perpetuamente constante. Entre essas duas hipóteses não existe intermediário.

“Eu próprio concordo com Copérnico, e digo que a Terra é um dos planetas.”

Assim, como a Terra é um planeta, como foi demonstrado no estudo dos movimentos da Terra, pois ela tem uma excentricidade não fixa, como o estipulado pela hipótese vicária; e como é difícil ao planeta mover-se por si só, pela não existência de órbitas sólidas; e como a fonte de movimentos está na Terra ou no Sol, segue-se, para

Kepler que é mais condizente aceitar o Sol como centro de movimentos, do que aceitar a Terra como tal.

Com esse posicionamento de defesa do Sol como centro de movimentos, e dessa forma, a aceitação do copernicanismo, Kepler alicerça as bases para a sua dinâmica. Considerar o Sol como centro físico é possibilitar uma formulação mais adequada para a estipulação de uma dinâmica dos movimentos planetários, do que posicionar a Terra no centro.

Os modelos geocêntricos diferenciavam a Terra dos outros planetas, impedindo uma explicação de cunho mecânico, dinâmico, pelo fato deles atribuírem uma inteligência para os comportamentos apresentados pelos planetas, possibilitando uma interpretação anímica. Em outras palavras, a Terra, no geocentrismo, tinha uma natureza distinta da dos outros planetas -era constituída dos quatro elementos (ar, água, terra e fogo) -, levando a uma física própria, uma física da geração e corrupção, enquanto que no mundo supra-lunar, pelo fato dele de ser composto de uma forma distinta da física terrestre, onde não ocorriam gerações e corrupções, a maneira de obter explicações era dada não pela dinâmica, mas pela visão anímica.

Assim, a admissão do Sol como centro de movimentos e a mobilidade da Terra não foi, simplesmente, a aceitação de um outro sistema, mas permitiu a fundamentação das bases da dinâmica kepleriana, como bem esclarece Koyré.<sup>101</sup>

“Os resultados que nós vimos são de uma importância capital. A modificação introduzida por Kepler na estrutura do mundo copernicano - transferir a origem das órbitas para o Sol real - confirma a verdade da doutrina copernicana, apoiando-se numa concepção dinâmica do Universo astral; inversamente a concepção dinâmica confirma, e explica, a necessidade de transferir a questão: com efeito, se os movimentos dos planetas são acompanhados de uma velocidade variável, e se a variação deles é função das distâncias entre o Sol e os planetas, esse movimento só pode ser explicado pela ação de uma força motriz, e de uma força motriz que não se pode encontrar em outro lugar que não o corpo do Sol.”

---

<sup>100</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XXXIII, p. 379.

<sup>101</sup>Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, p. 197.

Quando Kepler rejeitou a posição ocupada pelo centro do mundo copernicano - que está no centro da órbita terrestre - e transferiu esse centro para o corpo do Sol, permitiu ao copernicanismo ser explicado e justificado pela ação dinâmica, começando a romper, dessa forma, com uma astronomia meramente posicional, cinemática.

### 3.4.2. A Natureza da Força Motriz

Após ter postulado que os planetas movem-se em torno do Sol devido à força existente neste último, Kepler passa a investigar a natureza dessa força. Kepler admitia que o Sol exerce uma força que se enfraquece proporcionalmente ao aumento de sua distância ao planeta, fazendo que esse tenha um período maior de tempo de percurso conforme essa força se enfraquecesse - isto é, determinou uma lei matemática para essa relação física entre distâncias e tempos -, mas não sabia, ainda, que espécie de força ela é. Essa investigação kepleriana é muito importante, pois, a partir dela, ele elabora as bases de sua dinâmica, retirando da astronomia uma função meramente calculatória, como bem expressa Koyré, a resposta ao fato de Kepler dedicar-se fortemente ao estudo da natureza da força motriz é a seguinte:<sup>102</sup>

“...Acredito que a resposta não pode ser encontrada a não ser na aversão fundamental de Kepler para toda atitude puramente formalista (positivista) e calculatória. Ele, como já foi dito, não se preocupava tanto em saber calcular e prever as posições e os movimentos dos planetas, mas em revelar a estrutura real do Universo, e os movimentos reais dos corpos celestes, e em obter uma explicação estrutural (arquetípica) e causal. Isso, parece-me, nos permite compreender porque Kepler rejeita a fórmula ptolomaica e a substitui pela sua: é que, justamente, a fórmula de Ptolomeu não é mais que uma fórmula - velocidade proporcional às distâncias do equante - e que a sua - velocidade inversamente proporcional à distância do corpo motor - exprime uma causalidade.”

---

<sup>102</sup>Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, pp. 199 - 200.

Assim, a rejeição de Kepler em restringir a astronomia a uma ciência calculatória dos movimentos celeste, levou-o a investigar a natureza da força motriz por ele postulada, o que implicava considerar a astronomia como uma ciência física.

O procedimento para a obtenção de conhecimentos sobre essa força motriz é novamente fundamentado em analogias com outras entidades já conhecidas em sua época. Assim, para compreender como age essa força, Kepler compara-a com a luz; segundo ele, a luz tem os mesmos atributos que a força movente; a força movente, como Kepler já demonstrou (pela lei das distâncias), diminui proporcionalmente em relação ao seu centro físico (quanto mais próximo o planeta está do Sol, a força é mais condensada e forte; quanto mais longe, ela é mais rara e fraca), e isso é atribuído do mesmo modo para a luz<sup>103</sup>.

A seguir, Kepler considera que a força movente tem a luz como veículo, segundo ele:<sup>104</sup>

“Isso pode ser garantido pelo seguinte: primeiro, a luz é retardada pelo opaco, e portanto se o poder movente tem a luz como veículo, a escuridão pode resultar do corpo movente estando em repouso; a seguir, a luz expande-se esfericamente em linhas retas, enquanto o poder movente, embora expandindo-se em linhas retas, faz isso circularmente”

Kepler considera que a emissão se enfraquece a partir da sua fonte, gerando que a força motriz diminui proporcionalmente à sua distância ao centro - a sua lei das distâncias -, enquanto que a luz diminui em razão do quadrado das distâncias da luz à sua fonte de emissão.

A seguir, Kepler descreve de que forma ocorre a distribuição no espaço, tanto da força movente, quanto da luz, encontrando novamente semelhanças entre uma e outra, segundo ele:<sup>105</sup>

---

<sup>103</sup> As relações geométricas para a Luz foram dadas na obra de Kepler, *La Partie Optica de l'Astronomie - Les Compléments à Vitellion*, cap. I, proposição 9.

<sup>104</sup> Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XXXIII, pp. 380 - 381.

<sup>105</sup> *Idem*, pp. 381 - 382.

“...A emissão, da mesma maneira como a luz, é imaterial, não como os odores, os quais são acompanhados pela diminuição das substâncias, ou do calor a partir da perda na fornalha, ou de qualquer coisa similar que se executa no espaço...

“Visto, então, que essa espécie de poder, exatamente como a espécie da luz (que vemos no *Astronomia Pars Optica*, capítulo 1), não pode ser considerada como dispersada através do espaço intermediário entre a fonte e o corpo móvel, mas deve ser visto como coletada no corpo em proporção à soma da circunferência que ela ocupa, esse poder (espécie) deve portanto não ser qualquer corpo geométrico, mas sim um que contém uma variedade de superfícies, justamente como é a luz.”

Encontramos nessa passagem alguns elementos importantes da dinâmica kepleriana. O primeiro é a consideração de que a força (agente movente) não se perde ao longo do seu trajeto, e, portanto, deve ser considerada como imaterial. Com isso, temos o segundo ponto, que é a tentativa kepleriana de geometrizar, isto é, determinar uma lei para os fenômenos dos movimentos planetários, postulando um conceito teórico (força), que faz que a ação seja mais rara ou mais concentrada, conforme a distância em que o planeta está da fonte.

Esse foi um problema enfrentado por Kepler para instaurar a sua dinâmica. Posto que a força é um agente imaterial, como ela pode ser quantificada segundo leis geométricas? Kepler responde a tal questão dizendo que, embora o agente movente seja imaterial, ela conduz um corpo material:<sup>106</sup>

“...embora o poder movente não é alguma coisa material, todavia, visto que ele é destinado a conduzir matéria ( a saber, o corpo do planeta), ele não está livre de leis geométricas.”

Desse modo, o início das especulações dinâmicas keplerianas foram alicerçadas na analogia da força exercida pelo Sol nos planetas com a luz; e, principalmente, no deslocamento da questão sobre a possibilidade de quantificar essa força. Com isso, Kepler começa a instaurar as bases para uma astronomia física, fundamentada numa visão mecanicista do universo, isto é, Kepler, ao postular a força exercida pelo Sol como a

responsável pelos movimentos dos planetas, procurando quantificá-la mediante a extração de leis gerais que representem a ação dessa força nos planetas, procura romper com a visão de que os planetas são conduzidos mediante a ação de inteligências, ou ações anímicas.

No capítulo XXXIV do *Astronomia Nova*, Kepler passa a investigar o que faz que a força movente mova o planeta em círculos, ou com deferentes, excêntricos, etc. Segundo a concepção antiga-medieval, a existência de orbes sólidos levou à aceitação de que os próprios planetas seriam dotados de uma “inteligência” que os conduziria a percorrer movimentos circulares ou compostos desses; neste sentido, a discussão dirigia-se para uma espécie de “psicologia” celeste, ou assentava-se numa concepção anímica. Kepler desloca a explicação para uma concepção física, dinâmica, segundo Kepler:<sup>107</sup>

“Concebendo que o poder atribuído atrai os corpos dos planetas, mostramos como ele é formado, como ele é semelhante à luz, e qual é o seu ser metafísico. A seguir, contemplaremos a natureza profunda de sua fonte, mostrada pelas espécies (arquetipos). Pois pode parecer que existe ligado ao corpo do Sol uma espécie de divindade, a qual pode ser comparada a nossa alma, a partir da qual as espécies atraem os planetas ao seu redor...

“O poder que é estendido a partir do Sol aos planetas, move-os em um curso circular ao redor do corpo imóvel do Sol. Isso não pode acontecer, ou ser concebido, no pensamento, ou por qualquer outro modo semelhante...”

Por essa passagem, nota-se que Kepler rejeita a concepção de uma inteligência para os movimentos planetários, substituindo tal explicação por uma outra alicerçada na sua concepção de força.

A explicação kepleriana é dada mediante os seus estudos sobre a ótica realizados na sua obra de 1604 - portanto, no meio da elaboração do *Astronomia Nova - Astronomia Pars Optica*. Basicamente, esse estudo sobre ótica diz que a visão ocorre através da emissão de pequenas partículas de luz, para o olho humano, a partir da fonte emissora de luz. Deste modo, a luz agiria em linha reta, ininterruptamente. O problema de Kepler era adequar tal explicação da luz ao movimento circular gerado pela força movente. Ele faz tal coisa

---

<sup>106</sup> *Idem*, p. 383.



mediante uma comparação com um orador numa assembléia; nessa, o orador está posicionado bem no seu meio, e os participantes ao seu redor. O orador olha para os olhos de cada um dos participantes, voltando-se ao redor deles num tempo regular e contínuo, ocasionando que o raio de luz do olho do orador aos olhos de cada participante é interrompido numa fração de segundos, impedindo que a imagem dos olhos do orador se desfaça nos olhos dos participantes.<sup>108</sup> Essa explicação é dada, da mesma forma, para os movimentos dos planetas ao redor do Sol; no caso, o Sol seria o orador, e os planetas os participantes, o movimento do Sol sobre o seu eixo faz que os planetas recebam ininterruptamente a ação de sua força movente, e isso de uma maneira regular. Portanto, o Sol tem um movimento de rotação sobre o seu eixo.

Mediante essa explicação física, Kepler explica a variação dos tempos periódicos de cada planeta - Saturno, 30 anos; Júpiter, 12; Marte, 23 meses, Terra, 1 ano; Vênus, 8 meses; Mercúrio, 3 -, isso se dá pelo fato do planeta, por ser considerado um corpo material, resistir ao movimento conforme ele está mais afastado da fonte movente. Temos, dessa forma, um esboço da inércia kepleriana, desenvolvida detalhadamente na sua obra de 1621, *Epitome*. A inércia kepleriana é concebida como a tendência do planeta a permanecer em repouso, o que faz que cada um deles, conforme a distância de cada um ao Sol seja maior, tenha percursos mais longos<sup>109</sup>

Finalmente, para explicar essa relação entre a atração dos planetas pelo Sol e a inércia dos planetas, a resistência desses em sofrer a ação, Kepler postula que a força exercida pelo Sol é análoga ao magnetismo.

Na concepção kepleriana, a força é entendida como uma espécie de força magnética exercida pelo Sol nos planetas, sendo que tal força também se encontra nos planetas, o que ocasiona que os planetas são atraídos ou repelidos pelo Sol, conforme eles estiverem mais perto ou mais longe do Sol. Kepler elaborou essa hipótese de força magnética por analogia ao trabalho de Gilbert, *De Magnete*. Para Kepler, o Sol, considerado um grande Magneto, atrai a Terra, e também os outros planetas; a analogia está em que Gilbert considerou a

---

<sup>107</sup> Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XXXIV, p. 385.

<sup>108</sup> *Idem*, pp. 386 - 387.

<sup>109</sup> *Idem*, pp. 388 - 389.

Terra como um grande Magneto, a qual atrai a Lua. Assim, escreve Kepler, no capítulo XXXIV:<sup>110</sup>

“...E porque é plausível que a Terra mova a Lua, mediante as suas *espécies* como nos aparece, e que ela é um corpo magnético, e que o Sol move igualmente os planetas, através de suas *espécies* como nos aparece, então também o Sol é um grande Magneto.”<sup>111</sup>

Essa força magnética é o que determinaria a variação de velocidades ao longo da órbita anual de cada planeta, isto é, quando o planeta está perto do Sol, este faz que ele seja atraído, aumentando a sua velocidade, e diminuindo o tempo; quando o planeta passa pelo Sol, este o repelirá, invertendo o processo, conseqüentemente, o tempo aumentará e a velocidade diminuirá.

Esse conceito de força permitiu intermediar distâncias e variações de velocidades, funcionando como um conceito que determinaria essa proporção, que serão expressas na forma de leis dos movimentos planetários, como sintetiza Max Jammer:<sup>112</sup>

“Kepler introduziu, assim, um conceito (um construto) intermediário, como uma construção, por assim dizer, entre mudança da distância e variação de velocidade, isso é o conceito de força.”

O rompimento com a visão medieval de força, possibilitou à astronomia kepleriana explicar porque os planetas realizam movimentos expressos pelas suas leis, e, principalmente, explicar sob o ponto de vista da dinâmica as causas físicas dos

---

<sup>110</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XXXIV, p. 39. Utilizamos, para essa passagem, a tradução de Jean Peyroux, p. 225.

<sup>111</sup>A concepção de força magnética kepleriana é desenvolvida na obra posterior, de 1621, *Epítome of Copernican Astronomy*. basicamente, por uma citação de Kepler nesta obra, pode-se notar o seu conceito de força magnética, “Nos céus as coisas são arranjadas de alguma forma diferente. Pois o Sol possui a faculdade ativa e energética de atrair, repelir ou reter o planeta, mas não como um Magneto faz, atuando em apenas uma região, mas em todas as partes do corpo. E, desta forma, é crível que o centro do corpo solar corresponde a uma extremidade ou região de um Magneto, mas a superfície toda está para outra região do Magneto. Portanto, nos corpos dos planetas, aquelas partes ou extremidades as quais nos inícios das coisas, e nas localizações primárias dos planetas indo para o Sol, são similares ao Sol e são atraídas pelo Sol; mas as partes as quais estenderam-se distintamente do Sol para as estrelas fixas vem a possuir a natureza da superfície do Sol; e, se elas mudam de posição em relação ao Sol, o Sol repelirá o planeta.” p. 898.

<sup>112</sup>Jammer, M., *Concepts of Force*, p. 88.

movimentos. Isso permitiu que astronomia abandonasse a sua visão eminentemente cinemática

Mediante o conceito de força, Kepler irá nos capítulos seguintes da sua obra formular as suas duas primeira leis.

Segundo Simon, esse tratamento dinâmico kepleriano da explicação dos movimentos planetários permitiu à astronomia tratar os seus fenômenos identicamente à forma dada aos fenômenos da física terrestre, permitindo elaborar leis astronômicas de maneira idêntica às elaboradas pela física do mundo sublunar:<sup>113</sup>

“Isso foi acompanhado por um passo importante, pois permitiu aos corpos celestes aparecerem como objetos físicos, tendo as mesmas texturas e obedecendo às mesmas leis, compostas de elementos análogos àqueles que se encontram sobre a Terra.”

O conceito de força magnética permitiu a Kepler compor uma dinâmica que rompe, se não completamente, pelo menos em parte, com a concepção do Cosmo qualitativo aristotélico. Se com Aristóteles o mundo supra-lunar apresenta uma ordenação própria e sofre ações, interpretações e procedimentos distintos do mundo terrestre - tais como a idéia aristotélica dos quatro elementos terrestres (fogo, água, ar e terra) e seus compostos, gerando uma física própria a eles; enquanto que nos céus apenas o éter aparece, permitindo uma outra concepção - levando à concepção de um universo heterogêneo; com Kepler, tanto o Cosmo quanto a Terra podem ser estudados pelos mesmos princípios, pois são feitos dos mesmos componentes e sofrem a ação de forças exercidas de um corpo a outro. Desse modo, a postulação de força magnética, em analogia com os trabalhos de Gilbert, permitiram a Kepler elaborar uma explicação dos movimentos planetários sem distinguí-la das explicações físicas dos corpos terrestres.

Pode-se entender essa atitude kepleriana de tratar a astronomia semelhantemente à física mediante a necessidade desse astrônomo de explicar o comportamento irregular dos movimentos planetários. A explicação kepleriana necessitava, para sustentar a postulação de uma força magnética exercida pelo Sol nos planetas, formular uma cosmologia voltada a

---

<sup>113</sup>Simon, G., *Kepler, Astronome Astrologue*, p. 337.

dar boas razões para as suas estipulações dinâmicas. Neste sentido, Kepler precisou romper, de uma certa forma, com o Cosmo aristotélico. A divisão entre um mundo supra-lunar, eterno e incorruptível, e um mundo sub-lunar, reino das mudanças e da geração e corrupção precisava ser abolida. No universo de Kepler, os movimentos astronômicos e terrestres devem ser compreendidos como sendo de mesma natureza. A explicação de uma força magnética serve tanto para a atração da Lua pela Terra, quanto a atração dos planetas pelo Sol, assim como para os fenômenos eminentemente terrestres. Dessa maneira, Kepler, na introdução do *Astronomia Nova*, que provavelmente foi escrita após a elaboração completa dessa obra, apresenta os princípios nos quais a sua dinâmica deve apoiar-se, segundo ele:<sup>114</sup>

“A verdadeira doutrina da gravidade apoia-se nos seguintes axiomas:

“Toda substância corporal, na medida em que ela é corporal, foi feita de modo a se encontrar em repouso em cada lugar no qual ela é isoladamente colocada, fora da esfera de influências de um corpo parente.

“A gravidade é uma disposição corporal mútua entre corpos parentes para unir ou se unir conjuntamente; assim, a Terra atrai uma pedra muito mais do que a pedra visa a Terra (a força magnética é um outro exemplo deste grupo).

“Os corpos celestes (se nós localizarmos a Terra no centro do mundo) não são atraídos para o centro do mundo, enquanto centro do mundo, mas para o centro de um corpo parente esférico, a saber, a Terra. Consequentemente, onde se encontrar localizada a Terra, ela será conduzida por suas forças anímicas, e os corpos celestes serão atraídos para ela.

“Se a Terra não está girando, os corpos celestes não poderiam em todo lugar ser atraídos em linhas retas para o ponto médio da Terra, mas poderiam ser atraídos para diferentes pontos a partir de diferentes lados.

“Se duas pedras são agrupadas proximamente uma à outra em algum lugar do mundo, fora da influência de algum corpo parente, essas pedras, de modo semelhante a dois corpos magnéticos, podem vir a unir-se em algum lugar

---

<sup>114</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, Introdução, pp. 55 e 56.

intermediário, cada uma aproximando-se da outra por um intervalo proporcional ao volume da outra.

“Se a Lua e a Terra não forem retidas por uma força anímica ou qualquer outra coisa semelhante, a Terra poderia ascender para a Lua cerca de uma das cinquenta e quatro partes do intervalo, e a Lua poderia descender para a Terra cerca de cinquenta e três partes do intervalo, e elas poderiam unir-se; provando, mediante isso, que a substância de cada uma é de mesma densidade.

“Se a Terra cessasse de atrair as águas para si, todas as águas do mar poderiam seguir em direção ao corpo da Lua”

Desse modo, a dinâmica kepleriana apoia-se na semelhança entre os corpos, sejam eles terrestres ou celestes. O elemento que serve de atração para os corpos, a gravidade kepleriana, pode ser entendido como a tendência natural que os corpos parentes (cognatos) têm para se unirem, semelhante à ação magnética, mas sofrendo a ação da inércia kepleriana - tendência a se manter em repouso -, que impede que se unam, mantendo um intervalo entre eles. Com essa interpretação do mundo físico e astronômico como seguindo os mesmos princípios, Kepler rompe com a divisão aristotélica entre mundo corruptível e incorruptível; para Kepler, as mudanças ocorrem segundo os mesmos princípios nos dois mundos, condicionados pela ação de força magnética.

Com essa concepção em mãos, Kepler irá subsequentemente substituir a noção de faculdade animal por força magnética, de modo que esta última represente uma explicação de caráter físico, mostrando a impossibilidade de se admitir uma alma planetária segundo as exigências de uma astronomia dinâmica, não meramente cinemática. Isso será feito na segunda formulação do conceito de força, capítulos LVI e LVII do *Astronomia Nova*.

### **3.4.3. Força Motriz e Circularidade**

Kepler viu-se, após ter fundamentado a sua dinâmica sob bases analógicas com o magnetismo, obrigado a tratar de uma questão que foi de capital importância para o

desenvolvimento das suas especulações físicas, em relação à tentativa de quantificar as distâncias e tempos planetários a partir do centro físico de movimentos, o Sol. Kepler sabia, ou admitia, que os planetas são governados pela ação da força magnética exercida pelo Sol, que faz, juntamente com a tendência natural dos planetas a permanecerem em repouso, que cada planeta tenha uma alteração nas suas velocidades de translação, ocasionando tempos distintos nos arcos de circunferências percorridos; porém, Kepler não sabia de que modo essa força magnética faz com que o planeta percorra movimentos em circuitos circulares e uniformes, ou compostos de artifícios que os reduzam à circularidade e uniformidade das órbitas. Em outras palavras, o que leva o planeta a perfazer uma órbita circular excêntrica, e manter essa excentricidade a cada trajeto ao redor do Sol ? Segundo Kepler<sup>115</sup>

“Falei até este momento da origem do movimento que revoluciona os planeta ao redor do Sol ou a Lua ao redor da Terra; isto é, falei das causas naturais do círculo que na teoria dos planetas é chamado ou excêntrico ou concêntrico, segundo as várias intenções que possa ter o autor. Agora, alguma coisa deve ser dita acerca das causas naturais das excentricidades, ou, na hipótese particular de Copérnico, do epiciclo sobre um concêntrico. Pois o poder movente a partir do Sol foi considerado uniforme, tendo graus diferentes apenas nas várias amplitudes dos círculos. Suas qualidades inatas são tais que se um planeta tende a permanecer na mesma distância a partir do Sol, ele pode ser percorrido uniformemente, e nenhuma intenção ou remissão do movimento solar pode ser percebida. A não uniformidade percebida no trabalho desse poder vem a partir do planeta transportado de uma distância do Sol a outra, de modo que ele se encontra sob a ação de um ou outro grau de força desse poder do Sol. A questão, portanto, é, se, como Brahe demonstrou, não existem órbitas sólidas, como o planeta pode ascender e descender para o Sol ? Como isso, também, pode vir do Sol?”

O problema para Kepler é explicar como o planeta, movido pela ação da força solar, percorre órbitas circulares e uniformes, ou compostas dessas, sabendo-se que há uma alteração nas distâncias e tempos de percurso e, também, não existem, segundo Brahe, órbitas sólidas que permitiriam o planeta mover-se por elas. Kepler associa esse problema à

---

<sup>115</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XXXVIII, p. 404.

dificuldade que um marinheiro teria em manter seu barco a remo num rio, sofrendo a ação de uma correnteza que faz o barco mudar o seu trajeto; no caso dos movimentos planetários, o marinheiro seria a alma dos planetas, e a correnteza a ação (força motriz) exercida pelo Sol nele<sup>116</sup>.

Em uma astronomia meramente cinemática, a de Ptolomeu ou a de Copérnico, esse não seria um problema, pois os planetas percorreriam os seus movimentos em relação a um ponto fictício - o equante em Ptolomeu, o epiciclo sobre o deferente em Copérnico -, sendo que as ações de força não entrariam em consideração, pelo fato de não ser da alçada do astrônomo explicar fisicamente os movimentos e o que os causa. Porém, na astronomia elaborada por Kepler, essa questão torna-se central por duas razões: primeiramente porque uma explicação alicerçada na dinâmica celeste deve dar conta de como o planeta sofre uma ação à distância, que faz com que ele altere os seus trajetos. Em segundo lugar, - e em relação à quebra com axioma platônico isso é extremamente importante - estão as conseqüências que essa questão terá nos capítulos LVI e LVII do *Astronomia Nova*; Kepler, nesses capítulos, criticará fortemente a idéia de almas planetárias agindo nos movimentos dos planetas, pois essa explicação de cunho psicológico não possibilita uma interpretação alicerçada em princípios da física.

Neste sentido, essa questão que se apresenta a Kepler permitirá que ele rompa e substitua o axioma platônico da circularidade e uniformidade, pois a impossibilidade de existência de uma alma planetária abre a possibilidade de explicar fisicamente a ação da força solar mediante a admissão de uma outra forma para as órbitas planetárias.

As especulações keplerianas sobre o que leva o planeta a percorrer um círculo excêntrico são investigadas pormenorizadamente no capítulo XXXIX do *Astronomia Nova*. Nesse capítulo, Kepler apresenta seis axiomas para a investigação de tal problema, a saber,<sup>117</sup>

“Primeiro, que o corpo do planeta está inclinado, por natureza, a permanecer em repouso, em todo lugar em que ele estiver localizado.

---

<sup>116</sup> *Idem*, p. 405.

<sup>117</sup> Kepler, J. *Astronomia Nova*, cap. XXXIX, p. 407.

“Segundo, que ele é transportado de uma posição longitudinal para outra pelo poder que se origina no Sol.

“Terceiro, se as distâncias do planeta ao Sol não são alteradas, um caminho circular pode resultar desse movimento.

“Quarto, supondo o mesmo planeta percorrer duas distâncias diferentes a partir do Sol, o tempo periódico deve estar na razão duplicada das distâncias ou magnitudes do círculo.

“Quinto, o poder nu e solitário residindo no corpo do próprio planeta não é suficiente para transportar seu corpo de um lugar a outro lugar, visto que ele é desprovido de pés ou asas para se transportar no ar etéreo.

“E, todavia, sexto, a aproximação e o afastamento de um planeta para e a partir do Sol está no poder que é próprio ao planeta.”

Mediante esses axiomas, Kepler irá apontar absurdos em relação à suas especulações de ordem física com os princípios aceitos pela astronomia de sua época, principalmente a utilização de círculos excêntricos, que se utilizam de epiciclos, e a ação de uma alma planetária. O primeiro absurdo é apresentado pelo quinto e sexto axiomas: o poder próprio do planeta não é apto a fazê-lo transportar-se de lugar a lugar, como diz o quinto axioma, mas, por outro lado, o sexto afirma que ele faz tal coisa.

Kepler realizou uma série de demonstrações geométricas, que não vem ao caso nos remetermos a elas, para provar que o movimento epicíclico do planeta leva sempre a consideração de que esse percorre movimentos em relação a um ponto fictício, não havendo possibilidades de comunicação entre a força exercida pelo Sol nos movimentos epicíclicos. Desta maneira, o planeta deve ser guiado pela ação de uma inteligência, sendo que tal inteligência não é apta a ser descrita pela física natural, segundo Kepler:<sup>118</sup>

“Se, de fato, for certo que o movimento do planeta ao longo do diâmetro do epiciclo não pode ser conduzido por qualquer poder material, corporal ou

---

<sup>118</sup> *Idem*, p. 413.



magnético do planeta, nem por qualquer poder animal, mas for governado pela mente planetária, nada de absurdo poderá ser estabelecido.”

Em outras palavras, pela ação da força, no sentido kepleriano de força física, os movimentos em epiciclos não permitem adequação; não há possibilidade do planeta fazer um movimento em epiciclo pela ação de uma força física - pois, os movimentos nesse caso são relacionados a um ponto fictício. Apenas pela ação de uma alma planetária, desprovida de caráter natural, explicam-se tais movimentos, como bem escreve Koyré,<sup>119</sup>

“...o movimento epicíclico requerido para realizar uma trajetória excêntrica e perfeitamente circular é impossível de ser produzido por meios puramente naturais; ele não se pode realizar sem a intervenção de uma inteligência planetária (de uma alma motriz) capaz de calcular, e de fazer o planeta executar, sob o seu epiciclo imaginário, os movimentos de velocidades e direções variáveis que fariam de sua órbita um círculo excêntrico perfeito.”

Essa impossibilidade de tratar os artifícios geométricos da astronomia tradicional mediante as considerações dinâmicas de Kepler conduzirá esse astrônomo a investigar as possibilidades de se construir uma astronomia que rompa com esses artifícios. Quando Kepler realizou as investigações desse capítulo XXXIX, ele seguia os princípios de circularidade e uniformidade pregados pelo axioma platônico, que o impeliram a investigar a ação do epiciclo nos movimentos planetários, tendo-se em vista considerações físicas; após romper com o referido axioma, ou colocá-lo em suspensão, Kepler voltará a tratar dessas questões, na sua segunda formulação do conceito de força (capítulos LVI e LVII do *Astronomia Nova*), mas sob o ponto de vista de que a circularidade e uniformidade, juntamente com a aceitação de uma alma planetária, são princípios que devem ser abolidos da astronomia, pois essa ciência não precisa desses pelo fato de que as suas duas primeiras leis correspondem às exigências estipuladas pela sua dinâmica celeste.

---

<sup>119</sup>Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, p. 223.

### 3.5. A Segunda Lei

Até a formulação do conceito de força, Kepler não sabia, recapitulando, qual é a órbita do planeta (ainda acreditava que ela era circular), e em que ponto da órbita poderia justificar a relação entre velocidade e distância (não sabia em qual ponto da linha das apsides a velocidade seria uniforme). Tinha descoberto apenas que, assumindo a órbita como circular e com velocidade constante, o ponto equante não poderia estar fixo na linha das apsides (estipulado pela hipótese vicária); também considerava que as velocidades lineares dos planetas são inversamente proporcionais à distância do centro ao Sol (sua lei das distâncias), que se apresentou como falsa.

Em termos de determinação dos posicionamentos planetários, a hipótese vicária tinha um erro de apenas 8' de arco, inferior aos artifícios matemáticos dos sistemas de Copérnico e Ptolomeu, que tinham um erro de 10' de arco; Kepler poderia, se quisesse, abandonar suas especulações dinâmicas, e contentar-se em ser um excelente astrônomo prático. Mas não agiu dessa forma, e as suas especulações físicas, tais como o seu conceito de força, conduziram-no à descoberta das suas duas primeiras leis dos movimentos planetários.

Postulando que a força magnética exercida pelo Sol é a responsável pela variação das velocidades nos pontos extremos da linha das apsides dos planetas, (e acreditava erroneamente que isso poderia ser estendido para qualquer ponto da órbita) passou, a partir disso, a procurar uma forma para essa órbita, uma forma que expressasse essa relação de variação de velocidades. Como consequência dessa procura chegou a encontrar a lei das áreas antes da lei da forma elíptica.

O fato de Kepler formular a segunda lei antes da primeira é um ponto interessante dentro da discussão do processo de elaboração dessas leis. Isso aconteceu pelo motivo da segunda lei ter sido descoberta quando Kepler estava procurando a formulação da primeira, ocorrendo como consequência dos cálculos para a determinação da órbita de Marte. Isto é, Kepler objetivava encontrar a órbita do planeta, e nessa tentativa “esbarrou” com a lei das áreas.

SBD/FELCH/UEP

Como diz Koyré<sup>120</sup>, o questionamento da circularidade levou Kepler a adotar uma postura nova frente à astronomia:

“...sobre a estrutura dinâmica dos movimentos planetários, investigações que, como nós temos visto, não alcançarão o reconhecimento da impossibilidade natural de uma órbita ser perfeitamente circular. Isso sem dúvida porque, de um lado, a forma das equações não podem parecer naturais, quando se está convencido da necessidade de introduzir considerações dinâmicas na astronomia; de outro lado, pelo motivo que o método novo revela-se problemático nas trajetórias circulares, mas triunfa, em contrapartida, nas trajetórias ovais.”

Como a posição de defesa da circularidade não permite uma admissão dinâmica (e deve-se ressaltar, algo que Koyré não apresentou, o papel que é desempenhado pelos dados observacionais, isto é, a circularidade estará em suspensão não apenas porque ela não permite a introdução de uma dinâmica, mas, principalmente, por não ser a expressão do que de fato ocorre, e isso é retirado das informações das observações), e como o procedimento de Kepler adotado na astronomia, que é a utilização da lei das distâncias, não permite a expressão de uma forma circular, Kepler irá procurar uma forma das trajetórias dos movimentos planetários que possa ser expressa de uma maneira equacional. Desse modo, a lei das áreas é fruto dessa procura.

Porém, Kepler redige o capítulo XL do *Astronomia Nova* deixando as especulações dinâmicas para a quarta parte dessa obra, voltando a tratar dos cálculos sobre o planeta Marte, tentando dar plausibilidade para a sua lei física, a lei das distâncias.

Para Kepler, os resultados obtidos nesse capítulo XL, que resultaram na sua segunda lei dos movimentos planetários, eram simples cálculos, que o auxiliariam a obter uma relação entre os tempos de percurso com as distâncias computadas a partir do centro físico de movimentos. Kepler chamou esse procedimento de *Método Imperfeito de Computar as Equações a partir da Hipótese Física*<sup>121</sup>, não tendo, portanto, confiança plena nesse procedimento de cálculo. Será apenas no final da quarta parte que tal procedimento se apresentará como correto.

---

<sup>120</sup>Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, p. 232.

<sup>121</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XL, p. 417.

Kepler procurou elaborar um método de cálculo para operacionalizar a sua lei das distâncias. Para tanto, procurou relacionar os tempos dos planetas sobre as partes iguais do excêntrico às distâncias percorridas; sendo que essas distâncias apresentam uma variação muito grande. Kepler perguntou-se como tal procedimento poderia ser obtido, segundo ele:<sup>122</sup>

“Visto que os tempos de um planeta sobre partes iguais do excêntrico estão entre si como as distâncias dessas partes, e visto que os pontos individuais do semicírculo inteiro do excêntrico estão todos em diferentes distâncias, tomei para mim a difícil tarefa de saber se as somas dessas distâncias individuais podem ser obtidas. Pois, a menos que encontremos a soma de todas elas (e elas são infinitas em número) não poderemos dizer quais são os tempos percorridos por elas.....Pois a soma total das distâncias estão para o tempo periódico total, como a soma das distâncias estão para os seus tempos correspondentes.”

Kepler relacionará os tempos periódicos de cada percurso com as suas distâncias, e essas com o tempo total juntamente com a distância total. É esse o modo pelo qual ele trouxe para a discussão a relação entre tempos e distâncias. A formulação da lei das distâncias - a velocidade é inversamente proporcional à distância do planeta ao centro -, é tratada agora sobre os tempos gastos pelo planeta para percorrer um arco de circunferência no excêntrico - que Kepler substituirá os arcos pelas superfícies (áreas) - relacionando essas ao tempo total de percurso com a distância total percorrida.

Antes de passarmos para a formulação da hipótese das superfícies (lei das áreas), como Kepler a denominou nesse estágio do *Astronomia Nova*, devemos analisar mais detalhadamente os problemas para a sua formulação, pois ela envolveu elementos da astronomia tradicional, tais como a anomalia mediana, verdadeira, etc., que fizeram parte do arsenal teórico para conjugar observações ao axioma da circularidade e uniformidade. Kepler utilizou tais elementos modificando a forma de operacionalizá-los até romper com esses, quando, no final da quarta parte, substitui a órbita circular pela elíptica.

Para a astronomia grega antiga, as observações mostravam que os planetas, ou o Sol, não apresentavam as regularidades exigidas pelo princípio de circularidade e uniformidade.

---

<sup>122</sup> *Idem.*

Isso era constado principalmente pelos movimentos retrógrados dos planetas, e pela inconstâncias no período das estações, isto é, cada estação tem uma duração diferente da outra, ocorrendo uma variação nos seus tempos. Isso acarretou a elaboração de artifícios matemáticos (excêntricos, epiciclos, equante, etc.) para transformar essas inconstâncias em regularidades, e, desse modo, os conceitos de anomalia mediana, verdadeira, etc., adquiriram valor. Para entendê-los, observe-se a figura 13, abaixo. Seja S o Sol; M a Terra; AP a linha das apsides; C a excentricidade (nesse ponto o Sol tem movimentos uniformes). L, Z, H, W são os solstícios de verão (Z), de inverno (W), os equinócios de outono (H) e de primavera (L). O arco LZ é maior que o arco HW, e isso faz com que as estações do ano não sejam percorridas todas igualmente. Para resolver tal problema, os gregos tinham que encontrar a distância CM, para, por meio de C, apresentar os movimentos como uniformes<sup>123</sup>

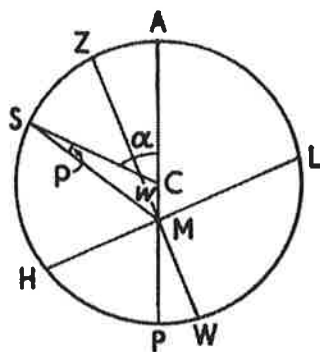


Figura 13<sup>124</sup>

A estratégia utilizada pelos astrônomos gregos foi a de projetar os movimentos do Sol no céu por meio de C e M. Assim, por C, S move-se uniformemente em sua órbita segundo a anomalia mediana, que é o ângulo  $\alpha$ , formado por ACS, sendo que tal ângulo pode ser obtido em qualquer momento após a passagem do Sol pelo apogeu A. Visto de M, AMS forma o ângulo  $\omega$ , que é a anomalia verdadeira. Conhecendo-se o valor de  $\omega$ , dado por observações, e o valor de  $p$  (equação ótica), obtém-se o valor de  $\alpha$ ; tendo-se isso em mãos, elaboravam-se tabelas acerca dos tempos (percursos angulares) do planeta.

<sup>123</sup>Esse parágrafo teve como base a obra de Dijksterhuis, E.J., *The Mechanization of the World Picture*, p. 56.

<sup>124</sup>Retirada de Dijksterhuis, E.J., *The Mechanization of the World Picture*, p. 56.

Desta forma, a anomalia verdadeira pode ser entendida como sendo o ângulo observado da Terra, formado pelo Sol e a posição do apogeu na linha das apsides, e esses ângulos são irregulares entre si; para poder corrigi-los, e elaborar tabelas para precisar os posicionamentos futuros, foi necessária a elaboração da anomalia mediana, que é um conceito teórico, que auxiliava na obtenção. Pela anomalia mediana, os ângulos são uniformizados, isto é, os arcos formados pelos ângulos mantêm uma uniformidade.

A anomalia mediana era constituída de ângulos que, por tabelas, correspondiam ao tempo de passagem de uma posição a outra do planeta ao longo do círculo excêntrico.

Na formulação da lei das áreas, Kepler substituiu o ângulo formado pela anomalia mediana por uma área percorrida num certo tempo. Seu procedimento foi basicamente o seguinte:

Na figura 14 abaixo, seja A o Sol, B o centro da órbita, CD a linha das apsides, G a posição de Marte após a sua passagem por C (afélio). O ângulo CBG é a anomalia excêntrica; o ângulo CAG é a anomalia verdadeira; e a diferença entre esses ângulos, que é o ângulo BGA, Kepler chamou de equação ótica.

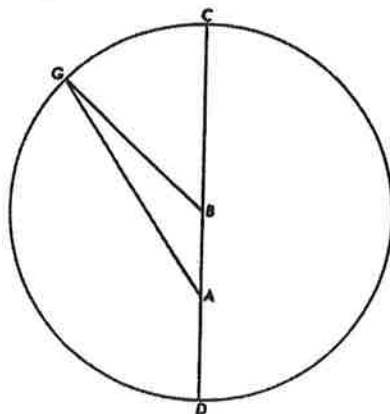


Figura 14<sup>125</sup>

Mediante esses elementos, Kepler precisava encontrar a equação excêntrica (que seria, pela aceitação da circularidade, a equação que determinaria o valor da excentricidade para a descrição de uma órbita circular), que é a diferença entre a anomalia mediana e verdadeira.

<sup>125</sup>Retirada de Curtis, W., "Kepler's Derivation of the Elliptical Path", *Isis*, (1968), n° 59, p. 16.

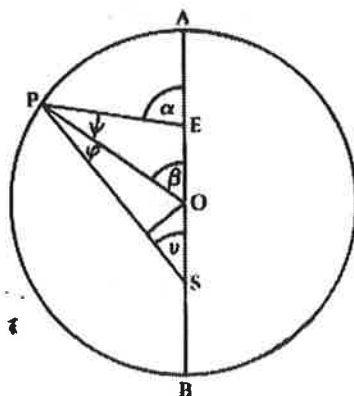
Para encontrar a anomalia mediana, Kepler utilizou a sua hipótese da superfície. A área CAG é medida em graus (o círculo todo vale 360°), sendo que esses graus dariam o tempo que o planeta demora para cruzar o arco CG. Com qualquer ângulo conhecido após a passagem do planeta pelo afélio, o ângulo da anomalia excêntrica CBG, e conhecendo-se o valor da excentricidade AB, pode-se, pela hipótese das superfícies, saber o valor do tempo em graus da área ABG (essa área Kepler denominou de equação física), tendo-se, assim, o valor da anomalia mediana.

Para determinar a anomalia verdadeira, subtrai-se, trigonometricamente, o ângulo CBG do ângulo BGA.

A utilização da hipótese das superfícies tinha como objetivo encontrar a anomalia mediana em forma de áreas percorridas computadas como sendo o tempo de percurso dessa área (na formulação ptolomaica, era o tempo do arco, e não da área). Conhecendo-se a anomalia mediana, e conhecendo-se a anomalia verdadeira, poder-se-ia encontrar a equação excêntrica, determinando o valor em que a excentricidade seria constante na órbita circular<sup>126</sup>.

<sup>126</sup>Simon apresenta no seu livro *Kepler, Astronome Astrologue*, pp. 358 - 359, uma interpretação mais simplificada sobre essa questão. Ele relaciona o problema sob o ponto de vista ptolomaico e kepleriano, mostrando o procedimento distinto de Kepler. Vale a pena, apesar de um pouco longa, reproduzir essa interpretação de Simon:

“Relataremos os cálculos dessas equações no esquema ptolomaico (fig. abaixo). Ele permite que acompanhamos as três operações sucessivamente e reversivamente:



- 1) Marcar o planeta nos tempos.
  - 2) Marcar o planeta no espaço, em relação ao centro do excêntrico que ele percorre.
  - 3) Marcar o planeta no espaço, em relação ao centro do mundo (Terra para Ptolomeu; Sol para Kepler).
- Sobre o esquema, A e B representam as apsidas, E o equante, O o centro da órbita ou do excêntrico, S a Terra (ou o Sol); SE é a excentricidade total, bissetada.  
Suponhamos o planeta em P.

Assim, os cálculos empreendidos por Kepler na elaboração da sua hipótese das superfícies foram obtidos em função de conjugar os valores para a anomalia mediana a partir do centro físico de movimentos, para, em seguida, relacioná-los às distâncias percorridas pelo planeta no trajeto correspondente a essa anomalia. Dessas pesquisas, Kepler obteve o resultado final que os raios vetoriais que unem o planeta ao Sol percorrem áreas iguais em tempos iguais, que é o que reza a sua segunda lei dos movimentos planetários. Para tanto, Kepler modificou o tratamento tradicional de obtenção da anomalia mediana. Em Ptolomeu, a anomalia mediana era computada a partir do equante, ponto fictício; enquanto que na formulação kepleriana, essa anomalia é dada em função do centro físico de movimentos, que no caso de Kepler é o Sol.

Toda a elaboração da hipótese das superfícies foi, na quarta parte do *Astronomia Nova*, de capital importância para a ruptura com a crença no axioma platônico, pois essa hipótese tem como fundamento a aceitação de um centro físico de movimentos, o Sol, para uniformizar os tempos com as áreas percorridas. A impossibilidade de uma órbita circular adequar-se a essa relação levará Kepler, entre outros motivos, a rejeitar o princípio de circularidade, como ele diz no início do capítulo XL - escrito, provavelmente, quando já tinha obtido as suas duas primeiras leis, tendo rompido, portanto, com a circularidade e uniformidade<sup>127</sup>

---

a) Os tempos gastos desde a passagem do afélio A é medido por um ângulo,  $\alpha$ , proporcional aos tempos, uma vez que E é suposto ser o centro mediano dos movimentos do planeta. Desse fato,  $\alpha$  que representa de fato os tempos é denominado anomalia mediana.

b) O arco efetivamente percorrido sobre o excêntrico é medido pelo ângulo ao centro  $\beta$ . Esse ângulo é dito anomalia do excêntrico.

c) Resta saber em qual direção será visto efetivamente o planeta (em Ptolomeu) ou qual será a posição em relação ao Sol (em Kepler). Ela é dada pelo ângulo  $\nu$ , que se chama anomalia verdadeira, ou igualizada. Constata-se imediatamente, considerando-se o triângulo SOP, que  $\nu + \varphi = 180^\circ - \text{ângulo SOP} = \beta$ . O mesmo após o triângulo SEP,  $\nu + (\varphi + \psi) = \alpha$ .

Para obter a anomalia verdadeira se faz, portanto:

- a partir da anomalia do excêntrico, suprimir (ou nos outros semicírculos, aumentar se se toma como origem B e não mais A) o ângulo  $\varphi$ .  $\nu = \beta + \text{ou} - \varphi$ .

- a partir da anomalia mediana, suprimir ou aumentar  $(\varphi + \psi)$ .  $\nu = \alpha + \text{ou} - (\varphi + \psi)$ .

Chama-se  $\varphi$  a equação óptica (pois ela dá o direção pela qual é visto o planeta) e  $\psi$  a equação física (porque ela permite encontrar, não a aparência, mas a realidade, do movimento). Uma vez dado o raio da órbita e a excentricidade, o cálculo desses ângulos segue-se sem dificuldades. Portanto, são esses que permitem, por adição ou subtração igualizar (de onde o seu nome, equação) a anomalia mediana ou a anomalia do excêntrico com a anomalia verdadeira.”

<sup>127</sup> Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XL, p. 416.



“Meu primeiro erro foi supor que o caminho do planeta é um círculo perfeito, uma suposição que era totalmente alicerçada na autoridade dos filósofos, mais convincente para a metafísica em particular. Em segundo lugar, admitir que o caminho do planeta era um excêntrico perfeito, pois na teoria do Sol a soma pela qual ele difere do caminho oval é imperceptível.”

Os erros a que Kepler se refere o impedirão de admitir a hipótese das superfícies, quando a formulou, como lei, pois a admissão do axioma platônico impediu a adequação dessa hipótese com o estipulado por esse princípio.

Voltando para a formulação da lei das áreas, o raciocínio de Kepler foi basicamente o seguinte:

Na tentativa de encontrar a órbita de Marte, Kepler necessitava equacionar os vetores que unem o planeta ao Sol (distâncias de Marte ao centro em cada ponto de sua órbita), isso pelo fato de que, como acreditava erroneamente Kepler, para cada ponto da órbita de Marte há uma velocidade inversamente proporcional à distância desse ao centro (lei das distâncias). Assim, para cada ponto da órbita temos uma velocidade. O problema é que uma órbita tem infinitos pontos, conseqüentemente, infinitas distâncias com infinitas velocidades.

Kepler solucionou tal dificuldade pela substituição de vetores (distâncias vetoriais) por superfícies compostas por esses vetores, como ele mesmo diz:<sup>128</sup>

“Como eu me rendi completamente à idéia de que sobre um excêntrico há uma infinidade de pontos, e, conseqüentemente, uma infinidade de distâncias, veio-me ao espírito que a superfície do excêntrico compreenderia todos (os pontos). Pois sabia que, antigamente, Arquimedes, na tentativa de encontrar a relação entre a circunferência e o diâmetro, teria, da mesma maneira, decomposto o círculo em uma infinidade de triângulos.... Assim, em vez de dividir como precedentemente a circunferência em 360 partes iguais, irei decompô-la em superfícies (do círculo) em tirantes de linhas (raios vetores) a partir de onde se mede a excentricidade.”

---

<sup>128</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XL, p. 418. Utilizamos, para essa passagem, a tradução de Jean Peyroux, p. 248.

Após esse raciocínio, Kepler passa a dar uma demonstração geométrica para encontrar a forma da órbita pela decomposição em áreas (superfícies), dividindo a circunferência em triângulos, tentando equacionar as distâncias das linhas extremas desses triângulos. Segundo Kepler, na figura 15, demonstra-se:<sup>129</sup>

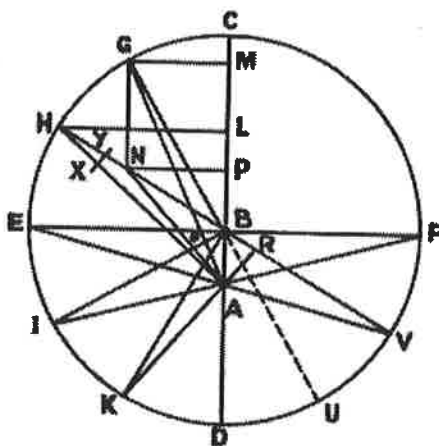


Figura 15<sup>130</sup>

“Seja AB a linha das apsides, A o Sol (ou a Terra para Ptolomeu): B o centro do excêntrico CD, todo o semicírculo CD deve ser dividido em qualquer número de partes iguais, CG, GH, HE, EI, IK, KD, e sejam os pontos A e B conectados com os pontos de divisão. Portanto, AC é a distância maior, enquanto que AD é a distância menor, e as outras, em ordem, são AG, AH, AE, AI, AK. E visto que os triângulos sobre alturas iguais estão entre si como as suas bases<sup>131</sup>, os setores, ou triângulos, CBG, GBH, e assim todos têm a mesma altura, os lados iguais BC, BG, BH, eles são, portanto, todos iguais. Mas todos os triângulos estão contidos na área CDE, e todos os arcos ou bases estão contidos na circunferência CED. Portanto, por composição<sup>132</sup>, como a área CDE está para o arco CED, assim a área CBG está para o arco CG, e, alternando<sup>133</sup>, como o arco CED está para CG,

<sup>129</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XL, pp. 418 - 419.

<sup>130</sup>*Idem*, p. 419 - 420.

<sup>131</sup>Euclides, *Elementos*, Livro VI, proposição 1 - “Os triângulos e paralelogramos, que têm a mesma altura, estão entre si como suas bases”. Dover, 1956, tradução de Heath, T. L., vol. II, p. 191.

<sup>132</sup>Euclides, *Elementos*, Livro V, definição 14 - “Composição de uma razão significa tomar o antecedente juntamente com o conseqüente como um em relação ao conseqüente em si mesmo.” Dover, 1956, tradução de Heath, T. L. vol. II, pp. 134 - 135.

<sup>133</sup>Euclides, *Elementos*, Livro V, definição 12 - “Razão alternada significa tomar o antecedente com relação ao antecedente e o conseqüente com relação ao conseqüente.” Dover, 1956, tradução de Heath, T. L., vol. II, p.

CH, e o resto em ordem, assim, está a área CDE para as áreas CBG, CBH, e o restante em ordem. Portanto, nenhum erro é introduzido se as áreas forem tomadas pelos arcos desse modo, substituindo as áreas CGB, CHB pelos ângulos da anomalia excêntrica CBG, CBH.”

Inicialmente, Kepler apresentou os dados do problema. AB a linha das apsides, A é o Sol, B o centro excêntrico. Dividiu, em seguida, o semicírculo CD em partes iguais, unindo cada ponto ao centro B e ao Sol A, formando vários triângulos. Aplicou a esses triângulos, relações geométricas retiradas dos *Elementos* de Euclides, relacionando os arcos com as áreas computadas a partir do centro do excêntrico, B; desta forma, temos:

1) Os triângulos CBG, GBH, e os demais, têm a mesma altura, assim, pela proposição VI dos *Elementos* de Euclides, temos que os lados BC, BG, BH e os demais são todos iguais.

2) Como todos os triângulos estão contidos na área CDE, e todos os arcos ou bases estão contidos na circunferência CED, portanto, pela Definição 14 do livro V dos *Elementos*, temos que:

Área CDE : arco CED :: área CBG : arco CG

3) E, alternando, pela definição 12 do livro V dos *Elementos*:

Arco CED : arcos CG, CH e os demais :: área CDE : áreas CBG, CBH e as demais (as áreas vão se acumulando).

Até aqui, Kepler associou as áreas com os ângulos da anomalia excêntrica. Em seguida, ele prossegue:<sup>134</sup>

---

134. Aplica-se essa definição na proposição 16, do mesmo livro - “Se quatro magnitudes forem proporcionais, também serão proporcionais alternadamente”. pp. 164 - 165.

<sup>134</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XL, p. 419.

“Além disso, como as linhas retas a partir de B para as partes infinitas da circunferência estão todas contidas na área do semicírculo CDE, e as linhas retas de B para as partes infinitas do arco CH estão todas contidas na área CBH, portanto estão também as linhas retas de A para as mesmas partes infinitas da circunferência ou arco que fazem a mesma coisa. E, finalmente, visto que todas as [retas] traçadas a partir de A e B estão sobre o mesmo semicírculo CDE, sendo que todos a partir de A estão nas várias distâncias a que está o Sol, concludo, dessa maneira, que computando a área CAH ou CAE posso ter a soma das distâncias infinitas em CH ou CE; não porque o infinito possa ser percorrido, mas porque penso que a medida da faculdade pela qual as distâncias coletadas percorrem os tempos está contida nessa área, de modo que podemos ser aptos a obtê-la pelo conhecimento da área sem enumeração das parcelas mínimas.”

Kepler relaciona as áreas percorridas a partir do centro do excêntrico com as áreas percorridas a partir do centro físico, mediante as semelhanças dos triângulos construídos; demonstrando que todas essas estão sobre a mesma área, possibilitando reunir todas as distâncias que compõem a área. Continua Kepler:<sup>135</sup>

“Portanto, a partir disso, como a área CDE está para metade do tempo periódico, o qual nós designamos por 180°, assim as áreas CAG, CAH estão para o tempo percorrido sobre CG e CH. Assim, a área CGA torna-se uma medida de tempo ou anomalia mediana, correspondendo ao arco do excêntrico CG, visto que a anomalia mediana mede o tempo.

Kepler associa as áreas parciais percorridas com os tempos parciais percorridos, juntamente com a área total do semicírculo com o tempo para seu percurso, que fica assim:

Área CDE : Tempo Total (semicírculo) :: áreas CAG, CAH : tempo CG, CH.

Desta forma, a anomalia mediana CGA, no caso do arco CG, é a medida de tempo para a computação do percurso dado pela área CGA; o mesmo valendo para as outras áreas. Em outras palavras, Kepler obteve que o planeta percorre áreas iguais em tempos iguais, computadas a partir do centro físico de movimentos, A, que representa o Sol. Aqui, já

temos a formulação da segunda lei, mas Kepler não a reconhecia assim; desta forma, ele continua:<sup>136</sup>

“Entretanto, a parte CBG da área CAG era a medida da anomalia excêntrica, sendo que a equação ótica é o ângulo BGA. Portanto, a área restante, a do triângulo BGA, é o excesso (para esse lugar) da anomalia mediana sobre a anomalia excêntrica, e o ângulo BGA do triângulo é o excesso da anomalia excêntrica CBG sobre a anomalia igualizada CAG. Portanto, o conhecimento de um triângulo de ambas partes da equação correspondendo à anomalia igualizada GAC.”

Isto é, Kepler ainda considera as questões relativa a uma astronomia posicional, pois utiliza a parte ótica, o ângulo BGA, como o excesso que produz a anomalia mediana. Toda essas questões serão deixadas de lado quando Kepler assumir a sua hipótese das superfícies como a segunda lei dos movimentos planetários.

O raciocínio de Kepler foi o de utilizar a sua lei física - lei das distâncias - tentando obter uma demonstração geométrica para validar essa lei para os tempos de percurso de cada grupo de distâncias percorridas, as áreas. Deste modo, a hipótese das superfícies, nesse estágio do *Astronomia Nova*, era, pode-se afirmar, um recurso para dar sustentabilidade à lei física das distâncias, objetivando determinar que em cada setor percorrido pelo planeta há uma proporcionalidade entre as distâncias percorridas com os tempos gastos para percorrê-las<sup>137</sup>.

Esse raciocínio era errôneo, mas Kepler notou que cada área percorrida correspondia proporcionalmente à anomalia mediana (tempo de percurso dessa área), isto é, as

---

<sup>135</sup> *Idem*, pp. 419 - 420.

<sup>136</sup> *Idem*, p. 420.

<sup>137</sup> No seu excelente artigo “Kepler’s Second Law of Planetary Motion”, E. J. Aiton apresenta as controvérsias geradas sobre a questão da lei das distâncias ser equivalente ou não à lei das áreas. Segundo Aiton, diversos comentaristas não compreenderam o papel da lei das distâncias em relação à lei das áreas, criando uma série de interpretações distintas. Assim, Dreyer, na sua obra *History of Astronomy from Thales to Kepler*, p. 388, afirma que Kepler nunca se deparou com o erro da lei das distâncias. Max Caspar, na sua obra *Kepler*, p. 132, defende que Kepler era consciente que as duas leis não eram idênticas. Koyré, no *La Révolution Astronomique*, p. 318, aponta para o fato de que Kepler deduziu erroneamente a lei das áreas a partir da lei das distâncias, corrigindo esse erro no *Epitome*. Para Aiton, essas várias interpretações são frutos da não compreensão de que Kepler usou a lei das distâncias para órbitas circulares, negando-a como lei quando a órbita se mostrou elíptica.

observações dadas pelos tempos das anomalias medianas correspondiam à suposição de divisão do círculos em áreas. .

Kepler chega assim à segunda lei. Porém, nessa formulação do capítulo XL, a lei das áreas não tem um estatuto de lei, mas apenas de um cálculo impreciso para determinar as distâncias pela hipótese física, isso é notado pelo título desse capítulo, *Método imperfeito retirado a partir da lei física*.

Assim, quando foi formulada a segunda lei, ela tinha um caráter de instrumento de cálculo. Sua força será sentida mais adiante, na quarta parte do *Astronomia Nova*, em especial nos capítulos LXVII e LXIX, quando ela for aplicada na determinação da órbita elíptica dos movimentos planetários (primeira lei de Kepler).

Apesar dessa hipótese das superfícies representar satisfatoriamente as observações sobre Marte, no que concerne à aceitação de um centro físico, Kepler notou que ela, quando foi elaborada no capítulo XL do *Astronomia Nova*, antes, portanto, dele obter a lei da forma elíptica, não correspondia, ou melhor, não corroborava observacionalmente uma órbita circular (o paradigma aceito por Kepler nessa época), o que o fez admitir essa hipótese como um instrumento para cálculos futuros. O erro estava, e Kepler veio a saber disso depois, no capítulo LIX, na aceitação de uma órbita circular como princípio condicionador das teorias dos movimentos planetários; segundo Kepler:<sup>138</sup>

“Retornando ao que eu estava dizendo, esse método de encontrar as equações [hipótese das superfícies] é mais rápido; ele está baseado nas causas naturais dos movimentos explicadas acima, mas também concorda precisamente com as observações na teoria do Sol ou da Terra. Todavia, ele erra em dois aspectos: primeiro, pela suposição de que a órbita do planeta é um círculo perfeito, o qual, como será demonstrado no capítulo XLIV, abaixo, não é verdade. Segundo, ele usa um plano que não mede exatamente as distâncias de todos os pontos a partir do Sol. Porém, como por milagre, cada um desses cancela exatamente o efeito do outro, como será demonstrado no capítulo LIX, abaixo.”

O método de dividir a órbita em superfícies, e relacionar essas aos tempos de percurso, demonstrou-se errôneo pelo fato de que Kepler partia de uma órbita perfeitamente

---

<sup>138</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XL, pp. 423 -424.

circular, implicando que as distâncias calculadas apresentariam erros. Quando, subsequentemente, ele substituir a órbita circular pela elíptica, a hipótese das superfícies mostrar-se-á correta. Para tanto, Kepler irá, de agora adiante, na quarta parte do *Astronomia Nova*, elaborar hipóteses acerca de qual é a verdadeira forma da órbita do planeta Marte, para a partir delas derivar os seus movimentos.

## 4. A OBTENÇÃO DA PRIMEIRA LEI DOS MOVIMENTOS PLANETÁRIOS

### 4.1. Introdução

Até o final da terceira parte do *Astronomia Nova*, pode-se dizer que Kepler tratou a determinação da órbita do planeta Marte de uma forma mista, conjugada entre a astronomia tradicional e a sua própria postura frente a essa ciência. Se por um lado Kepler traz à tona especulações de ordem física, mediante a postulação de uma força magnética e, também, a formulação da hipótese das superfícies, derivada da sua lei física, a lei das distâncias, por outro lado, ele ainda estava preso ao axioma platônico e aos procedimentos tradicionais da astronomia, utilizando artifícios geométricos; além disso, na terceira parte do *Astronomia Nova*, Kepler trabalhou com os problemas próprios de uma astronomia presa ao axioma platônico, tais como a anomalia verdadeira, mediana, etc., que, na quarta parte, com a obtenção da forma elíptica dos movimentos de Marte, serão abandonados. Em outras palavras, Kepler nesse estágio de seu trabalho ainda não tinha se libertado do axioma platônico e de seus problemas; ele ainda era um astrônomo preso à tradição.

Os avanços obtidos na terceira parte não foram, contudo, desprezíveis. Eles forneceram elementos que, operacionalizados na quarta parte, permitiram a Kepler obter a verdadeira forma da órbita do planeta Marte, substituindo todo o arsenal geométrico da astronomia tradicional pela elipsidade de tal órbita.

O problema de Kepler, quando inicia a quarta parte do *Astronomia Nova*, - e também de toda a sua obra - era o de encontrar uma forma orbital para Marte que determinasse os elementos invariantes dessa órbita, a excentricidade e a linha das apsides, de modo que, a partir desses, se pudesse construir uma representação dos movimentos de Marte que permitisse prever seus posicionamentos passados e futuros. Em outras palavras,



Kepler precisava encontrar uma curva orbital que obtivesse valores fixos para a elaboração de tabelas para os movimentos do planeta por ele estudado.

Para tanto, Kepler tinha elaborado, na terceira parte dessa obra de 1609, os seguintes elementos: 1) a hipótese vicária, que tratava a astronomia sob o ponto de vista cinemático; 2) a lei das distâncias, lei física que determinava a proporcionalidade entre distâncias e tempos de percurso do planeta; 3) a sua correlata hipótese das superfícies (a segunda lei), que conjugava as áreas percorridas aos tempos gastos para percorrê-las. Além desses elementos, Kepler contava com os dados observacionais de Brahe para o planeta Marte, servindo como elemento de teste e formulação de hipóteses astronômicas.

Com esses elementos em mãos, Kepler, por não obter uma representação satisfatória sobre a órbita de Marte, inicia, na quarta parte do *Astronomia Nova*, um processo de formulação e testes das hipóteses astronômicas acerca da forma da órbita desse planeta.

Basicamente, a lei da forma elíptica será determinada mediante um “raciocínio por exaustão”, isto é, Kepler investigou cada uma das hipóteses concernentes à forma dos movimentos planetários, confrontando cada uma aos dados de Brahe e aos resultados obtidos até a terceira parte do *Astronomia Nova*, que são, recapitulando, a hipótese vicária, a lei das distâncias e a hipótese das superfícies - é claro que apenas os dados de Brahe não sofreram críticas ou estavam sujeitos à dúvidas, sendo que as hipóteses estavam, de uma certa forma, todas sendo testadas juntamente com as hipóteses sobre a forma orbital. Assim, se a hipótese correspondesse aos dados, Kepler a aceitaria, mas se não se ajustasse, substituiria essa por outra. Desse modo, ele inicialmente considerou o axioma platônico, ou seja, admitiu como hipótese que as órbitas planetárias têm a forma circular e realizam o seu movimento de translação com uma velocidade constante; a seguir, testou essa conjectura com os dados de Brahe para o planeta Marte, notando que a circularidade e a uniformidade não se adequavam aos dados, isto é, os dados não corroboravam essa hipótese de circularidade e uniformidade, acarretando a necessidade de substituí-la por uma outra que se mostrasse condizente com os dados brahianos, o que levou Kepler a fazer uma profunda modificação no princípio de estruturação cósmica estipulada pelo axioma platônico.

Kepler partiu, então, de outra hipótese, a de que o movimento não seria circular, mas teria uma forma ovalada, e, finalmente, testou a forma elíptica, que se adequou aos dados de

Brahe. Essas duas hipóteses representaram a quebra com o axioma platônico; elas foram obtidas graças à postura dinâmica kepleriana, na qual a astronomia deve abandonar uma posição restrita a um mapeamento celeste para apresentar as razões físicas que levam o planeta a percorrer a órbita que é constatada observacionalmente. A hipótese da ovalidade nasceu da constatação kepleriana de que o percurso do planeta Marte achata-se nas longitudes medianas, fora da linha das apsides, acarretando uma variação nas velocidades - nas apsides uma velocidade menor, nas longitudes medianas, uma velocidade maior; Kepler não sabia que tipo de curva poderia ser quantificada mediante essas relações, por isso formulou a hipótese da elipsidade da órbita, que possibilitava uma expressão universal na forma de uma lei matemática, permitindo a representação da órbita de Marte de uma maneira tal que os posicionamentos constatados observacionalmente eram descritos de um modo eminentemente matemático. Nisso Kepler foi guiado principalmente pela função explicativa que a elipsidade permitia dar aos dados brahianos, pois somente a forma elíptica permite explicar o comportamento de variação entre velocidades e tempos a partir da fonte de emissão de força magnética, o Sol. Em suma, Kepler partiu da aceitação do referido axioma platônico e foi paulatinamente abandonando-o, uma vez que tal suposição era incompatível com os dados observacionais; obtendo, então, a forma elíptica.

De modo geral, o procedimento kepleriano constituiu na elaboração de hipóteses que representassem a órbita de Marte não *a priori*, mas a partir dos dados da experiência, no caso, os dados observacionais de Brahe, com o intuito de obter uma explicação mecânica dos movimentos planetários; algo que apenas uma astronomia desvinculada do axioma prévio de circularidade e uniformidade permitiria alcançar, como afirma Simon<sup>139</sup>

“....Kepler não pôde, como Newton conseguiu fazer, deduzir *a priori* dos seus princípios ‘dinâmicos’ as diferentes formas possíveis do percurso seguido pelo astro. Ele precisou proceder por indução, ensaiando diferentes modelos, para verificá-los e retificá-los com o auxílio dos dados de observação.”

Isto é, Kepler não tinha como derivar a forma da órbita de Marte a partir de seus princípios dinâmicos, justamente porque ele estava construindo a sua dinâmica; essa

---

<sup>139</sup>Simon, G., *Kepler, Astronome Astrologue*, pp. 367 - 368.

dinâmica foi construída mediante os dados observacionais, como uma tentativa de explicação mecanicista do comportamento irregular constatado observacionalmente, o que gerou uma tentativa extremamente laboriosa de constatar qual é a forma orbital de Marte, pois ela deveria satisfazer os dados observacionais e, também, adequar-se a uma explicação física razoável dos comportamentos planetários. Neste sentido, a citação de Simon acima peca, ao nosso ver, contra a postura metodológica de Kepler, por considerá-lo agindo apenas por indução. Como veremos abaixo, Kepler não foi simplesmente um indutivista, procedendo na obtenção da primeira lei dos movimentos planetários por procedimento de generalização das hipóteses a partir da experiência. Antes disso, ele elaborou hipóteses conceituais, não meramente observacionais, tais como o conceito de força, que, de uma certa forma, transformaram a sua astronomia numa construção teórica, admitindo elementos inobserváveis que produziam uma explicação mecanicista que conjugava os fenômenos celestes a uma ação causal exercida pela força magnética nos planetas.

Assim, o tratamento kepleriano para a obtenção da primeira lei foi, antes de tudo, um procedimento de teste de hipóteses.

#### **4.2. O Abandono da Hipótese Circular**

Do capítulo XLI ao capítulo XLIV, do *Astronomia Nova*, Kepler operou, podemos dizer, a sua crítica mais acirrada à hipótese circular, ou melhor, ao princípio platônico da circularidade das órbitas planetárias. A crítica contida nesses capítulos determinaram a rejeição do axioma platônico, sem, contudo, substituí-lo pela verdadeira forma das órbitas. Nessa etapa de seu tratamento astronômico, Kepler procurou testar o princípio da circularidade como se fosse apenas uma hipótese entre as várias que se poderia ter, tais como a ovalada ou a elíptica; todavia, como veremos, a força da crença na circularidade era muito forte, pois, a quebra se deu quando não havia mais possibilidade de adequação desse axioma com as hipóteses auxiliares keplerianas (hipótese vicária e lei das áreas, que nesse estágio ainda não era considerada uma lei, mas uma simples hipótese), e, principalmente,

com os dados observacionais de Brahe. Neste sentido, os capítulos XLI à XLIV procuraram demonstrar a impossibilidade da órbita circular.

Como tínhamos visto no terceiro capítulo desta dissertação, Kepler tinha, até a terceira parte do *Astronomia Nova*, elaborado a hipótese vicária, que postulava a bisseção da excentricidade, atingindo um erro de 8' de arco nos octantes; a lei das distâncias - que é o único instrumento de trabalho kepleriano admitido, por ele, como lei -, e a hipótese das superfícies (derivada da sua lei das distâncias), ou cálculo das superfícies, como a chamava Kepler, que determinava que o planeta Marte percorria áreas iguais em tempos iguais, alicerçada no princípio de que o centro dos movimentos é o corpo físico do Sol. Tanto uma quanto outra dessas hipóteses alcançavam resultados satisfatórios em vista de uma astronomia de posição, sem, entretanto, atingirem uma precisão que satisfizesse Kepler. Assim, os resultados obtidos até o início da quarta parte podem ser considerados como elementos de trabalho que, conjuntamente com os dados observacionais de Brahe, formam as bases para a ruptura com o axioma platônico.

Logo no início do capítulo XLI, Kepler nos apresenta um pequeno resumo do que foi obtido até esse momento, e, também, o que deverá ser feito de agora em diante:<sup>140</sup>

“Na segunda parte, acima, esforcei-me em encontrar, à imitação dos antigos, a partir das observações anacrônicas, o afélio e a excentricidade, e, ao mesmo tempo, as distâncias de Marte ao Sol sobre todo o circuito. E certamente as equações do excêntrico quase satisfizeram as outras posições igualmente observadas, fora de uma posição anacrônica. Na verdade, a excentricidade e as distâncias ao Sol foram rejeitadas pelas paralaxes anuais da longitude e da latitude. E assim, para que as distâncias do planeta ao Sol pudessem ser estabelecidas ao longo de todo o circuito do excêntrico, a segunda desigualdade (a do epiciclo em Ptolomeu, ou da órbita anual em Brahe e Copérnico) foi exposta na terceira parte. Melhor seria se a via do planeta fosse um círculo perfeito, pois, se assim fosse, a primeira desigualdade do planeta, que se dá em razão do excêntrico, poderia ser anulada. Pois nós iremos relacionar, mediante o capítulo XXV, acima, um método para pesquisar, a partir de três distâncias de três pontos na circunferência, desde um certo ponto no interior dessa e com os

---

<sup>140</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XLI, p. 431. Utilizamos, para essa passagem, a tradução de Jean Peyroux, p. 257.

ângulos formados com esse ponto, a posição e a grandeza do círculo em relação à esse ponto, o centro e a excentricidade com as apsides.”

Por essa passagem pode-se notar que Kepler procura determinar a órbita do planeta através de três posicionamentos do planeta Marte, tendo em vista a procura da resolução da primeira desigualdade, a da não uniformidade dos movimentos, relacionando esses posicionamentos com a hipótese da órbita circular.

Nos capítulos XLI e XLII, Kepler utiliza 3 observações de Brahe para o planeta Marte, a saber, 25 de outubro de 1595; 31 de outubro de 1590; e 31 de dezembro de 1590. A partir dessas observações, ele precisava encontrar a excentricidade da órbita, e a posição do afélio. Assim, segundo a figura 16, abaixo, temos:<sup>141</sup>

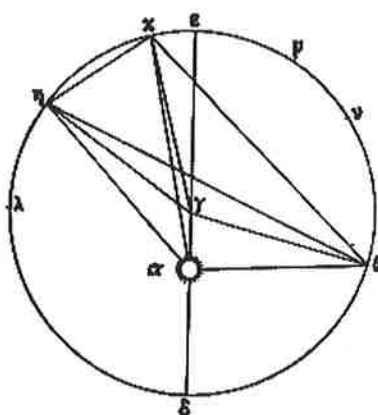


Figura 16

Sejam  $\eta$ ,  $\chi$ ,  $\theta$  as três observações de Brahe;  $\alpha$  o Sol;  $\alpha\gamma$ , a excentricidade;  $\eta\gamma$  ou  $\chi\chi$  os raios com valores de 100.000 unidades.

Desta forma, mediante um procedimento trigonométrico, Kepler calcula a excentricidade  $\alpha\gamma$  como igual a 9768; sendo que a linha das apsides se encontraria em  $27^{\circ} 86' 36''$  de leão (posição de Marte no zodíaco).

Porém, ao considerar outras 3 observações de Brahe ( $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $\nu$ ) Kepler encontrou para a excentricidade o valor de 9264, fazendo mudar a posição da linha das apsides. Esses resultados o levaram a suspeitar da circularidade da órbita.

<sup>141</sup>Retirada de Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, p. 243.

Desta maneira, os capítulos XLI e XLII têm como função mostrar que os valores calculados, mediante a hipótese vicária que dá a posição no afélio, e os conjuntos de dados de Brahe, não permitem uma coincidência na determinação do valor da excentricidade, pois há uma variação nesses valores, isto é, os dois conjuntos de observações dão resultados distintos para a excentricidade, implicando a necessidade um novo procedimento, baseado nas próprias observações, para a determinação da órbita de Marte, como nos diz Kepler no início do capítulo XLII do *Astronomia Nova*.<sup>142</sup>

“Podeis ver, leitor, que nós devemos começar por um outro caminho. Pois podeis perceber que as três posições excêntricas de Marte e o mesmo número de distâncias do Sol, quando a lei do círculo foi aplicada a elas, rejeitaram o afélio encontrado acima (com uma pequena invariabilidade). Nisso está a fonte de nossa suposição que o caminho do planeta não é um círculo. Sob essa suposição não é possível determinar as três distâncias em relação às outras. Portanto, a distância para qualquer lugar particular deve ser deduzida a partir de nossas próprias observações, especialmente aquelas no afélio e no periélio...”

Mediante esses resultados, pouco satisfatórios para determinar a excentricidade e a linha das apsides da órbita, Kepler passa a adotar um novo procedimento, utilizando-se dos cálculos efetuados através da utilização da hipótese das superfícies.

Nos capítulos XLIII e XLIV ocorre o golpe decisivo contra a hipótese da circularidade. Nesse estágio de seu trabalho, Kepler, pode-se dizer, vai além dos seus predecessores. Ele não procurou simplesmente determinar os valores da excentricidade sem uma relação dinâmica. A hipótese das superfícies, ou cálculo físico, que determina as anomalias medianas (as medidas de tempo) é relacionada à soma das distâncias do planeta ao Sol verdadeiro. Kepler não se restringiu a uma cinemática celeste, pois essa sua hipótese tem um caráter físico, dinâmico. É pelo próprio corpo do Sol que devem ser calculadas as uniformidades nos percursos orbitais do planeta.

Ao iniciar o capítulo XLIII, Kepler tinha a seguinte situação: A hipótese vicária determinava com um grau suficientemente aceitável as posições da longitude heliocêntrica; a hipótese das superfícies, que relacionava, isto é, determinava a uniformidade dos

---

<sup>142</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XLII, p. 435. Utilizamos a tradução de Jean Peyroux, p. 261.

percursos na órbita de Marte; e a hipótese da circularidade, para obter a forma da órbita de Marte. Kepler aceita todas essas hipóteses, e passa a investigar qual é a teoria acerca do movimento de Marte.

Kepler precisava encontrar em que lugar estava o erro, a não concordância, entre os cálculos, estabelecidos pelas suas hipóteses de trabalho juntamente com a hipótese da circularidade, com os dados de teste, representados pelos dados observacionais de Brahe. Assim, ou o erro estaria no conjunto dos cálculos, ou na crença na circularidade. Após sucessivas tentativas, testando os elementos dos cálculos, Kepler conclui que a discordância está na aceitação da órbita circular. O seu procedimento foi, basicamente o que se segue abaixo.

Supondo sempre a circularidade da órbita, Kepler mostra, no capítulo XLIII, que a hipótese das superfícies concorda de uma forma satisfatória com a hipótese vicária nos quadrantes de  $90^\circ$  e  $270^\circ$ , com um erro desprezível de apenas  $24''$  de arco; porém, nos octantes de  $45^\circ$  e  $135^\circ$ , alcança-se um erro de cerca de  $8'$  de arco, tanto por excesso, quanto por falta. Kepler opta pelo erro ou na hipótese das superfícies, ou na hipótese da circularidade, não acreditando que tal discrepância se encontrasse na referida hipótese vicária:<sup>143</sup>

“...Assim, como é certo que um erro tão grande não pode ser atribuído a nossa hipótese suplementar,- a hipótese vicária - foi necessário acreditar que nosso método era ainda imperfeito”.

Desse modo, a procura de onde está o erro em questão é centralizada na hipótese elaborada para condicionar os movimentos a uma explicação dinâmica, física, que nesse estágio do *Astronomia Nova* ainda não foi comprovada como uma lei, e, também, no princípio da circularidade. Kepler foi o primeiro astrônomo a colocar em dúvida tal princípio; numa astronomia meramente cinemática, a circularidade não seria questionada, e tais problemas apresentados seriam resolvidos negando-se a hipótese das superfícies como uma representação da realidade da estrutura dos movimentos planetários. Kepler vai por um caminho distinto desse. Deixa de considerar a circularidade como princípio e passa a

---

<sup>143</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XLIII, p. 447. Utilizamos a tradução de Jean Peyroux, p. 272.

considerá-la como uma hipótese, tal como sua hipótese das superfícies, procurando testar a hipótese da circularidade, em que os resultados apresentados pelos testes mostram que o erro é mais plausível de estar na circularidade do que na hipótese das superfícies, pois pelas distâncias de Marte ao Sol, as longitudes heliocêntricas mostram que a órbita se afasta do círculo, formando uma figura distinta dessa.

No capítulo XLIV, Kepler dá o golpe decisivo. Quando ele compara os resultados dos cálculos efetuados com as tabelas das posições observadas de Marte com as observações desse planeta, nota que as distâncias observadas de Marte ao Sol são menores que as distâncias calculadas, e que a forma da órbita se inclina mais para uma figura oval que para uma circular.<sup>144</sup>

“...a órbita do planeta não é um círculo, mas uma curva avançando-se pouco a pouco sobre os dois lados, para novamente caminhar em direção à largura do círculo no perigeu.. Nomeia-se oval uma figura dessa espécie”.

Em uma longa passagem do capítulo XLIV, que deve ser transcrita neste momento, pode-se notar o procedimento kepleriano para a negação da órbita circular:<sup>145</sup>

“E a mesma coisa também é verificada a partir do capítulo XLIII. Nesse, foi posto que a superfície plana do excêntrico perfeito equivaleria o mais que fosse possível a todas as distâncias das numerosas partes iguais da circunferência de seu excêntrico, desde a fonte de virtude motriz; e também que as partes da superfície plana mediriam os tempos que o planeta percorreria nas partes correspondentes da circunferência do excêntrico.”

Kepler está utilizando a hipótese das superfícies para encontrar a relação entre os tempos e as distâncias percorridas, representadas pela soma delas em áreas percorridas; admitindo-se, todavia, a órbita como circular. Continua o processo, mas colocando a hipótese de que a superfície não é um círculo perfeito:<sup>146</sup>

---

<sup>144</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XLIV, p. 453. Utilizamos a tradução de Jean Peyroux, p. 276.

<sup>145</sup>*Idem.*

<sup>146</sup>*Idem.*



“...Mas, se a superfície plana, ao redor da qual o planeta perfaz o seu caminho, não for um círculo perfeito, mas diminui sobre os lados a partir da largura que ela possui sobre a linha das apsides, e se, contudo, essa superfície plana, rodeada por uma órbita irregular, medir os tempos que o planeta realiza nas partes iguais sobre todo o circuito, segue-se, portanto, que a superfície plana diminuída medirá um tempo igual àquela superfície plana não diminuída.”

Kepler assume que o planeta não faz uma órbita circular, objetivando dar conta da relação entre as distâncias menores, quando o planeta está nas longitudes medianas, com as distâncias maiores, quando ele está no periélio e afélio. Se a órbita não é circular, mas irregular, ela pode corresponder à hipótese das superfícies; continua Kepler:<sup>147</sup>

“...Consequentemente, as partes da superfície plana menor medirão no afélio e no periélio um tempo maior...,mas as partes nas longitudes medianas medirão um tempo menor...”

Assim, quando o planeta está nas apsides, com as distâncias maiores, os tempos são maiores, quando está nas longitudes medianas, com distâncias menores que nas apsides, os tempos são menores, Disso, conclui Kepler:<sup>148</sup>

“...Portanto, se utilizarmos essa superfície plana menor para regular as equações, o planeta estará mais lento no afélio e no periélio....mais rápido nas longitudes medianas...”

Utilizando a hipótese das superfícies, ocorre a relação entre tempos e distâncias nas linhas das apsides e nas longitudes medianas: nas apsides, as distâncias são maiores, ocasionando que o planeta está mais lento; nas longitudes medianas ocorre o inverso, o planeta tem distâncias menores, implicando que ele está mais rápido.

Kepler considera que essa relação não pode ser explicada mediante a circularidade das órbitas, pois se o planeta fosse regido por uma órbita irregular, os dados alcançados, os 8' de erro nos octantes, apresentariam um afastamento da órbita em relação ao círculo.<sup>149</sup>

---

<sup>147</sup> *Idem.*

<sup>148</sup> *Idem.*

“...Com efeito, o planeta está destinado a ser mais rápido nas longitudes medianas....e que ele se retarda nas apseses..

Temos, portanto, um outro argumento para demonstrar que a órbita do planeta se afasta do círculo posto, e se encurva lateralmente em direção ao centro do excêntrico.”

Como diz Koyré<sup>150</sup>, se a trajetória do planeta fosse oval, então as distâncias dos planetas ao Sol, quando encontradas, apresentariam a relação entre elas e os tempos, e apresentariam uma diminuição na proporção apresentada (distância maior, tempo maior; distância menor, tempo menor).

Nota-se, por esse argumento de Kepler contra a circularidade, que esse astrônomo utilizou no seu raciocínio a hipótese das superfícies, que é uma hipótese física, o que representa o peso que a dinâmica kepleriana tem na obtenção da lei da forma elíptica. É justamente pela aceitação, ou postulação, de um centro físico de movimentos, que permite computar o cálculo das áreas, que se encontra a base para, subseqüentemente, derivar a elipsidade das órbitas planetárias, sendo que esse centro físico representa a fonte emissora da força que faz que os planeta percorram uma forma elíptica. Dessa maneira, quando Kepler utiliza-se de cálculo físico para equacionar tempos e áreas percorridas, notando que esse cálculo leva a uma forma irregular da órbita, ele está, se não rompendo em definitivo com a circularidade, pelo menos dando plausibilidade para um explicação de cunho físico, que será sentida mais a frente, quando ele obtiver uma explicação mais coerente para derivar a elipsidade mediante a ação da força magnética exercida pelo Sol nos planetas.

O argumento de Kepler contra a circularidade não permite saber qual é a órbita do planeta; ele conclui apenas que ela não é circular, mas oval. O tipo de “ovalidade” dessa órbita, Kepler irá investigar nos capítulos seguintes da quarta parte do *Astronomia Nova*.

---

<sup>149</sup> *Idem.* p.277.

<sup>150</sup> Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, p. 247.

### 4.3. A Hipótese da Órbita Oval

Até o capítulo XLIV do *Astronomia Nova*, Kepler esforçou-se para obter a forma da órbita do planeta Marte mantendo ainda o chamado axioma platônico de movimentos circulares e uniformes. Os resultados obtidos, longe de determinarem a esse astrônomo qual é a verdadeira forma da órbita em questão, permitiram, entretanto, colocar em dúvidas a aceitação da circularidade; mediante a constatação da não concordância entre os dados de Brahe com os posicionamentos calculados, tendo-se em vista a hipótese da circularidade, juntamente com as suas hipóteses de trabalho, a hipótese vicária e a hipótese das superfícies.

O procedimento kepleriano foi, como vimos acima<sup>151</sup>, o de colocar em xeque a crença na circularidade, negando-a como princípio central dos trabalhos em astronomia, como era feito na sua época, mas tomando-a como uma simples hipótese, que deve ser passível de ser confrontada com os dados para a sua comprovação ou rejeição.

Porém, apesar dos resultados negativos obtidos até o capítulo XLIV, o rompimento com a circularidade ainda não se tinha completado. Não era possível a Kepler rejeitar o axioma platônico simplesmente porque os cálculos efetuados mediante esse padrão teórico não concordavam com os dados de Brahe. Isso não poderia ser feito porque não estavam envolvidos apenas os dados de Brahe e a hipótese da circularidade, mas, além desses, Kepler também trabalhava com a hipótese vicária e, principalmente, com a sua hipótese das superfícies (segunda lei), derivada da sua lei das distâncias. Desta maneira, os dados rejeitavam não apenas a hipótese da circularidade, mas todo o conjunto envolvido, o que, de uma certa forma, impedia Kepler de negar conclusivamente a circularidade nesse estágio de seu trabalho. Assim, Kepler se viu obrigado a testar novas hipóteses, mas, também, testar os seus elementos de trabalho, com exceção dos dados observacionais de Brahe, pois para Kepler, os dados observacionais do astrônomo dinamarquês era o único elemento que não estava em investigação, pelo fato do alto grau de confiabilidade que eles representavam.

Os capítulos XLV até LV do *Astronomia Nova* são dedicados à elaboração e teste da hipótese da oval. Em toda essa parte da obra, Kepler procura obter a forma da órbita

---

<sup>151</sup>Seção 4.2. desta dissertação

mediante os resultados obtidos até o momento, principalmente os que determinam o afastamento da circularidade nos lados, isto é, fora das apsides, nas longitudes medianas, procurando ajustar esses resultados a uma curva que expressasse a ovalidade. A idéia de ovalidade da órbita é muito vaga, pois apenas aproxima a imaginação da forma da órbita, mas não determina nenhum elemento relevante sobre essa, vale dizer, nenhuma propriedade matemática que possa determinar genuinamente a curva.

O capítulo XLV é dedicado à exposição de uma hipótese física auxiliar que conduzirá toda a linha de raciocínio até o capítulo LV. Tal hipótese é a de que o planeta percorre movimentos irregulares ao longo de seu percurso ao redor do Sol, pela ação de uma força que o faz percorrer movimentos epicíclicos, segundo Kepler.<sup>152</sup>

“Quando fui primeiramente informado nessa matéria pelas observações muito corretas de Brahe que a órbita do planeta não é exatamente circular, mas é deficiente nos lados, julguei que eu conhecia a causa natural dessa deflexão através do caminho percorrido pelo planeta. Pois eu tinha trabalhado exaustivamente sobre esse assunto no capítulo XXXIX. E eu sugiro ao leitor que releia inteiramente esse capítulo antes de continuar esta obra. Pois nesse capítulo eu atribui a causa da excentricidade a um certo poder que está no corpo do planeta. E, portanto, seguiu-se que a causa dessa deflexão do círculo excêntrico pode ser também atribuída ao próprio corpo do planeta. Mas como diz o provérbio, ‘Um cão apressado engendra filhotes cegos’, isso aconteceu comigo. Pois no capítulo XXXIX trabalhei muito energicamente sobre a questão do porque eu não poderia dar uma causa suficiente para a órbita do planeta ser um círculo perfeito; pois alguns absurdos poderiam sempre ser atribuídos ao poder que se assenta no corpo do planeta. Agora, tendo visto a partir das observações que as órbitas planetárias não são perfeitamente circulares, eu imediatamente sucumbi ao grande ímpeto persuasivo, acreditando que as coisas que foram chamadas de absurdas, quando realizadas na fabricação do círculo no capítulo XXXIX, podem agora ser transformadas numa forma mais provável, isto é, pode-se efetuar a órbita do planeta de um modo que seja tanto correto como concordante com as observações. Se eu tivesse embarcado nessa via com um pouco mais de cautela, poderia ter imediatamente alcançado a verdade sobre o assunto. Mas visto que eu estava preso ao desejo, não prestei atenção a cada uma

---

<sup>152</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XLV, p. 455.

das partes do capítulo XXXIX, ficando preso à primeira concepção que me surgiu, concepção essa que me parecia provável, a de que há uniformidade no movimento epicíclico - e, assim, vi-me em novos labirintos....”

Por essa longa passagem do capítulo XLV, pode-se notar dois aspectos interessantes do procedimento kepleriano. O primeiro diz respeito à utilização do epiciclo para a obtenção da curva ovalada pretendida por Kepler; isso determinou que Kepler, apesar de negar a possibilidade da órbita ser circular, ou pelo menos de assim acreditar, sem muita certeza, ainda estava preso ao paradigma dos artifícios geométricos utilizados pelos astrônomos comprometidos com o axioma platônico. Em outras palavras, Kepler podia negar ou duvidar da circularidade da órbita marciana, mas isso não representa que ele estivesse completamente fora dos compromissos de uma astronomia geométrica. O afastamento completo desses artifícios só se dará quando a curva, ou órbita de Marte se apresentar como elíptica, não circular e, desse modo, sem a necessidade de artifícios para a sua descrição.

O segundo ponto, talvez mais importante, é o compromisso dinâmico de Kepler. Ele poderia simplesmente, se fosse um astrônomo meramente interessado em descrever a órbita marciana com bons resultados posicionais, ficar restrito à obtenção da curva em questão, e nesse caso o epiciclo seria utilizado apenas como um instrumento para a realização de tal objetivo; porém, o epiciclo é utilizado no intuito de explicar a variação de comportamento do planeta ao longo de seu trajeto orbital, mediante a força que estaria presente ou no corpo planetário ou no corpo central, no Sol. Nesse sentido, a utilização do epiciclo, artifício da astronomia tradicional, ganha um novo sentido no tratamento que Kepler lhe dá; a utilização de tal expediente geométrico foi, pode-se dizer, uma tentativa de obter uma explicação da força existente entre planeta e Sol, procurando determinar onde está tal força.

Esse projeto kepleriano, iniciado com a hipótese do epiciclo no capítulo XLV, só será finalizado com o abandono completo da possibilidade do planeta mover-se através de epiciclos.

Tal projeto, é iniciado por Kepler quando ele passa a investigar, mediante o esquema do capítulo XXXIX, se a órbita contém um movimento epicíclico feito pelo planeta, e, também, procura saber se a virtude, ou força, que faz o planeta assim se mover

por essa via, encontra-se no próprio corpo do planeta ou no corpo do Sol. Isso é possível de ser realizado no capítulo XLV pelo fato de que, ao redigir o capítulo XXXIX, Kepler não tinha os resultados obtidos contra a possibilidade da órbita circular, considerando absurdo aceitar que o planeta, por si só, produzisse uma órbita circular pela via epicíclica. Agora, após os resultados alcançados pelo capítulo XLIV, contrários à hipótese da circularidade, Kepler retoma essas especulações do movimento epicíclico, postulando a admissibilidade do planeta fazer por si só o movimento epicíclico.

Segundo Simon<sup>153</sup>, “os resultados do capítulo XXXIX, revelam que a órbita circular é percorrida segundo a proporção entre tempos e distâncias resultantes da rotação do astro segundo o movimento em epiciclo, contém com efeito:

1) que o centro do epiciclo é mais rápido ou mais lento, quando o planeta está mais perto ou mais longe do Sol, sendo que o centro estará sempre à mesma distância;

2) que o planeta gira ao redor desse centro, ponto fictício onde não se encontra nenhuma causa física;

3) que, além disso, a velocidade de rotação ao redor desse ponto seja proporcional a sua distância ao Sol, afim de manter o raio ND (ver figura 17, abaixo) paralelo ao eixo das apsides.”

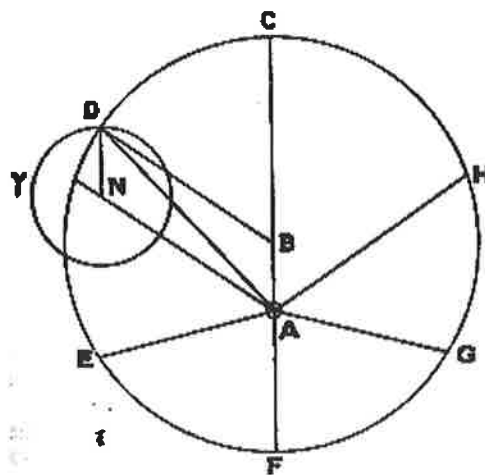


Figura 17<sup>154</sup>

<sup>153</sup>Simon, G., *Kepler, Astronome Astrologue*, p. 371.

<sup>154</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XLV, p. 457.

Segundo o procedimento geométrico de Kepler no capítulo XXXIX, retomado agora no capítulo XLV, temos os seguintes resultados:<sup>155</sup>

“Seja repetido o diagrama do capítulo XXXIX. Próximo ao final desse capítulo foi posta a opinião de que, para se poder descrever um círculo perfeito, o planeta deverá realizar um movimento sobre um epiciclo mediante as suas forças inerentes, soltando, dessa forma, seus corpos do raio de poder provindo do Sol. Como, por exemplo, se o raio de poder proveniente do Sol estando em AC, e movido adiante em um passo desigual de AC para A $\gamma$ , sendo que o planeta está inicialmente em C, e a de agora em diante, por suas próprias forças, ele estará se soltando do raio AC ou A $\gamma$ . Assim, no tempo em que AC vem para A $\gamma$ , o planeta de C ou  $\gamma$  pode vir para D, poderá também fazer isso de uma forma não-uniforme, mais veloz ou mais lento na mesma proporção como (da extensão de) AC. Pois, dessa forma, a linha ND completa o centro do epiciclo e o planeta permanecerá sempre paralelo à linha AB. Entretanto, eu disse no capítulo XXXIX que me parecia absurdo que o planeta (movendo-se) de  $\gamma$  a D em um passo não-uniforme se soltasse ele próprio do raio do poder solar, e assim, se acomodasse por suas próprias forças às forças extrínsecas do Sol, e tendo conhecimento anterior das suas velocidades e a diminuição disso. Portanto, esse absurdo deve ser evitado: seja AC mover-se não-uniformemente, mas seja o planeta mover-se uniformemente de  $\gamma$  para D. Vejamos se o que se segue é algo semelhante com o que nós provamos no capítulo precedente, mediante as observações.”

Kepler retoma os absurdos gerados no capítulo XXXIX, provindos da admissão de que a força do planeta, isoladamente, faz movimentos em epiciclos, na tentativa de se soltar da ação do corpo solar, produzindo em consequência movimentos não-uniformes. Agora, Kepler passa a tratar essa questão tendo em mãos os resultados do capítulo anterior, que determinaram a impossibilidade da órbita ser circular; continua Kepler<sup>156</sup>

“Como o centro do epiciclo N e seu afélio (movem-se) da linha AC para a linha A $\gamma$ , diminuindo [a velocidade] de C para  $\gamma$ , ele deverá estar próximo do afélio excêntrico C, o planeta (em movimento) de  $\gamma$  para D é suposto não estar

<sup>155</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XLV, p. 456. Ver também, Koyré, *La Révolution Astronomique*, p. 248.

diminuindo, mas procedendo com seu movimento mediano. Consequentemente, o ângulo  $\gamma_{ND}$  será maior que o ângulo  $\gamma_{AC}$ . Assim, ND não poderá ser paralelo à AB, mas inclinado para AC. Assim, o planeta em D não poderá permanecer sobre o círculo ao qual ele descreveu a partir de C, apenas, isto é, o que ele faz em direção a CF, mas deverá invadir da circunferência D e o paralelo ND para CA. E isso é exatamente o testemunho das distâncias AD, computadas das observações no capítulo precedente, a saber, que elas não alcançam todas os modos da circunferência do círculo CF.”

Pode-se resumir essa passagem nos seguintes passos, utilizando-se a figura 17, acima:

- 1) Admite que o planeta se move com velocidade angular igual à velocidade mediana no centro do epiciclo ao redor de A;
- 2) essa velocidade, no início do percurso (perto do afélio C), será maior que a velocidade no centro N;
- 3) Portanto, o ângulo  $\gamma_{ND}$  será maior que o ângulo  $\gamma_{AC}$ ;
- 4) Portanto, o raio ND não será paralelo à AB, mas inclinado em direção a essa linha; e o planeta aparecerá na direção do ponto D;
- 5) A situação será inversa na direção do periélio. A velocidade angular será menor que a do ponto N;
- 6) Portanto, o planeta retardar-se-á sobre N e estará mais próximo de AF, do que se ele se movesse com uma velocidade angular igual àquela desse ponto.

Kepler achou que esse mecanismo gera uma curva ovóide, em que a ação da força exercida pelo Sol faz com que o planeta se encurve nos lados da circunferência, fora das apsides, por ter distâncias menores ao centro; em contrapartida, nas apsides as distâncias são maiores. A obtenção desses resultados foi fruto da admissibilidade de que a órbita não pode ser circular, abrindo caminho, desse modo, para a investigação de uma outra forma de órbita, condizente com o que as observações informam. Pelo fato do planeta apresentar uma variação nas suas velocidades angulares, constatadas observacionalmente, gerando uma

---

<sup>156</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XLV, p. 456.



irregularidade quanto às distâncias percorridas, Kepler conclui que a órbita apresenta uma não-circularidade, tendendo mais para uma curva que se fecha fora das apsides.

Após ter obtido esses resultados, Kepler conclui que eles estão em acordo com os dados obtidos pelas observações:<sup>157</sup>

“...Isso também é corroborado pelas equações físicas, construídas através da soma das distâncias AC, DA, a saber , quando o planeta estiver mais afastado nos lados do excêntrico, as suas distâncias ao Sol serão menores.”

A partir disso, Kepler conclui que a inflexão, ou o afastamento do planeta do círculo em direção ao seu interior, e que regula as suas distâncias ao Sol é ocasionada não pelo próprio planeta, mas pelo corpo do Sol. Além disso, Kepler, nessa sua primeira tentativa de produzir a órbita de Marte com a utilização da hipótese oval, mostra que a força exercida pelo Sol faz o planeta percorrer tempos iguais em arcos iguais, conforme o grau da força que o Sol exerce, fazendo o planeta ganhar ou perder velocidade conforme ele avança ou afasta-se do Sol:<sup>158</sup>

“...Portanto, sobre a força consideravelmente persuasiva desse consenso, concluo imediatamente que a incursão do planeta para os lados resulta disso: que o poder que move o planeta e administra as suas distâncias segundo a lei do círculo procede da virtude do Sol; assim, primeiramente ele produz progressos iguais em tempos iguais, e o aproxima uniformemente do Sol segundo a lei do epiciclo; em seguida, (a virtude do Sol), por uma variação de graus no poder da força, move o planeta de uma forma não uniforme, fazendo-o mover-se mais lentamente conforme ele estiver mais afastado do Sol.”

Assim, é o Sol que faz o planeta perder ou ganhar velocidade, afastando, se não definitivamente, pelo menos de uma forma plausível, a idéia, ou hipótese, de que o próprio planeta poderia produzir uma força anímica que o levaria a mover-se fora de uma trajetória circular ao redor do Sol.

---

<sup>157</sup> *Idem.*

<sup>158</sup> *Idem*, pp. 456 - 457.

O final do capítulo XLV apresenta o resultado de não se poder representar a órbita de Marte via o movimento epicíclico produzido pelo próprio corpo planetário. A partir disso, Kepler passará, nos próximos capítulos, a procurar representar a forma orbital de Marte utilizando o epiciclo como mais um instrumental de trabalho, procurando alcançar a verdadeira forma ovalada apresentada até aqui, condicionada ao conceito de força exercida pelo Sol nos movimentos do planeta Marte.

Como diz Koyré, acerca do capítulo XLV, em especial quanto à utilização do epiciclo, Kepler tinha dificuldades em se libertar do peso da astronomia descritiva, geométrica:<sup>159</sup>

“Nada é mais significativo do que esse texto de Kepler. Nada é mais revelador do poder quase insuperável da tradição - ou da obsessão - da circularidade que retorna inesperadamente à Kepler em direção as concepções que ele próprio tinha posto sob crítica radical, ao demonstrar a impossibilidade do movimento epicíclico na ausência de órbitas sólidas, e em tentar substituir esse mecanismo, naturalmente irrealizável, pela libração do planeta sobre seu raio vetor.”

As palavras acima de Koyré expressam a postura, ou melhor, a renovação kepleriana em relação à astronomia tradicional. A impossibilidade de representar a órbita de Marte via o movimento epicíclico conduziu Kepler a substituir subseqüentemente os artifícios geométricos pelo movimento físico de libração do planeta. Com isso teremos uma substancial ruptura com o procedimento tradicional da astronomia.

Após os resultados alcançados no capítulo XLV, Kepler passa a procurar representar, sem contudo obter, a curva ovalada de Marte sob a via epicíclica, considerando-a como um instrumento de cálculo. Os resultados obtidos são, de uma certa forma, estimulantes, pois permitiram que ele argumentasse com mais certeza contra a circularidade e, principalmente, abriram as portas para a aquisição de uma nova hipótese sobre a órbita de Marte, que se mostrou profícua, a hipótese da órbita elíptica.

No capítulo XLVI, Kepler elaborou um novo procedimento para a obtenção das somas das distâncias do percurso de Marte ao longo do Sol. Esse procedimento consistiu

---

<sup>159</sup>Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, p. 250.

em transformar o movimento do epiciclo em movimento excêntrico<sup>160</sup>, segundo as próprias palavras de Kepler:<sup>161</sup>

“No capítulo precedente (XLV) foi estabelecido uma causa pela qual se pode determinar que o planeta sai de uma órbita circular. Entretanto, a descrição geométrica do caminho não pôde ser obtida utilizando-se esse modelo. Pois o epiciclo está inclinado segundo a extensão das distâncias, sendo que a multiplicidade e extensão das distâncias dependem da rotação do epiciclo. E pelo fato da soma das distâncias estar contida no plano do excêntrico, como foi demonstrado no capítulo XL, a soma não pode ser encontrada a menos que o epiciclo seja transformado em um excêntrico.”

Feita essa transformação, Kepler utiliza a hipótese das superfícies (dada no capítulo XL) para obter a soma das distâncias. Kepler realizou uma série de cálculos e procedimentos insatisfatórios, que não vem ao caso nos remetermos a eles. A seguir, Kepler passa a procurar a determinação da curva de Marte pela utilização de uma curva geométrica que será subseqüentemente a verdadeira representação do movimento desse planeta. Kepler utiliza-se pela primeira vez no *Astronomia Nova* da elipse.

A utilização da elipse nesse estágio do trabalho de Kepler nasce após uma serie de cálculos, nos quais Kepler obtém o resultado que entre o excêntrico e a órbita ovalada existe uma pequena área, chamada por ele de lúnula, que é a área compreendida pelo círculo excêntrico e o círculo tracejado na figura 18:

---

<sup>160</sup> Isso pôde ser feito pelo motivo de que no capítulo II do *Astronomia Nova*, Kepler apresentou a equivalência entre os artifícios geométricos - que já se conhecia desde a astronomia grega antiga -, possibilitando a transformação tanto de um sistema representado por movimentos excêntricos em epicíclicos, quanto o inverso.

<sup>161</sup> Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XLVI, p. 459.

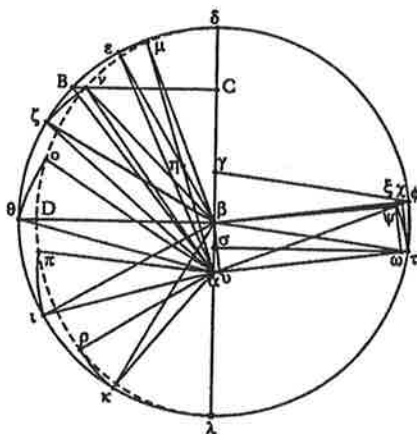


Figura 18<sup>162</sup>

Essa lúnula foi calculada obtendo um valor igual a 858 unidades quando o raio da órbita tem o valor de 100.000 unidades. Kepler notou que em direção ao afélio a figura ovalada apresenta-se mais larga, e em direção ao periélio ela se apresenta mais estreita<sup>163</sup>. O problema desse astrônomo era, agora, representar essa figura ovalada de uma forma que desse conta dessas irregularidades apresentadas entre o afélio e o periélio. Desse problema, surge a idéia da elipse.

A utilização da elipse ocorre no capítulo XLVII. Nesse capítulo, ela não tem o estatuto de representar, sob o ponto de vista realista, a forma da órbita de Marte. A elipse kepleriana nasceu na tentativa de compreensão da forma ovalada, como apontado acima. Isso se explica pelo motivo da órbita ovalada não permitir uma representação geométrica; uma órbita ovalada não apresenta elementos que possibilitem uma derivação matemática, como pode se fazer com o círculo, a elipse, a hipérbole ou a parábola. Nesse sentido, a elipse, longe de ser, nesse capítulo XLVII, a representação da órbita, adquire, todavia, o papel de mais um elemento de trabalho kepleriano.

O capítulo XLVII é dedicado ao cálculo das superfícies em relação aos tempos, isto é, Kepler utiliza a hipótese de que áreas iguais percorrem tempos iguais, na intenção de obter as distâncias corretas de Marte ao Sol, e dessa forma construir uma órbita que concorde com os dados catalogados por Brahe. O problema de Kepler, nesse capítulo

<sup>162</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XLVI, p. 460.

<sup>163</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XLVII.

XLVII, é construir, mediante a suposição da oval e da hipótese das superfícies, as distâncias de Marte ao Sol, como ele nos diz:<sup>164</sup>

“Nós nada concluiremos se, a partir das hipóteses assumidas, e das causas físicas do capítulo XLV, as quais nós seguimos como verdadeiras, não construirmos as equações corretas, não menos que as distâncias. Mas as equações são compostas das paralaxes dos pontos sobre o excêntrico e do tempo percorrido. A primeira dessas eu chamo de parte ótica da equação, e a última, de parte física”

Foi justamente para a construção dessas equações e obtenção das distâncias que Kepler se utiliza da elipse auxiliar, pois, continua Kepler mais a frente:<sup>165</sup>

“Se nossa figura fosse uma elipse perfeita, a tarefa pode ser dada por Arquimedes, que demonstrou no seu livro *Sobre as Esferas*, proposições 6, 7 e 8, que a área de uma elipse está para a área do círculo contendo um diâmetro maior comum com o da elipse, assim como o retângulo contido pelos diâmetros (ou a figura da seção) está para o quadrado sobre o diâmetro do círculo.”

Assim, a elipse utilizada é, nesse momento, não uma obtenção dos resultados de Kepler, isto é, não é a finalização do trabalho, mas um ideal utilizado por esse astrônomo para conduzi-lo a descrever a órbita ovalada por ele assumida.

Como diz Simon, a utilização da elipse auxiliar permitiu a Kepler compensar os erros que se apresentavam no excêntrico; porém, as distâncias encontradas no primeiro quadrante seriam todas muito curtas:<sup>166</sup>

“E calculando as áreas a partir da elipse auxiliar assim determinada, compensar-se-ia o erro resultante do cálculo feito a partir do excêntrico, que se pode dizer, conduziu a subestimar as distâncias e os tempos nas longitudes medianas. Tudo, portanto, permitindo a aplicação do método físico de pesquisa das equações, Tudo, salvo os resultados: as distâncias encontradas no primeiro quadrante apresentavam-se muito curtas.”

---

<sup>164</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XLVII, p. 468.

<sup>165</sup>*Idem*, p. 469.

<sup>166</sup>Simon, G., *Kepler Astronome Astrologue*, p. 373.

Isso quer dizer que o planeta se apresentava muito rápido nas longitudes medianas e muito lento nas apsides. Para Kepler, isso representou um forte motivo para colocar em dúvida a sua hipótese das superfícies.

Abalado pelo problema apresentado, que poderia fazê-lo abandonar a sua hipótese das superfícies- o que representaria abandonar uma hipótese de cunho físico, Kepler passa nos capítulos XLVIII e XLIX do *Astronomia Nova*, a tratar a questão sob o ponto de vista aritmético, isto é, passa a calcular grau por grau, no círculo excêntrico, as distâncias de Marte ao Sol, calculando a acumulação dos tempos em função dos percursos. Esse método apresentava-se tedioso, pois para se conhecer qualquer grau era necessário conhecer a anomalia mediana do grau precedente, como nos diz Kepler:<sup>167</sup>

“Era impossível estabelecer esse método independentemente de qualquer outra equação do que a primeira na anomalia mediana de 1°. Em todo o restante, nos outros 180°, sempre era preciso pressupor que a equação imediatamente precedente fosse conhecida. Qualquer leitor pode imaginar o tédio dado para se ler tal coisa. Assim, o leitor pode imaginar a minha frustração derivada, seguindo-se desse método pelos 180° de anomalia, mudando a excentricidade a cada vez.”

Desta forma, Kepler abandona tal procedimento, e inicia um tratamento que irá levá-lo a obter bons resultados para a aquisição da órbita elíptica quando reiniciar as especulações físicos-magnéticas nos capítulos LVI e LVII do *Astronomia Nova*.

Nos capítulos seguinte, (L a LV), Kepler esforça-se para alcançar seus objetivos. Esses capítulos apresentam uma série de fracassos; porém Kepler obtém alguns resultados que serão de grande importância no desenvolvimento do *Astronomia Nova*. Um dos mais relevantes foi a descoberta de que a largura da lúnula obtida com o valor de 858, mediante a elipse auxiliar apresentava-se muito larga, ela é, por isso, dividida. Kepler utiliza 22 observações diferentes e confirma o resultado de que a largura da lúnula, aplicada mediante a elipse auxiliar, deve ser de 432<sup>168</sup> - na realidade o valor é de 429, mas Kepler despreza

---

<sup>167</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. XLVIII, p. 482.

<sup>168</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. LIII.

essa pequena diferença. Com isso, ele percebe que o valor obtido é muito pequeno, quando comparados às observações de Brahe, considerando, conseqüentemente, que a utilização da órbita ovalada leva a negar a órbita circular, mas que, principalmente, ainda não obtém uma representação satisfatória para a órbita de Marte via a hipótese da ovalidade.

Assim, nos capítulos LIV e LV, Kepler considera que mediante os resultados alcançados até agora, as distâncias calculadas pela hipótese circular tornam-se muito grandes, isto é, erram por excesso, quando comparadas aos dados de Brahe; em contrapartida, as distâncias calculadas pela hipótese oval, mediante a elipse auxiliar, erram por defeito, por serem muito pequenas, como nos diz o próprio Kepler:<sup>169</sup>

“.....as equações computadas a partir das causas físicas nos capítulos XLIX e L dão o mesmo testemunho, a saber, que a lúnula cortada a partir do semicírculo perfeito pode ter apenas metade da largura daquela dada no capítulo XLV. Portanto, nada nos permite dizer que a matéria foi certamente demonstrada: que a opinião do capítulo XLV, que procura remediar os excessos do círculo perfeito, erra, agora, no sentido oposto, erra por defeito.”

Kepler conclui que a verdadeira forma da órbita de Marte está no meio caminho entre o círculo e a elipse auxiliar. Mediante esses resultados, ele passará a tratar novamente da questão das causas físicas que levam o planeta a percorrer movimentos não uniformes em relação à órbita circular; ele volta a procurar explicações físicas para os movimentos de Marte. Serão dessas procuras dinâmicas que Kepler irá abandonar todo o arsenal teórico da astronomia cinemática e passará a tratar os movimentos planetários via uma explicação que é fundamentada na ação física exercida pelo Sol nos planetas. Com isso, percebe-se o papel desempenhado pela metodologia kepleriana, alicerçado na construção de hipóteses elaboradas a partir dos dados observacionais, que objetivam descrever e explicar o comportamento observado dos planetas ao longo de seus trajetos nos céus. Por essa via, nos capítulos seguintes, Kepler construirá uma astronomia eminentemente dinâmica, retomando o conceito teórico de força magnética, responsável pela explicação do comportamento

---

<sup>169</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. LV, p. 542.

apresentado pelo planeta Marte, decomposto nos elementos estudados por Kepler até esse momento.

#### 4.4. Segunda Formulação do Conceito de Força - O Movimento de Libração

Os capítulos LVI e LVII do *Astronomia Nova* são reservados à exposição da versão final - a sua segunda formulação - do conceito de força kepleriana nessa obra; tal conceito, utilizado pela primeira vez nos capítulos XXXII a XXXIX, adquire, agora, o seu significado mais correto na determinação da órbita do planeta Marte. Na primeira formulação, como vimos, Kepler realizou um estudo acerca da natureza da força magnética exercida pelo Sol nos planetas, em analogia aos trabalhos de Gilbert sobre o magnetismo, estipulando que essa força magnética é a responsável pelo caminho irregular dos planetas em seus trajetos anuais; porém, nessa primeira etapa de sua dinâmica, Kepler não pôde dar conta do porquê o planeta perfazeria movimentos circulares ou compostos de circulares, como o movimento epicíclico, pois a utilização da força magnética não seria suficiente para explicar as “escapadas” que o planeta faria do campo de ação solar. Isto é, ao se postular causas físicas (como o conceito de força magnética), não se poderia explicar o movimento circular ou composto de movimentos circulares, pois tais movimentos não permitem uma explicação de cunho natural, mas apenas anímica; assim, Kepler não pôde dar uma explicação natural para os movimentos compostos por epiciclos. Mas, nesse estágio de seu trabalho, Kepler ainda estava preso ao axioma de movimentos circulares e uniformes, o que o levou a suspender momentaneamente as suas especulações dinâmicas para tratar das questões calculatórias. Como resultado, Kepler obteve a sua hipótese das superfícies e a crítica radical à circularidade, obtendo elementos que o levaram a considerar a órbita como uma espécie de oval, o que lhes permitiram voltar a tratar da sua dinâmica, nessa segunda formulação de força na quarta parte do *Astronomia Nova*.

A utilização desse conceito nesta quarta parte da obra está vinculado à tentativa de determinação da órbita de Marte mediante uma explicação física, em substituição ao artifício tradicional do epiciclo. Nos capítulos precedentes (XLV - LV), Kepler investigou a



hipótese ovalada, obtendo resultados pouco satisfatórios para a determinação das distâncias de Marte ao Sol. Essa tentativa estava alicerçada, como vimos, na utilização do movimento epicíclico do planeta. Após os resultados negativos obtidos por essa tentativa, Kepler volta para a sua idéia original da força magnética exercida pelo Sol sobre os planetas, tratando o epiciclo como um instrumento de cálculo, supondo que o planeta percorre um movimento de libração no diâmetro do epiciclo, que é, sem o epiciclo, a variação das distâncias ao longo do raio vetor que une o planeta ao Sol, sendo que a explicação física é dada, agora, pela oscilação do raio vetor, ocasionada pelo aumento ou diminuição da ação do Sol sobre o planeta.

Kepler elaborou e redigiu esses capítulos provavelmente em 1605<sup>170</sup>, posterior à elaboração original do conceito de força estipulado no capítulo XXXIX. Neste capítulo, relembremos, Kepler atribuiu ao próprio planeta, mediante a ação de uma inteligência não natural, a capacidade de aproximar-se e afastar-se do Sol; porém, isso não poderia ocorrer mediante um círculo excêntrico comum e nem pela ação de um movimento epicíclico, isto é, o planeta não poderia, por si mesmo, realizar um movimento não uniforme em seu percurso epicíclico. Kepler atribuiu, ou começou a atribuir, esse problema à suposição de circularidade. Mas nesse capítulo XXXIX, os dados que ele tinha em mãos eram insuficientes para negar a circularidade e, também, negar a ação do próprio planeta. Agora, ao iniciar o capítulo LVI, Kepler tem resultados que lhe permitem negar a hipótese da circularidade e alicerçar a sua explicação dinâmica.

No capítulo LVI, Kepler investiga qual é a causa que leva o planeta a percorrer em sua trajetória uma órbita que se afasta do círculo excêntrico, formando uma lúnula de largura de 000429, afastando-se, desse modo, da circularidade. Durante essa investigação Kepler “cai por sorte”, como ele mesmo diz, na secante do ângulo de 5° 18', que representa a medida da equação ótica máxima, observando, para seu espanto, que ela é igual a 100.429, segundo Kepler:<sup>171</sup>

“Estava eu ansiosamente voltando meus pensamentos sobre as reflexões do capítulo XLV, notando que eu nada ganhara, e, assim, meu triunfo sobre Marte

<sup>170</sup>Segundo Koyré, Aiton e Simon.

<sup>171</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. LVI, pp. 543-44.

seria fútil, quando, por sorte, caí sobre a secante do ângulo  $5^{\circ} 18'$ , a qual é a medida da equação ótica máxima. E quando notei que ela é 100.429, foi como acordar de um sono para novas luzes, e assim comecei a raciocinar da seguinte forma: Nas longitudes medianas a lúnula é mais larga, e tem a mesma magnitude que o excesso da secante da equação ótica máxima 100.429, sobre o raio de 100.000. Portanto, se o raio for substituído pela secante da longitude mediana, isso acompanhará o que é sugerido pelas observações. E, no diagrama do capítulo XL, concluí que se se usar HR no lugar de HA, VR no lugar de VA, e substituir EB por EA, e, assim, para todas as outras, o efeito sobre todas as posições excêntricas será o mesmo que tinha sido dado aqui para as longitudes medianas. E, por equivalência, no pequeno diagrama do capítulo XXXIX,  $\alpha\kappa$  deve ser tomado no lugar das linhas  $\alpha\delta$  ou  $\alpha\iota$ , e  $\alpha\mu$  no lugar de  $\alpha\varepsilon$  ou  $\alpha\lambda$ .”

“E, assim, o leitor pode ler novamente o capítulo XXXIX. Ele encontrará que o que as observações testificam aqui já tinha sido dado ali, a partir de causas naturais, a saber, que parece razoável que o planeta perfaz algum tipo de reciprocção[oscilação], como se movesse sobre o diâmetro do epícciclo, que está sempre dirigido para o Sol”.

O raciocínio de Kepler pode ser dado em dois momentos. O primeiro é a apresentação matemática das relações para a obtenção das distâncias de Marte ao Sol. Para isso ele substitui no diagrama do capítulo XL, repetido abaixo, EB por EA e HR por HA. Ora, EA é igual a EB, secante de BEA, ou,  $EB = EA/\text{secante } \varphi = EA \cdot \text{coseno } \varphi$ . Quanto à HR, ela é igual à  $HB + AB \cos. RBA$ . Porém, EB e HB são os raios do círculo excêntrico, AB é a excentricidade, e o ângulo RBA é igual ao ângulo HBC, que é a anomalia excêntrica. Tomando o raio do círculo excêntrico como igual a 1 e designando a excentricidade por e, obteremos para a extensão do raio vetor:  $RV = 1 + e \cos\beta$ . No caso de EB, que dizer, quando a anomalia excêntrica  $\beta$  é igual a  $90^{\circ}$ , e  $\cos \beta = 0$  e  $RV = 1$ <sup>172</sup>, conforme a figura 19, abaixo.

---

<sup>172</sup>Esse parágrafo correspondente à formulação matemática segue a exposição de Koyré, *La Révolution Astronomique*, pp. 255-56.

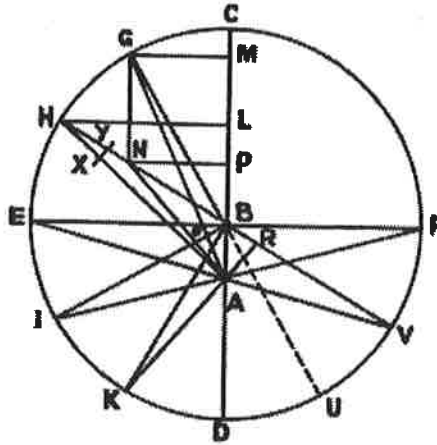


Figura 19<sup>173</sup>

O segundo ponto é a retomada da explicação dinâmica iniciada nos capítulos XXXII a XXXIX. Quando Kepler iniciou sua especulação sobre as causas físicas dos movimentos dos planetas, ele estava preso ao princípio da circularidade. Agora, a discussão centraliza-se sobre o abandono do movimento epicíclico, substituindo-o pelo movimento de libração (oscilação) que sofre o planeta ao longo de seu trajeto. Kepler considera que o planeta sofre uma alteração nas suas distâncias diametrais (diminuição e aumento do raio vetor que une o planeta ao Sol), que representa as alterações sofridas nos movimentos epicíclicos.

Nessa etapa do *Astronomia Nova*, Kepler começa a abandonar por completo os artifícios da astronomia tradicional. O epiciclo ainda será utilizado como instrumento de trabalho. O movimento de libração permitirá a Kepler, no capítulo LVII, investigar a natureza desse movimento, substituindo a idéia de que o planeta pode, por si só, realizar as inconstâncias de um movimento circular, ou, realizar um movimento não circular.

O capítulo LVII é, sem dúvida, o mais extenso e um dos mais difíceis do *Astronomia Nova*. Nesse capítulo está contida a versão final da dinâmica kepleriana nessa obra. Após todos os esforços de Kepler - desde o capítulo XXXIX, onde se mostrou a impossibilidade de uma órbita utilizando excêntricos e epiciclos, conjuntamente com a hipótese da circularidade, representar de uma forma natural, física, as variações das distâncias nos movimentos dos planetas, até o capítulo LVII, onde se assume uma causa eminentemente natural para a explicação da oscilação nos raios vetores - esse astrônomo

chega, mesmo que imperfeitamente, a uma tentativa de explicação que rompe com tudo o que foi produzido, a grosso modo, desde Ptolomeu até Brahe. Em outras palavras, é justamente com as especulações magnéticas do capítulo LVII, que a astronomia, pode-se dizer, une-se à física.

Kepler retoma no capítulo LVII a discussão sobre o que é que leva o planeta a oscilar no seu trajeto em torno do Sol. Como diz Koyré, essa discussão é de capital importância para a astronomia; ela representa muito mais do que encontrar uma equação correta para a descrição dos movimentos, pois nela está contida a questão da substituição da forma circular pela oval, possibilitando a Kepler tratar de fato a astronomia como uma ciência física, segundo Koyré:<sup>174</sup>

“Assim, a substituição da órbita circular pela órbita oval, em última análise, é algo mais importante que a substituição de uma trajetória ou de uma ‘equação’ por outra: com efeito, com a órbita circular - quer seja com o auxílio de um movimento epicíclico, quer seja com o auxílio de um movimento de oscilação - seria impossível de se realizar por meio de forças puramente naturais, implicando, necessariamente, a ação de uma alma ou inteligência planetária; a órbita oval, que resulta da oscilação, conforme a lei do seno, do planeta sobre o seu raio vetor, oferece-nos a possibilidade, que veremos realizar-se, de dar uma explicação natural. Ora, é isso que Kepler sempre procurou: uma explicação física dos movimentos planetários, isto é, uma explicação que faz apelo às forças naturais ...à exclusão ...da ação de fatores espirituais.”

Desse modo, nota-se que a substituição da circularidade pela oval permitiu a Kepler elaborar uma explicação de cunho eminentemente natural ou físico. A oscilação descoberta por ele nos raios vetores do planeta não poderia ser explicada de uma forma física, se se aceita a hipótese da circularidade; foi necessário a aceitação da ovalidade para possibilitar a elaboração da teoria da força magnética do capítulo LVII.

Essa é uma questão importante dentro da discussão da elaboração das duas primeiras leis de Kepler. Em uma astronomia restrita a uma cinemática, não entraria em discussão o caráter físico dos movimentos; desta forma, Kepler poderia utilizar a circularidade como um referencial, obtendo, pela aplicação dos artifícios do epiciclo e deferente, a forma

---

<sup>173</sup> Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. LVI, p. 544.

elíptica. Isto é, se abandonarmos a explicação física, os movimentos de oscilação poderiam ser dados mediante a hipótese da circularidade, admitindo-se uma inteligência não natural conduzindo os planetas a se moverem em epiciclos ou excêntricos, e os resultados geométricos, tais como a forma elíptica ou a lei das áreas poderiam ser alcançados<sup>175</sup>. Porém, Kepler não agiu dessa maneira. A sua crença de que o cosmo é ordenado de uma forma harmoniosa é estendida não apenas a um modelo, mas principalmente à procura da sua verdadeira descrição e explicação. É justamente, portanto, na tentativa de uma explicação física que se encontra o principal elemento para a ruptura definitiva com a hipótese da circularidade, do axioma platônico. Em outras palavras, a explicação física, dinâmica, de Kepler, ao considerar a relação entre a ação magnética do Sol nos planetas, conjugada com a inércia própria do planeta a se manter em repouso, é, pode-se afirmar, uma explicação de cunho mecanicista, obtida graças à formulação de hipóteses com respaldo no mundo físico, em que essas hipóteses não tratam das causas últimas desses movimentos, apenas descrevem e explicam pelos dados que a astronomia pode obter o comportamento dos planetas numa trajetória que não se apresenta aos observadores como circulares e uniformes, podendo-se determinar uma representação matemática a tal descrição. Com isso, Kepler rompe com a explicação animística, baseada numa visão de cunho “psicológico”, em que as suas premissas não são aptas de investigação pelos dados empíricos.

Voltando ao conteúdo do capítulo LVII, nesse são dadas, basicamente, as condições para a explicação do movimento de oscilação do raio vetor que une o planeta ao Sol. Para Kepler, o Sol comporta-se como um grande magneto, mais especificamente um imã, girando sobre o seu próprio eixo, contendo duas espécies de forças naturais: uma atrativa e outra repulsiva.

Kepler retoma as discussões dos capítulos XXXVIII e XXXIX, criticando a analogia feitas naquele momento, a saber, a comparação dos movimentos planetários semelhante à ação de que sofreria um barco num raio mediante a ocorrência de um turbilhão, isto é, os

---

<sup>174</sup>Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, p. 258.

<sup>175</sup>De fato, pela utilização de epiciclos, deferentes, equantes, etc., podia-se construir qualquer forma para os movimentos planetários, inclusive a elipse. Ver capítulo 1 desta dissertação, seção 1.3, e ver, também, Hanson, *Conjecturas e Constelações*.

planetas são arrastados nos seus percursos, como se fosse um espaço contínuo, como o é a ação sofrida por um barco num rio, como mostra a figura 20:<sup>176</sup>

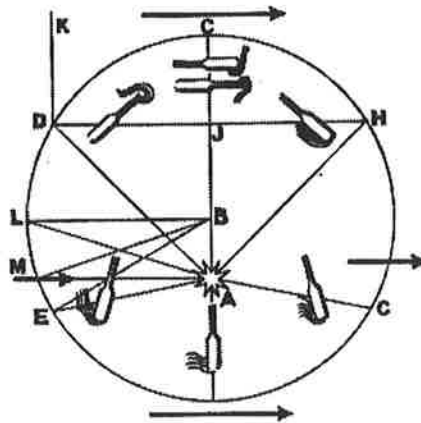


Figura 20

Assim os planetas se afastariam ou se aproximariam do Sol através do espaço por um movimento contínuo, mas Kepler não se satisfaz com tal analogia, pois segundo o autor do *Astronomia Nova*:<sup>177</sup>

“O exemplo mostra apenas a possibilidade do argumento. Em si mesmo ele é inadequado, visto que a rotação do remo e do rio são executadas não no mesmo tempo, mas num tempo duplo. Além disso, as coisas sendo examinadas da Terra, mostram que as faces dos planetas apresentam modificações, como a face da Lua, embora ela participa como os planetas nos movimentos os quais estamos discutindo, não fazendo mudança no curso de um mês.”

Isto é, os planetas, assim como a Lua, deveriam mostrar duas faces, pois são movimentadas da mesma forma que a Lua; mas como essa última não se comporta dessa maneira, Kepler rejeita o exemplo.

Rejeitando essa analogia material, Kepler passa a dar um exemplo retirado de uma entidade imaterial, ou inobservável, o magnetismo de Gilbert, já exposto anteriormente - no capítulo XXXIV -segundo Kepler:<sup>178</sup>

<sup>176</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. LVII, p. 549.

<sup>177</sup>*Idem*, p. 550.

“Mas a partir dessas refutações damos um outro exemplo, o qual nos parece mais adequado. O rio e o remo são de mesma qualidade. O rio é uma espécie imaterial do poder magnético do Sol. Assim, por que nós não emprestamos ao remo alguma coisa do magneto? Todos os corpos planetários são enormes magnetos redondos? Da Terra (um dos planetas, para Copérnico) não há dúvidas [que é um magneto]. William Gilbert provou isso.”

Kepler pega de empréstimo a concepção de Gilbert, expressa na obra de 1600, *De Magneto*, a postulação da Terra como um grande magneto. Gilbert concebeu a Terra como um macromagneto, fazendo uma analogia com os imãs globulares, chamados por ele de Terrelas. Segundo Gilbert, a atração não se encontraria no centro do globo, mas nos pólos; assim, quanto mais perto dos equinócios equatoriais, mais força de atração sofreria um outro corpo também magnetizado, pois estão em ângulos retos entre si, conforme vão afastando-se dos pólos, os ângulos ficam oblíquos, diminuindo a intensidade; segundo Gilbert:<sup>179</sup>

“A união de corpos que estão separados um do outro, e que são naturalmente parecidos, atraem-se por um outro grupo de movimentos, se eles forem livres para se moverem. A terrela envia suas forças para fora em todas as direções, segundo as suas energias e qualidades. Mas se o ferro ou outro corpo magnético de tamanho sutil cair sob suas esferas de influências, eles serão atraídos; todavia, próximo a isso está o imã com a maior força com a qual ele nasceu. Tais corpos tendem para o imã, e não para o centro e nem para os seus centros: eles apenas fazem como seus pólos, isto é, quando aquilo que é atraído e o imã estão em ângulos retos. Mas nos intervalos entre eles estão linhas oblíquas, como visto na figura abaixo, sendo que ela mostra como a força faz para associar corpos com as esferas. Nos pólos as linhas estão em ângulos retos. Próximos das partes do círculo equinocial, a maior obliquidade dos corpos magnéticos atrai, mas as partes mais próximas aos pólos atraem mais diretamente; nos próprios pólos a atração está em linhas retas. Todo imã semelhante, seja esférico ou oblongo, tem o mesmo modo de revolver para os pólos do mundo; mas foi feito apenas

---

<sup>178</sup> *Idem.*

<sup>179</sup> Gilbert, W., *De Magnete*, Livro II, cap. VI, pp. 121 - 122.

experimentos com oblongos.....Assim, o imã e a Terra estão em conformidade com os movimentos magnéticos.”

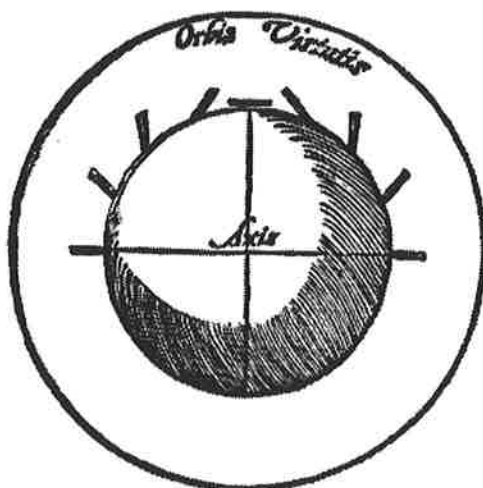


Figura 21

A concepção de Gilbert, mediante a passagem acima, é alicerçada na ação semelhante existente entre a terrela, imã globular, e a Terra, que é um grande imã globular, sendo que a força é exercida nos pólos, diminuindo a ação conforme se sai da parte equatorial. Gilbert também considerou que o eixo da Terra não sofre variações, o que implicaria que a ação da Terra sobre a Lua, por exemplo, sempre manteria uma relação paralela entre os eixos da Terra e da Lua.

Kepler utilizará essa concepção para a ação do Sol nos planetas; assim, o Sol representaria, em relação a Gilbert, a Terra, e os planetas afastar-se-iam ou aproximar-se-iam conforme os ângulos e as distâncias desses ao Sol variassem. Para Kepler, os corpos planetários contêm dois pólos, sendo que um deles visa o Sol, enquanto que o outro escapa do Sol; desta forma, Kepler pretendia explicar a variação de velocidades, e conseqüentemente, a modificação da força magnética exercida pelo Sol nos planetas, segundo ele:<sup>180</sup>

“Mas vamos descrever esse poder de uma maneira mais evidente: os globos planetários são dotados de dois pólos, um dos quais visa o Sol, e o outro foge do



Sol. Assim, imaginemos um eixo dessa espécie, usando uma faixa magnética, e sejam esses pontos procurando o Sol. Mas apesar dessa procura do Sol pela natureza magnética, eles sempre permanecem paralelos entre si no movimento translacional do globo, exceto para a extensão que sobre um longo período transfere a direção polar de uma das estrelas fixas para outra, causando o progressivo movimento do afélio.”

Assim, os planetas manteriam um eixo invariável, com direção constante, sendo considerados como imãs magnetizados, e seriam atraídos para o Sol conforme o seu polo atrativo estivesse sob a ação da força solar, afastando-se conforme o seu polo repulsivo fugisse da ação solar, conforme a figura 22, abaixo:<sup>181</sup>

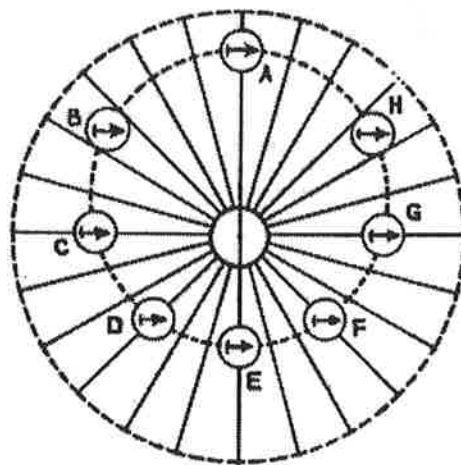


Figura 22

Na figura, nota-se o eixo invariável do planeta, movimentando-se numa órbita elíptica em torno do Sol que está em um dos focos dessa elipse, apresentando um afastamento conforme a ação do Sol se enfraquece, e uma aproximação conforme a ação do Sol aumenta.

<sup>180</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. LVII, p. 550.

<sup>181</sup>Kepler, J., *Epitome of Copernican Astronomy*, Livro IV, Parte III, cap. 3, p. 939. Essa figura não aparece no *Astronomia Nova*, pois Kepler desenvolveu a teoria das forças magnéticas subseqüentemente a essa obra; o que implica que a concepção do *Astronomia Nova* está, pode-se dizer, apenas esboçada. Porém, apresentamos essa figura para ilustrar o procedimento em linhas gerais.

Kepler argumenta, em seguida, que esse mecanismo, apesar de poder ser dado por uma interpretação anímica, não pode, contudo ser aceito nesses termos, pois é necessário uma explicação de cunho natural - pois o afastamento e a aproximação dão-se pela ação magnética do Sol nos planetas, que é evidentemente retirado da ação observada dos movimentos. Sendo assim, Kepler considera que essa explicação magnética permite entender o comportamento dos planetas por uma ação de cunho dinâmico, mecanicista, pode-se dizer, não fazendo apelo à entidades anímicas para tal explicação.

Essa teoria será desenvolvida, de uma forma mais elaborada, no *Epitome*, obra de 1621, em que Kepler apresenta uma teoria que explica o comportamento dos planetas nos seus movimentos de libração, justificando a utilização das suas duas primeiras leis dos movimentos planetários como adequadas a esse movimento.

A segunda formulação do conceito de força permitirá a Kepler, no capítulo seguinte (LVIII) derivar a forma elíptica como a verdadeira forma da órbita de Marte, pois é apenas com essa órbita que se pode explicar e descrever o comportamento de libração do raio vetor que une o planeta ao Sol.

#### **4.5. A Obtenção da Primeira Lei**

Após Kepler ter tratado da sua teoria da libração, da oscilação do diâmetro do epiciclo fictício, e ter determinado as explicações da sua dinâmica, passa à última etapa da obtenção das suas duas primeiras leis astronômicas. Nos capítulos LVIII, LIX e LX do *Astronomia Nova*, Kepler obtém a sua primeira lei e também a aplicação e estipulação da segunda lei.

Recapitulando os elementos obtidos por Kepler até o início do capítulo LVIII, temos os seguintes resultados:

O objetivo central de Kepler era o de encontrar a verdadeira forma da órbita do planeta Marte, forma essa que devia: 1) concordar com as observações detalhadas dos posicionamentos desse planeta, catalogadas por T. Brahe; 2) a forma da órbita devia representar corretamente as distâncias desse planeta ao centro físico de seus movimentos, o Sol; 3) encontrar a anomalia verdadeira, que permitiria determinar a uniformidade do

percurso planetário em relação não à anomalia mediana, estipulada sobre a aceitação de um ponto fictício, mas sobre um ponto físico, isto é, sobre o Sol (lembrando que a hipótese das superfícies relacionava os tempos, dados pela anomalia mediana, em relação às áreas, através do centro físico, o Sol; porém, Kepler não sabia, ainda, que a curva é uma elipse, curva essa que eliminará a necessidade de obtenção das anomalias verdadeira e mediana).

O primeiro objetivo, pode-se dizer, é um critério de teste para as hipóteses elaboradas para a obtenção da órbita de Marte. O segundo e terceiro critérios representariam a obtenção da órbita não apenas sob o ponto de vista cinemático, mas dinâmico.

Para realizar tais objetivos, Kepler obteve os seguintes resultados:

1º) a hipótese vicária, que obtinha bons resultados para as distâncias longitudinais do planeta, mas que trabalhava com o equante ptolomaico, isto é, com a utilização de um centro de referências matemático, e não físico;

2º) a lei das distâncias, que determinava a proporcionalidade entre velocidades e distâncias, sendo que as distâncias estavam determinadas com relação ao centro físico, o Sol;

3º) a hipótese das superfícies, a segunda lei kepleriana, que determinava que áreas iguais são percorridas em tempos iguais. Essa lei, chamada de hipótese por Kepler até o capítulo LIX, obtinha a proporcionalidade entre áreas e tempos. Kepler a utilizou como hipótese de trabalho;

4º) a obtenção da impossibilidade da circularidade da órbita, pelos resultados obtidos no capítulo XLIV, em que os resultados alcançados pela suposição de uma órbita circular não correspondiam aos dados observacionais de Brahe;

5º) a elaboração da hipótese da ovalidade da órbita de Marte, que permitiu a Kepler encontrar a lúnula existente entre o círculo excêntrico e a oval, isto é, o valor da “fuga” do planeta em relação a uma órbita circular;

6º) a estipulação da elipse auxiliar, que serviu como elemento de trabalho quando Kepler não sabia qual era a verdadeira forma da órbita de Marte, isto é, quando ele investigava a forma ovalada. Essa elipse auxiliar, junto com a hipótese da oval determinou

dados significativos para o valor da lúnula, mas com erros no que concerne à corroboração dessa com os dados de Brahe.

Além desses elementos, deve-se ressaltar, como foi dito acima, que Kepler poderia ter obtido a forma elíptica, de uma maneira mais simples e rápida, se considerasse o seu trabalho restrito a uma cinemática celeste. Porém, o seu objetivo principal era de determinar a forma da órbita de Marte tendo em vista obter uma explicação ou descrição dinâmica. Em outras palavras, o trabalho de Kepler em astronomia era duplo; por um lado, precisava encontrar uma órbita que representasse os posicionamentos e determinasse as distâncias desse planeta em concordância com as observações, por outro lado, essa órbita devia ser a representação dos verdadeiros movimentos do planeta, e para tanto, Kepler precisava explicar o fato do planeta “sair” da circularidade e percorrer movimentos aparentemente irregulares no céu. Kepler “complicou” a sua astronomia ao objetivar determinar a causa física dos movimentos dos planetas. Porém, essa “complicação” foi o que permitiu à astronomia sair dos artifícios realmente complicados da tradição, permitindo a substituição de todos esses artifícios por apenas duas leis.

Assim, Kepler tinha que obter os objetivos centrais sob o ponto de vista de uma explicação dinâmica. Desse modo, o 7º elemento kepleriano, o conceito de força, representado pela oscilação dos raios vetores do planeta, é, pode-se afirmar, o elemento principal que o conduziu à estipulação das suas duas primeiras leis dos movimentos planetários nos capítulos finais da quarta parte do *Astronomia Nova*.

Voltando ao *Astronomia Nova*, o capítulo LVIII inicia o ataque final a Marte. O objetivo central de Kepler, substituir a hipótese vicária por uma representação matemática que determina as distâncias e as equações (anomalia verdadeira), será alcançado nesse capítulo:<sup>182</sup>

“Pensando sobre toda essa obra, o meu objetivo foi o de encontrar uma hipótese física que não apenas produziria as distâncias em concordâncias com as observações, mas, também, ao mesmo tempo, encontrasse as equações, as quais tinham sido dadas anteriormente pela hipótese vicária do capítulo XVI. Assim,

---

<sup>182</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, Cap. LVIII, p. 573.

fazendo uso de um falso método para essa hipótese, a qual é correta, começo, agora, novamente a refazer todo esse empreendimento.”

Kepler passará agora a substituir a hipótese vicária, que dá bons resultados para uma astronomia restrita à cinemática, por uma explicação física dos movimentos, obtendo resultados posicionais satisfatórios e, além disso, que representam os verdadeiros acontecimentos celestes.

Nos capítulos LVI e LVII, Kepler postulou que os planetas perfazem um movimento de oscilação no diâmetro do epícciclo fictício, isto é, um movimento de oscilação no raio vetor que une o planeta ao Sol; sendo que essa oscilação é causada pela ação de uma força magnética exercida pelo Sol nos planetas, fazendo que esses variem as suas distâncias ao Sol, de acordo com a relação entre os tempos de percurso. O problema agora é saber que curva pode gerar uma tal relação. O raciocínio de Kepler foi basicamente o seguinte: utilizando a hipótese circular, os resultados obtidos erraram por excesso; com a elipse auxiliar os resultados erraram por defeito. Ora, pensou Kepler, entre um círculo e uma elipse só pode existir outra elipse. Assim, é uma elipse que gera o caminho do planeta, fazendo com que o planeta “fuja” do círculo em 429 partes, que é a largura da lúnula, segundo Kepler:<sup>183</sup>

“Minha linha de raciocínio foi como a apresentada nos capítulos XLIX, L e LIV. O círculo do capítulo XLIII erra em excesso, sendo que a elipse do capítulo XLV erra por defeito. E o excesso do primeiro e o defeito da segunda são iguais. Mas a única figura ocupando o meio entre um círculo e uma elipse é outra elipse. Portanto, a elipse é o caminho do planeta, e a lúnula cortado do semicírculo tem metade da largura ...a saber, 429.”

Antes de passarmos para o desenvolvimento dessa questão, como está exposta no *Astronomia Nova*, vamos apresentar alguns trechos de uma carta de Kepler a seu amigo e astrônomo Fabrício, que antecede os desenvolvimentos futuros da obra de 1609, diz Kepler nessa carta:<sup>184</sup>

---

<sup>183</sup> *Idem*, p. 575.

<sup>184</sup> Carta de Kepler a Fabrício, de 11 de outubro de 1605. Retirada de Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, pp. 261 - 262.

“Vou agora dizer-vos os progressos que tenho feito sobre o meu planeta Marte. Como eu vi que, na admissão de um trajetória perfeitamente circular, as distâncias (de Marte ao Sol) são muito grandes, e nessa mesma medida onde, para a minha elipse (auxiliar), que difere muito pouco da oval, elas são muito pequenas, eu tirei, muito justamente, a seguinte conclusão: o círculo e a elipse são figuras geométricas do mesmo gênero; elas pecam igualmente, mas em sentidos contrários, contra a verdade; conseqüentemente, a verdade se encontra no meio. Ora, entre duas figuras elípticas não se pode encontrar nada além de uma outra elipse.”

“Isso porque a trajetória de Marte é uma elipse, na qual a lúnula pela qual ela difere em relação ao círculo tem a metade da largura da elipse precedente (auxiliar). A largura dessa lúnula é igual a 858/100000; assim, deverá ela ter agora 429. E são por essas frações que as distâncias, calculadas mediante uma trajetória perfeitamente circular, devem ser reconhecidas nas longitudes medianas. Está é a verdade. Vós, entretanto, comentais que eu deveria me livrar dessas alucinações e procurar uma nova fonte. ...Porém, eu me rendo à verdade descoberta. Minha antiga elipse, como o recolhimento de 0,00858 tem uma causa natural...Mas se a elipse tem um recolhimento de 429, ela erra com toda a causa natural.”

O raciocínio de Kepler é de que os resultados obtidos com a elipse auxiliar não apresentam causas naturais, sendo que o valor obtido de 858 tem um respaldo natural, mediante o conceito de força, como ele desenvolverá mais adiante.

Voltando ao conteúdo da carta, Koyré apresenta o raciocínio geométrico de Kepler que será aplicado no *Astronomia Nova*, concernente à utilização da curva elíptica, retirando o uso do artifício do epiciclo, segundo Koyré<sup>185</sup>, conforme a figura 23, abaixo, Kepler retirou o seguinte:

---

<sup>185</sup>Koyré, A. *La Révolution Astronomique*, pp. 262 - 263.

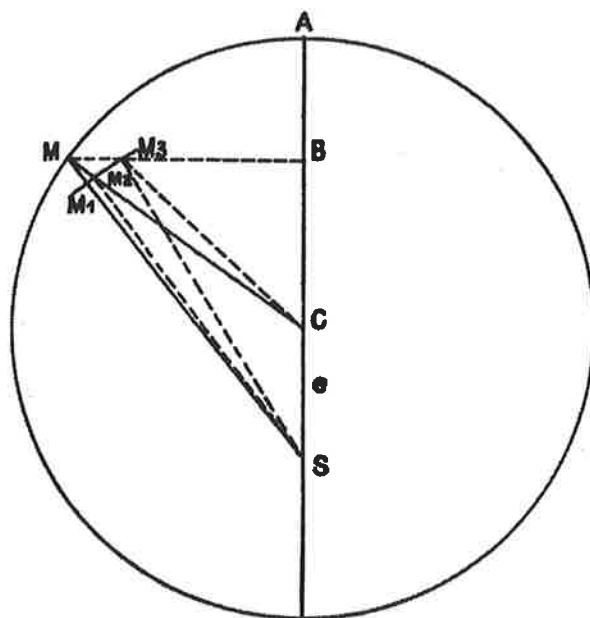


Figura 23

“Para determinar a posição de Marte em relação ao Sol, Kepler começa traçando a linha das apsides e o círculo excêntrico que Marte teria percorrido se sua órbita fosse circular (mas que de fato ele não percorre); nesse caso, Marte, encontrando-se num momento dado no ponto M, estaria à distância MS do Sol. Ora, nós sabemos que isso não é o caso, e que essas distâncias devem ser encurtadas e diminuídas pelo valor da oscilação efetuada pelo planeta sobre o diâmetro de seu epiciclo (fictício),.... Ele estará, portanto, na distância SM1 (e não na distância SM), do Sol. Ora, entretanto, onde se encontra Marte? Kepler estima que ele deve demorar-se sobre o raio do círculo excêntrico (CM), portanto, no ponto M2, de modo que  $SM1 = SM2$ .

“As observações não confirmaram seu raciocínio, Marte se encontraria no ponto M3, à direita da posição calculada....- não se tem nenhuma razão para afirmar que o planeta se encontraria sobre o raio (fictício) do círculo excêntrico que ele não percorre.”

Em outras palavras, o planeta não percorreria um trajeto tendo como centro o ponto C, do círculo excêntrico, pois não faz movimentos sob o epiciclo, que é fictício, mas sob

um ponto físico, que é o centro S, do sistema de movimentos, o Sol. Kepler, portanto, mostra que as oscilações são dadas mediante o Sol, corroborada essa idéia pelas observações, que apresentam o planeta localizando-se no ponto M3, e não em M2, representando um movimento elíptico e não, circular.

Porém, faltava relacionar essa curva elíptica com a libração do planeta. Kepler percebeu que, como nos diz Aiton<sup>186</sup>, a órbita elíptica pode ser produzida pela teoria da libração se o planeta não for localizado sobre o raio do excêntrico, como foi mostrado acima, mas sobre a perpendicular a partir da posição sobre o excêntrico na linha das apsides, como afirma o próprio Kepler:<sup>187</sup>

“...Eu pensava que a oscilação sobre o diâmetro não poderia ser gerada pela elipse. Foi como uma pequena revelação para mim, quando percebi que a oscilação pode gerar uma elipse. Isso ficará mais claro no capítulo seguinte, quando será demonstrado, ao mesmo tempo, através da concordância dos argumentos a partir dos princípios físicos com o corpo da experiência, mencionados nesse capítulo, que está contido nas observações e na hipótese vicária, que nenhuma figura pode ser dada ao planeta seguir a não ser as perfeitamente elípticas.”

Desse modo, Kepler obtém a sua primeira lei. O movimento de libração do planeta ao longo de seu trajeto, retirado de seu conceito de força, mostra que o planeta tem um movimento elíptico, sendo que esse movimento está em concordância com as posições (dados de Brahe) do planeta Marte e, também, determina as distâncias de Marte ao Sol.

Tendo conquistado a elipse através da oscilação dos movimentos planetários, Kepler passa, a seguir, nos capítulos LIX e LX<sup>188</sup>, do *Astronomia Nova*, a demonstrar geometricamente que a elipse é a única forma que pode seguir a órbita de Marte, e, também,

<sup>186</sup>Aiton, E.J., “Kepler’s Second Law of Planetary Motion”, p. 83.

<sup>187</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. LVIII, p. 576.

<sup>188</sup>O objetivo desta dissertação não é apresentar um comentário detalhado dos capítulos LIX e LX, que são consagrados a apresentação de uma prova formal das duas primeiras leis, algo extremamente complicado e que foge aos propósitos desta dissertação que é mostrar a ruptura em relação ao axioma platônico. A nossa intenção é, no presente texto, apenas apresentar as proposições contidas nessas capítulos. Para uma descrição detalhada dessas proposições, ver Koyré *La Révolution Astronomique*, pp. 267 - 281; e Aiton, “Second Law of Planetary Motion”, pp. 84 - 87.



demonstra a aplicação da hipótese das superfícies não mais com o estatuto de hipótese, mas de uma lei.

A demonstração dada por Kepler no capítulo LIX tinha que dar conta de dois pontos, para a comprovação da primeira e segunda leis dos movimentos planetários. O primeiro é demonstrar que essas leis possibilitam determinar corretamente as distâncias de Marte ao centro, o Sol. O segundo ponto é determinar que a forma elíptica e a lei das áreas possibilitam encontrar a anomalia verdadeira, isto é, elas permitem determinar uma uniformidade de movimentos para um centro físico. Segundo alguns comentadores<sup>189</sup>, Kepler não alcançou plenamente os seus objetivos; a demonstração dada por esse astrônomo no *Astronomia Nova*, não alcançou as suas intenções iniciais. De fato, a segunda lei foi decididamente demonstrada, se assim pode-se dizer, no *Epitome*, em 1621, alguns anos depois da elaboração inicial feita no *Astronomia Nova*. Porém, a formulação dada por Kepler em 1609, possibilitou a determinação da órbita de Marte e da uniformidade entre áreas e tempos de uma forma mais coerente e simples do que as dadas pelos modelos de Ptolomeu e Brahe, e pelo sistema de Copérnico. Além disso, Kepler trabalhou sem ter em mãos o cálculo infinitesimal, o que representou a necessidade de dar uma prova por aproximação, na qual as relações matemáticas encontradas eram tentativas de descrição dos elementos físicos observados e postulados, ocorrendo, desta forma, erros na sua prova. Como nos diz Koyré, Kepler não apenas tinha que relacionar a lei da órbita elíptica com a lei das áreas, como também deduzi-las de sua lei falsa das distâncias (que representava a sua dinâmica).<sup>190</sup>

“...O problema real vem do fato insolúvel para ele de não apenas ter que unir a lei das áreas com a trajetória elíptica, mas ainda de ter que deduzir as duas da lei dinâmica das distâncias, isto é, não somente de ter que deduzir de premissas falsas a verdadeira, mas de unir dedutivamente proposições rigorosamente incompatíveis.”

---

<sup>189</sup>Em especial, Koyré, na *Révolution Astronomique*, p. 267 e Aiton, “Kepler’s Second Law of Planetary Motion”, pp. 75 - 90, que afirmam o fato de Kepler trabalhar com a lei das distâncias, que era uma lei falsa.

<sup>190</sup>Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, p. 267 - 268.

Kepler apresenta 15 proposições no capítulo LIX, concernente às propriedades da elipse, recolhidas de Apolônio de Perga, via Comandino, e da aplicação dessas propriedades aos movimentos do Planeta Marte. Kepler denominou as primeiras proposições (concernente às propriedades elípticas) de prototeoremas. Basicamente, as proposições são as seguintes:

**Proposição I** “Se uma elipse for inscrita num círculo, tocando-o em seus vértices em pontos opostos, e um diâmetro for descrito através do centro e dos pontos de contato, e, além disso, se perpendiculares forem traçadas para o diâmetro, a partir de outros pontos sobre a circunferência, todas essas linhas deverão ser cortadas na mesma razão pela circunferência da elipse.”<sup>191</sup>

Pela figura 24, abaixo, temos<sup>192</sup>  $ML : KL :: b$  (semi-eixo maior), representado na figura por  $AH : a$  (semi-eixo menor), que é  $HB$ . Isto é, a proporção entre as posições do planeta em relação ao círculo excêntrico com as posições sobre a curva elíptica, que para Kepler é real, em relação aos eixos maiores e menores da elipse.

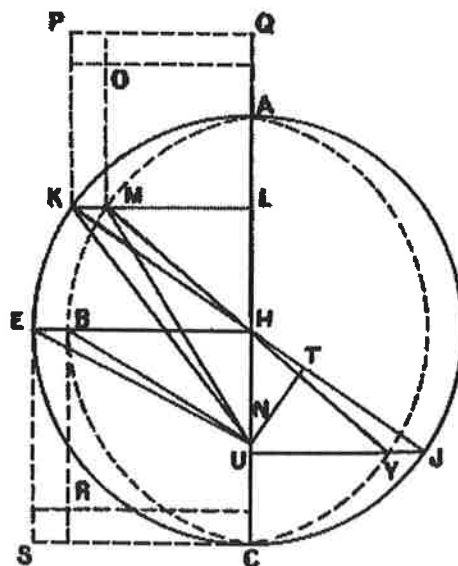


Figura 24<sup>193</sup>

<sup>191</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. LIX, p. 577.

<sup>192</sup>As proporcionalidade apresentadas foram retiradas de Aiton, “Kepler’s Second Law of Planetary Motion”, pp. 84-85.

<sup>193</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. LIX, p. 578.

**Proposição II** “A área da elipse assim descrita em um círculo está para a área do círculo na mesma razão em que estão as linhas justamente mencionadas.”<sup>194</sup>

Área da elipse : área do círculo :: b : a.

**Proposição III** “Se a partir de um ponto dado sobre o diâmetro, linhas forem traçadas para pontos sobre as perpendiculares com a circunferência do círculo e a elipse que as intersecta, as áreas cortadas por essas linhas deverão também estar como os segmentos das perpendiculares.”<sup>195</sup>

Área do setor elíptico AMN : área do setor circular AKN :: b : a.

Segundo Koyré<sup>196</sup>, esta proposição permitirá a Kepler substituir a superfície do círculo pela superfície da elipse.

**Proposição IV** “Se o círculo for dividido em qualquer número de arcos iguais por perpendiculares semelhantes como essas, a elipse será dividida em arcos desiguais, a proporção desses é maior quanto próxima ao vértice e menor nos pontos médios.”<sup>197</sup>

Com essa proposição, passa-se da geometria à dinâmica<sup>198</sup>, que permitirá a Kepler explicar a aceleração e o retardamento dos movimentos elípticos do planeta.

**Proposição V** “A circunferência inteiramente elíptica é aproximadamente a média aritmética entre o círculo sobre o diâmetro maior e o círculo sobre o diâmetro menor.”<sup>199</sup>

**Proposição VI** “Os gnomos dos quadrados divididos proporcionalmente estão entre si como os quadrados.”<sup>200</sup>

---

<sup>194</sup> *Idem*, p. 578.

<sup>195</sup> *Idem*.

<sup>196</sup> Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, p. 268.

<sup>197</sup> Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. LIX p. 579.

<sup>198</sup> Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, p. 268.

<sup>199</sup> Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. LIX, p. 579.

<sup>200</sup> *Idem*.

**Proposição VII** “Se a partir do fim do semidiâmetro menor sobre a circunferência de uma elipse, uma linha igual ao semidiâmetro maior for estendida, finalizada no semidiâmetro maior, a distância entre o ponto de interseção e o centro é o lado de um quadrado igual ao gnomon do quadrado do semidiâmetro maior, localizado sobre o quadrado do semidiâmetro menor.”<sup>201</sup>

Essa proposição permite encontrar o foco da elipse. Kepler não utilizou no *Astronomia Nova*, o termo “foco”; esse só foi dado no *Epitome*.

**Proposição VIII** “Se um círculo for dividido em qualquer número (ou em um número infinito) de partes, e os pontos de divisão forem conectados com algum ponto na circunferência do círculo fora do centro, e também forem conectados com o centro, a soma das linhas traçadas a partir do centro será menor que a soma de todas a partir de outro ponto.

Também, um par de linhas perto da linha das apsides traçadas a pontos opostos de um ponto outro que o centro deverá ser aproximadamente igual a dois pontos opostos traçados do centro, desta forma, um par assim traçado em localizações intermediárias deverá ser maior que todos os traçados a partir do mesmo centro.”<sup>202</sup>

Com essa proposição passa-se a justificar a hipótese das superfícies, a lei das áreas, para a trajetória elíptica. A questão é retomada do capítulo XL, em que a área do círculo dividida em partes iguais não media as distâncias determinadas a partir do centro, sendo essas distâncias menores que a soma das distâncias do centro excêntrico, ocasionando que a área do círculo não media a soma das distâncias para divisões iguais do centro excêntrico.<sup>203</sup>

**Proposição IX** “ Se, por outro lado, em vez das linhas do ponto central, forem tomadas linhas que são determinadas por perpendiculares traçadas a partir desse ponto em direção as linhas que são traçadas para o centro, isto é, se, em termos dos capítulos XXXIX e LVII, as distâncias diametrais são tomadas em lugar das

---

<sup>201</sup> *Idem*, p. 580.

<sup>202</sup> *Idem*, pp. 580 - 581.

<sup>203</sup> Ver Aiton, “Kepler’s Second Law of Planetary Motion”, p. 85.

circunferenciais - então, suas somas serão iguais à soma de todas as traçadas a partir do centro.”<sup>204</sup>

Kepler substitui as distâncias do excêntrico pelas distâncias dos diâmetros, possibilitando a igualdade nas superfícies (áreas) do círculo.

**Proposição X** “A razão das distâncias a partir de um ponto não contido no centro da elipse para os arcos da elipse, não menor do que todos sobre o círculo do prototeorema 8, é contrária à razão dos arcos do círculo e a elipse entre si, explicado no prototeorema 4. Pois o par traçado a partir de um ponto que não é o centro excede o par traçado a partir do centro em direções opostas, numa razão menor (isto é, não em todas), que as apsides; mas nas longitudes medianas elas excedem a última numa razão maior.”<sup>205</sup>

Essa proposição mostra que a superfície da elipse não é mais adequada para mediar as distâncias excêntricas do que a superfície do círculo<sup>206</sup>

Após ter apresentado esses prototeoremas, Kepler passa a derivar a primeira e a segunda leis.

**Proposição XI** “Se em uma elipse dividida por perpendiculares traçadas a partir dos arcos iguais de um círculo, como no prototeorema 4 acima, os pontos de divisão do círculo e da elipse forem conectados aos pontos que foram encontrados no prototeorema 7, afirmo que todas as que são traçadas para a circunferência de um círculo são de distâncias circunferenciais, sendo que todas as que forem traçadas para a circunferência da elipse são distâncias diametrais, as quais foram estabelecidas em um número igual de graus a partir das apsides do epiciclo.”<sup>207</sup>

**Proposição XII** “A área do círculo, tanto no todo, quanto nas partes individuais, é uma medida genuína da soma das linhas pelas quais os arcos do caminho elíptico planetário estão distantes do centro do Sol.”<sup>208</sup>

---

<sup>204</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. LIX, p. 581.

<sup>205</sup>*Idem* p. 582.

<sup>206</sup>Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, p. 270.

<sup>207</sup>Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. LIX, p. 583.

<sup>208</sup>*Idem*, p. 585.

Com essas duas proposições, Kepler dá uma prova, demonstração, para a hipótese das superfícies, derivando-a, como medida de tempo para os trajetos elípticos, mediante a utilização da área circular como medida, pela perpendicular (KL) traçada sobre o eixo maior da elipse (AC), passando pelos pontos que o planeta ocupa em sua órbita.

Pode parecer duvidoso isso que Kepler apresenta, pois são as superfícies do círculo que servem de medida para uma área elíptica e para o ajustamento da hipótese das superfícies. Kepler irá solucionar essa questão apenas no *Epitome*. Segundo Koyré<sup>209</sup>, Kepler estava interessado mais numa astronomia física do que numa astronomia geométrica, o que implica que, pelos problemas gerados por não existir ainda o cálculo infinitesimal, ele se restringiu a relacionar os tempos e as distâncias - entidades físicas -, de uma forma que pudessem ser justificadas.

**Proposição XIII** “Entretanto, a seguinte dúvida surge: se a área AKN é equivalente a todas as distâncias dos muitos pontos contidos no arco elíptico AM, a partir de N, como nós tomamos sob AK, então, qual pode ser o arco elíptico, isto é, onde ele terminará? Pois nós vemos que ele se mostra não estar no fim da linha perpendicular KL. A razão para isso é que desse modo, pelo prototeorema 4, arcos elípticos desiguais correspondem a arcos iguais nos círculos, e assim os arcos são menores sob os vértices A, C, e maiores sobre B. Contudo, parece necessário tomar arcos iguais das órbitas elípticas, mostrando-nos porque estimar e comparar os tempos do planeta para atravessá-las. Sendo específico: porque é certo que o final desses arcos mostram-se estar na distância MN de N, portanto, como no capítulo LVIII, um arco MZ, traçado sobre o centro N com raio NM, algumas vezes indica um ponto limitando esse arco da elipse, e ele aparece que esse ponto está andando não para M, mas para Z, ao qual os arcos intersectam a linha KZ, fazendo o arco da órbita AZ.

“Para replicar isso, fazemos com que o arco da elipse sobre a qual os tempos são medidos pela área AKN, mostram-se por todos os meios serem divididos em partes desiguais, sendo que todas as próximas as apsides são menores.”<sup>210</sup>

<sup>209</sup> *La Révolution Astronomique*, pp. 271 - 275.

<sup>210</sup> Kepler, J., *Astronomia Nova*, cap. LIX, pp. 585 - 586.

**Proposição XIV** “Se alguém dividir a elipse AMC em qualquer número de arcos iguais, assinalando para cada um deles suas distâncias de N, tomando-se as áreas AMN, ABN, ABCNA no lugar da soma das distâncias sobre AM, AB, ABC, pelo prototeorema 10, ele poderá cometer o mesmo erro que ocorreu no capítulo XL, quando nós fizemos para um círculo perfeito aquilo que nós supomos que deve ser feito para a elipse. Isto é, duas linhas MN, NY a partir de dois pontos M, Y opostos entre si, por H são tomadas como equivalentes à linha MHY.

“Suponha, entretanto, que a mesma pessoa divida a elipse AMC no mesmo número de arcos desiguais, contrário ao prototeorema 10, segundo a seguinte lei: o círculo AKC é primeiramente dividido em arcos iguais, a perpendicular KL pode, então, ser traçada para AC a partir dos finais dos arcos individuais, cortando a elipse AM em arcos, também; e a área elíptica pode ser tomada como as distâncias desses arcos a partir de N. Nesse caso, um remédio pode ser dado para o erro que foi cometido: uma compensação mais perfeita.

“A prova disso está no início dos quadrantes A e C, para o fim B; e o movimento entre eles.”<sup>211</sup>

**Proposição XV** “O arco da elipse, o qual o tempo de percurso é medido pela área AKN, deve terminar sob a perpendicular LK, e portanto será AM.”<sup>212</sup>

Com essa proposição, Kepler termina a demonstração de que a hipótese das superfícies é adequada para as áreas elípticas.

O capítulo LX é dedicado a dar uma prova, extremamente técnica, que permite aplicar a elipse para obter as partes físicas e óticas da equação, obtendo, ao mesmo tempo, as distâncias verdadeiras de Marte ao Sol.

---

<sup>211</sup> *Idem*, pp. 586 - 587.

<sup>212</sup> *Idem*, p. 590.

## 5. CONCLUSÃO

A obtenção das duas primeiras leis dos movimentos planetários e a ruptura com o axioma platônico de movimentos circulares e uniformes, que surgiram como conseqüências dos resultados obtidos por essas leis formuladas por Kepler, foram frutos, como procuramos mostrar nesta dissertação, da admissão desse astrônomo de explicações dinâmicas dentro do processo de elaboração de hipóteses acerca da forma das órbitas planetárias e das relações entre as distâncias, velocidades e tempos gastos para o planeta percorrer suas trajetórias ao redor do centro físico de movimentos, que no caso é o Sol.

O procedimento metodológico kepleriano para a obtenção da forma elíptica e da relação entre áreas e tempos no *Astronomia Nova* foi, antes de tudo, o de elaborar e testar hipóteses acerca das órbitas e relações dos planetas e o Sol, tendo-se em vista que essas hipóteses deviam determinar não apenas bons posicionamentos planetários, como era feito numa astronomia de cunho meramente cinemático, mas, além disso, determinar explicações ou modelos explicativos sobre os elementos físicos envolvidos nos movimentos dos planetas, que são representados pela dinâmica kepleriana.

Neste sentido, o *Astronomia Nova* tratou a astronomia de uma forma distinta da maneira que foi feita pelos astrônomos anteriores a Kepler. Nessa obra de 1609, a astronomia passou a procurar razões físicas para explicar porque os movimentos constatados via as observações apresentam-se de uma maneira que foge tanto da circularidade, quanto da uniformidade entre arcos de circunferência e tempos de percurso.

No *Astronomia Nova*, como vimos, Kepler tinha como objetivo encontrar a verdadeira forma da órbita do planeta Marte, as relações entre distâncias percorridas e tempos gastos para percorrê-las, transformando esses elementos em uma linguagem matemática que expressa as constâncias entre eles para, a partir disso, confeccionar tabelas



mais precisas sobre os posicionamentos desse planeta. Para tanto, testou as formas circular, oval e elíptica, encontrando razões plausíveis para aceitar essa última como a correta. Todo o procedimento para a obtenção dessa última forma orbital foi dado mediante a utilização de uma série de hipóteses, ou instrumentos de trabalho - como a hipótese vicária, a lei das distâncias e a hipótese das superfícies - que permitiram a Kepler aproximar-se paulatinamente de uma órbita que corresponde às observações astronômicas.

Todo esse procedimento astronômico foi guiado pela tentativa de encontrar razões físicas para explicar porque o planeta se move da maneira como nós observamos. Neste sentido, pode-se dizer que a astronomia kepleriana foi conduzida pela necessidade de determinar uma explicação causal, que, além de determinar com precisão os posicionamentos planetários, também possibilitasse obter uma explicação dos movimentos, como nos diz Koyré:<sup>213</sup>

“O raciocínio de Kepler é guiado pela idéia da explicação causal: se o Sol se acha no centro do mundo, é preciso que os movimentos dos planetas não sejam ordenados em relação a ele de uma maneira geométrica ou ótica - como em Copérnico -, mas também de uma maneira física ou dinâmica. O esforço de Kepler é, assim, o de encontrar, não apenas uma concepção astronômica que permita ordenar e ‘preservar’ os fenômenos, mas ainda uma concepção física que permita explicar, por causas físicas, o movimento real dos corpos celestes no mundo.”

Embora não possamos dizer que a explicação kepleriana dada no *Astronomia Nova*, como veremos mais abaixo, seja uma explicação dedutiva, no sentido forte de explicação - isto é, não se pode deduzir a partir do conceito kepleriano de força as suas duas primeiras leis -, e nem que essa explicação determine as causas últimas dos movimentos, mas apenas as regularidades que descrevem o comportamento dos planetas, essa explicação kepleriana possibilita romper com o primado de uma astronomia meramente descritiva - pois quebra com o axioma platônico -, instaurando especulações de ordens física e dinâmica no tratamento das hipóteses dessa ciência.

---

<sup>213</sup>Koyré, A., *Estudos de História do Pensamento Científico*, p. 88.

A astronomia kepleriana foi marcada por três elementos que, conjuntamente, permitiram a Kepler romper com o axioma platônico e obter as suas duas primeiras leis dos movimentos planetários. O primeiro é de cunho metafísico, já estava presente no *Mysterium Cosmographicum*: a aceitação incontestável de que há no Universo uma estrutura harmônica entre os planetas e o centro de movimentos, que pode ser expressa de uma forma matemática, obtendo-se, assim, as regularidades que os planetas apresentam em seus movimentos. Isso pode ser sentido na derivação da segunda lei dos movimentos, a lei das áreas iguais em tempos iguais, que foi fruto da tentativa de relacionar os tempos gastos pelos planetas em seus percursos. Kepler já tinha observado e se perguntado, no trabalho de 1596, porque cada planeta perde velocidade, aumentando o seu tempo de percurso, conforme ele se afasta do seu centro de movimentos; desse modo, a variação entre os elementos orbitais foram, na obra de 1609, obtidos graças à tentativa de relacionar esses elementos, derivando-se a relação constante entre áreas e tempos.

O segundo elemento é de cunho empírico. Os dados observacionais de Brahe foram elementos de formulação e teste das hipóteses astronômicas. Kepler construiu hipóteses, como a vicária e a das superfícies que foram retiradas das informações que as observações astronômicas de Brahe determinavam. Neste sentido, Kepler tinha como critério epistemológico a formulação de conjecturas que expressassem aquilo que os nossos instrumentos - que no caso são as observações a olho nu, mediante o uso de sextantes, quadrantes, etc. - astronômicos nos apresentam. Em contrapartida, as hipóteses foram testadas, e apenas aquelas que sobreviveram aos testes - que se ajustaram aos posicionamentos dados pelas observações de Brahe - puderam ser consideradas como descrevendo as regularidades dos fenômenos astronômicos. A hipótese da circularidade foi refutada pelo fato de não se adequar a esses dados observacionais. Kepler poderia, se fosse um astrônomo restrito a um tratamento meramente cinemático, ajustar as observações mediante a construção de artifícios matemáticos, mas, em vez disso, substituiu a circularidade por outra conjectura, que se mostrasse mais condizente com as informações colhidas via a observação astronômica.

O terceiro elemento é o mais importante, e pode-se dizer que foi o que determinou a ruptura com o axioma platônico e permitiu a obtenção da lei da elipsidade e a utilização da

hipótese das superfícies como uma lei, ambas geradas pela admissão de causas físicas para a explicação do comportamento dos planetas constatado observacionalmente. A astronomia kepleriana é caracterizada principalmente pela união entre uma astronomia de tratamento matemático e uma astronomia que trabalha com as causas físicas de seus movimentos. As especulações dinâmicas trazidas por Kepler à astronomia, representadas pela postulação do conceito de força magnética exercida pelo Sol nos planetas, responsável pela variação de velocidades e tempos de percurso em função do aumento ou diminuição das distâncias do planeta ao Sol, representaram uma tomada de posição frente a procura de explicações naturais para os movimentos celestes. O conceito de força, longe de ser a causa última dos movimentos, permite tratar as causas físicas dos movimentos planetários mediante informações retiradas do mundo natural. Neste sentido, quando Kepler abandona a interpretação anímica - que postulava a existência de "almas" planetárias responsáveis por conduzir o planeta em órbitas circulares ou compostas de círculos - em benefício do conceito de força magnética exercida pelo Sol nos planetas, ele está dando uma interpretação de cunho natural, e não de cunho metafísico, incapaz de ser corroborada ou refutada pelas nossas observações e teorias.

Desse modo, a obtenção da forma elíptica foi fruto da admissão por parte de Kepler do conceito de força. Se Kepler fosse um astrônomo restrito a um tratamento cinemático, não haveria nenhuma razão para ele abandonar a produção das órbitas e posicionamentos planetários via a circularidade e a uniformidade, ou compostas dessas, pois elas se mostravam mais econômicas - no número de artifícios - do que a produzida via a elipsidade; como aliás acontecia com a hipótese vicária - que dava bons posicionamentos sem, contudo, determinar as causas físicas pelas quais os planetas se movem conforme nós constatamos pelas observações. Somente quando Kepler procura razões naturais é que ele não pode mais admitir a circularidade e a uniformidade, e os movimentos compostos desses - isto é, embora a circularidade e a uniformidade já tivessem sido refutadas pelos dados observacionais, ainda restavam as composições feitas mediante o paradigma da circularidade, os artifícios geométricos que possibilitavam compor as órbitas como circulares e uniformes -, pois elas não permitem uma interpretação de cunho dinâmico, pelo fato de não se poder explicar, por razões naturais, o paradigma da circularidade e

uniformidade via a utilização do conceito de força magnética. Em outras palavras, Kepler, ao utilizar conceitos físicos na sua astronomia, necessitou produzir uma explicação e descrição dos movimentos planetários mediante elementos que sejam adequados, que forneçam boas razões, sob o ponto de vista natural, e não admitir elementos que não permitem uma explicação deste tipo. O axioma da circularidade e da uniformidade será abolido não apenas por não ser corroborado empiricamente, mas por não dar plausibilidade à utilização das especulações dinâmicas exigidas por Kepler na astronomia.

Em uma carta de Kepler a Fabrícios, de 1607, posterior à descoberta da forma elíptica, ele responde à crítica desse último ao fato de Kepler utilizar elipses para a determinação das órbitas planetárias. Fabrícios representa a tradição na astronomia, para a qual quebrar com a circularidade e uniformidade é romper com o primado de mais de dois mil anos, algo que nenhum astrônomo tinha ousado fazer, argumentando que apenas a circularidade e uniformidade poderiam determinar as constâncias das órbitas planetárias. Em resposta, Kepler escreve:<sup>214</sup>

“Mas vós dizeis que os elementos fundamentais pelos quais esses movimentos se realizam, notadamente os círculos, atêm-se ao movimento uniforme. Isto eu vos concedo. Mas esses movimentos não concordam com os fenômenos. Além disso, segundo a minha teoria, os elementos fundamentais pelos quais é produzido o movimento do planeta são igualmente constantes. A diferença encontra-se no fato que vós empregais círculos e eu, forças corporais. Em suma, a rotação perfeitamente regular do corpo do Sol é constante para mim; constante a revolução das *espécies* imateriais, magnéticas do Sol; constante a ação dessa *espécie* ou força motriz pela qual o planeta [encontra-se] a uma distância determinada...constante a força magnética que aproxima ou afasta o corpo do Sol dos planetas, segundo a medida do ângulo que o eixo do planeta forma com a direção [raio-vetor] em direção ao Sol. E se o planeta passa de um grau de força a outro, isso se efetua de uma maneira excelente, conforme as admissões fundamentais.”

---

<sup>214</sup>Carta de Kepler a Fabrícios, de 10 de outubro de 1607. Retirada de Koyré, A., *La Révolution Astronomique*, p. 265.

Kepler utiliza, diferentemente dos astrônomos de sua época que seguem os ensinamentos da tradição, forças corporais ao invés de círculos, excêntricos, epiciclos, etc., que são construções de nossa imaginação, mas sem respaldo natural.

A postulação de causas físicas para conjugar as observações astronômicas a uma construção teórica representa romper com o primado de uma astronomia restrita a um tratamento em que não se tem motivos para decidir acerca da verdade ou falsidade de suas proposições. Desta forma, tanto a primeira lei, a lei da forma elíptica, quanto a segunda, a lei das áreas iguais em tempos iguais, eliminam a necessidade de construir nas teorias artifícios matemáticos desprovidos de vínculo com os fenômenos observados. Em outras palavras, as duas primeiras leis keplerianas substituem as construções matemáticas da astronomia anterior por elementos teóricos construídos com a intenção de expressar a realidade, conjugando teoria e observação, e não como era feito anteriormente, adequando as observações à teoria, como bem expressa Kuhn:<sup>215</sup>

“...Quando elipses são substituídas pelas órbitas circulares básicas, comuns na astronomia de Ptolomeu e Copérnico, e quando a lei das áreas iguais é substituída pela lei do movimento sobre um ponto no centro ou próximo a ele, são necessários excêntricos, epiciclos, equantes e outros desvios *ad hoc*.”

A elipsidade orbital e a lei das áreas são construções feitas a partir das observações e da tentativa de explicar fisicamente os fenômenos planetários. Com isso, obtém-se em astronomia uma construção que expressa matematicamente as regularidades constatadas pelas observações, dando uma teoria sobre os movimentos planetários que concorda de uma forma satisfatória com as observações.<sup>216</sup>

“Então, pela mudança, ele observou que as próprias discrepâncias variavam de uma maneira familiar, e investigando essas regularidades, ele descobriu que teoria e observação podem ser reconciliadas se os planetas se movem em órbitas elípticas com velocidades variáveis, governadas por uma lei simples, [segunda lei] a qual ele também especificou.”

---

<sup>215</sup>Kuhn, T., *The Copernican Revolution*, p. 212.

<sup>216</sup>*Idem*, p. 212.

As duas primeiras leis keplerianas dos movimentos dos planetas são expressões das regularidades constatadas pelas observações astronômicas, sendo relacionadas essas regularidades às causas físicas que formam os movimentos da maneira como nós constatamos observacionalmente.

Desse modo, o tratamento astronômico inaugurado por Kepler permitiu romper com o axioma de circularidade e uniformidade para os movimentos planetários. Essa ruptura nasceu das especulações físicas provindas da necessidade de explicar que cada planeta perfaz uma órbita com variações de velocidade conforme as distâncias do planeta ao centro físico de movimentos aumente ou diminua, obtendo que a forma elíptica, na qual o planeta perfaz áreas iguais em tempos iguais, é uma explicação de cunho natural, proveniente das informações observacionais.

O conceito de força kepleriano foi, pode-se afirmar, uma das primeiras tentativas de propor causas físicas para explicar o comportamento anômalo em relação à circularidade e uniformidade dos movimentos planetários e, a partir dele, conceber uma representação matemática para expressar as regularidades apresentadas nos movimentos. Neste sentido, o conceito de força de Kepler apresenta várias dificuldades para ser corretamente compreendido, gerando diversas críticas. Entre elas, uma das mais relevantes é a formulada por Dijksterhuis, segunda a qual Kepler não conseguiu produzir uma explicação dos movimentos planetários, porque a substituição de “alma” por “força” realizada no *Astronomia Nova* é meramente nominal, uma mudança apenas de nome que abre as vias para uma concepção mecânica do universo, mas que não atinge o estatuto de explicação porque o conceito de força não pôde ser matematizado: o que impossibilitava a derivação da órbita elíptica a partir desse conceito. Segundo Dijksterhuis:<sup>217</sup>

“Isso [sobre as palavras *anima* (alma), e *vis* (força)] não parece ser mais do que uma substituição de uma palavra por outra, mas as duas palavras apresentam algumas visões diferentes. Ao se ler *vis* no lugar de *anima* pode-se abandonar a visão animística em favor de uma interpretação mecanicista.”

---

<sup>217</sup>Dijksterhuis, E., J., *The Mechanization of the World Picture*, p. 310.

Isto é, para Dijksterhuis a utilização de *vis* (força) feita por Kepler em lugar de *anima* (alma) - utilizada pela concepção tradicional da astronomia - representou, em linhas gerais, trocar uma visão de cunho psicológico por uma visão de cunho mecanicista. Mais adiante, Dijksterhuis escreve sobre a mudança significativa que essa substituição nominal representou.<sup>218</sup>

“Em outro sentido, a mudança é mais significativa. Quando se procede a atribuir o movimento dos planetas a uma força no lugar de uma alma, temos como resultado que podemos considerá-los (os planetas) como corpos inanimados, de modo que eles estão sujeitos às leis da mecânica aplicadas a tais corpos.”

Em outras palavras, mediante essa substituição de alma por força pode-se aplicar as leis e princípios da mecânica, saindo de uma interpretação de cunho “psicológico”, que não permitiria aplicar leis em formas matemáticas, algo que a concepção mecanicista pode determinar. Porém, Dijksterhuis considera que a contribuição do conceito de força de Kepler é restrita apenas a tal substituição, considerando que tal conceito não possibilitou uma explicação de que os planetas são conduzidos elipticamente, percorrendo áreas iguais em tempos iguais, mediante a força magnética exercida pelo Sol nos planetas.

Podemos concordar com Dijksterhuis em um ponto e discordar em outro. De fato, o conceito de força kepleriano não permite uma explicação dedutiva, isto é, não é possível deduzir da caracterização kepleriana de força a forma elíptica e a lei das áreas. Kepler acreditava que o sustentáculo da sua concepção era a lei das distâncias - a velocidade dos planetas é inversamente proporcional à sua distância do Sol, que se mostrava eficiente nas apsides, mas que não se adequava nas longitudes heliocêntricas -, considerando-a como uma lei física que relacionava as velocidades dos planetas aos tempos gastos à medida que a variação da força magnética exercida pelo Sol sobre eles fosse aumentando ou diminuindo.

Porém, essa lei não se mostrou correta, e a sua correlata, a hipótese das superfícies (segunda lei) não tinha para Kepler o estatuto de lei, mas de uma hipótese de trabalho (que só foi considerada por ele como lei na obra de 1621, *Epitome*).

---

<sup>218</sup>*Idem*, p. 312.

A segunda lei não pode ser considerada uma lei explicativa, mas descritiva, pois ela relaciona as áreas como proporcionais aos tempos gastos, não informando nada sobre as causas que originam essa proporcionalidade. Deste modo, Dijksterhuis tem razão ao afirmar que o conceito de força kepleriano não determina propriamente uma explicação para a aceitação das duas primeiras leis dos movimentos planetários.

Entretanto, a afirmação de Dijksterhuis de que o conceito de força produz apenas uma mudança nominal em relação à palavra *anima*, deixa de compreender um fator importante dentro do processo de constituição das teorias acerca dos movimentos planetários, a saber, é justamente com a introdução do conceito de força que temos a melhor expressão do rompimento com o axioma da circularidade e uniformidade, possibilitando, deste modo, um novo procedimento para o estudo dos movimentos planetários, tanto no que concerne à formulação e teste de hipóteses astronômicas, quanto no que diz respeito à elaboração de teorias explicativas sobre tais movimentos.

Em outras palavras, a força magnética exercida pelo Sol nos planetas não pôde ser obtida mediante a circularidade e uniformidade, pois esse padrão não permitia uma explicação natural; desta maneira, ocorreu a necessidade de se formular hipóteses que descrevessem os movimentos planetários como são observados, sendo que a primeira e segunda leis obtiveram tal requisito.

Além disso, deve-se entender o caráter da explicação que o conceito de força fornecia. Apesar de não ser uma explicação dedutiva, é uma explicação que procura justificar o comportamento irregular dos percursos planetários a uma explicação ou modelo que parte de princípios teóricos fornecidos pelo comportamento observado dos planetas, e não uma explicação que formula as suas hipóteses mediante o ajustamento dos dados observacionais a um padrão teórico prévio.

Neste sentido, o papel representado pela explicação dada pelo conceito de força adquire o significado de ser uma tentativa de explicar, mediante hipóteses físicas, os acontecimentos constatados via a observação astronômica.

Finalizando, as hipóteses astronômicas de Kepler tinham como objetivo relatar a realidade dos fenômenos celestes, rompendo com a postura instrumentalista de que não



havia possibilidade de decisão acerca da verdade ou falsidades das hipóteses construídas na astronomia.

O tratamento kepleriano à astronomia procurou romper com a questão da indecidibilidade apontada pela equivalência das hipóteses, em que não se tinha possibilidade de escolha entre elas. Kepler operou uma espécie de refinamento conceitual para as hipóteses em Astronomia. Enquanto para um instrumentalista, a hipótese astronômica representava uma construção geométrica que procurava adequar os dados, com o menor erro possível, ao axioma platônico de movimentos circulares e uniformes, na procura de determinação dos melhores posicionamentos planetários, independentemente da sua verdade ou falsidade, com Kepler as hipóteses passam a ser a procura da representação da realidade dos acontecimentos do mundo supra-lunar, formuladas através de conceitos teóricos e pelos dados observacionais. Ao invés de utilizar epiciclos, deferentes, equantes, etc., Kepler utilizou hipóteses de caráter físico, expressas em forma matemática. Nesse sentido, uma hipótese astronômica deve ter como conteúdo elementos acerca da natureza dos fenômenos, mesmo que elas não sejam observadas diretamente<sup>219</sup>,

“Se algum astrônomo afirma que a lua tem uma órbita de forma oval, ele está fazendo uma hipótese astronômica; mas quando ele diz que pôde representar essa espécie de forma ovalada mediante a utilização de círculos, ele está se utilizando de hipóteses geométricas.”

Assim, a hipótese astronômica não é um constructo matemático objetivando adequar dados à teoria, mas sim, uma conjectura de caráter físico que é construída mediante critérios retirados das observações astronômicas, que procuram representar a natureza dos fenômenos astronômicos. Com isso, Kepler pôde responder à crítica instrumentalista acerca da impossibilidade de decisão entre hipóteses, no que concerne ao caráter da verdade ou falsidade dessas; para Kepler, podemos decidir desde que uma hipótese seja correspondente à natureza dos acontecimentos astronômicos, isto é, se a hipótese for construída mediante os dados fornecidos pelos fenômenos celestes.

---

<sup>219</sup>Kepler, *Apologia de Tycho*, Opera, I, p. 240.

## Glossário Astronômico

A seguir, são apresentados alguns dos termos mais importantes dentro do processo de obtenção das duas primeiras leis dos movimentos planetários. Esse glossário teve como base para a sua formulação o livro de Gérard Simon, *Kepler, Astronome Astrologue*, o de Michael J. Crowe, *Theories of the World from Antiquity to the Copernican Revolution*, e o *Dicionário Enciclopédico de Astronomia e Astronáutica*, de Ronaldo R. de Freitas de Mourão.

**Afélio:** Ponto da órbita em que o planeta está mais afastado do Sol.

**Anomalia (Excêntrica, Mediana e Verdadeira):** Ângulos que permitiam calcular as posições de um astro em movimento em função dos pontos característicos da linha das apsides. (Ver p. 102-105).

**Apogeu:** Ponto da órbita em que o Sol, ou um planeta, está mais afastado da Terra.

**Apsides, Linha das:** Linha que contém os pontos mais extremos das órbitas..

**Eclíptica:** Percurso, ou movimento da Terra, ou do Sol, ao longo do zodíaco.

**Equação (Ótica, Física, Total):** Ângulos auxiliares que permitiam calcular as posições de um astro a partir das apsides e da excentricidade.

**Equante ( ou *Punctum Aequans*):** artifício matemático para explicar as mudanças de velocidades dos planetas, (para explicar a não uniformidade). Em relação a esse ponto o planeta percorre arcos de circunferências iguais em tempos iguais. (Ver p. 23-24).

**Epiciclo com Deferente:** Artíficos matemáticos para explicarem as irregularidades dos movimentos planetários. O Planeta realiza movimento circular ao longo do epiciclo, cujo centro realiza movimento circular sobre o círculo deferente, o qual contém o centro de movimentos. Por esse mecanismo podia-se representar todas as irregularidades e ajusta-las ao axioma platônico. Ver figura 25.

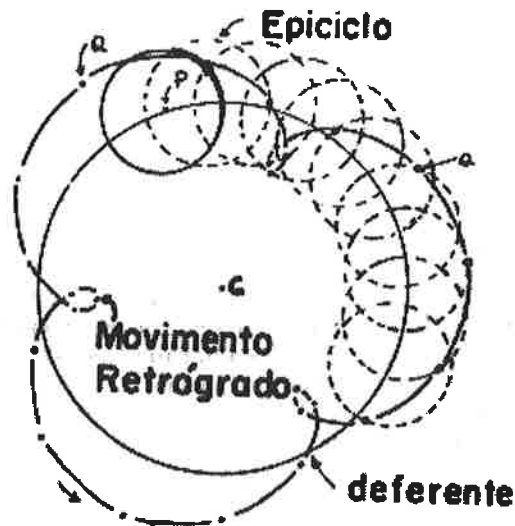


Figura 25<sup>220</sup>

**Excentricidade:** Distância entre o centro físico de movimentos e o ponto em que é medida a circularidade e uniformidade.

**Excentricidade Bissetada:** Excêntrico que contém um equante.

**Excêntrico:** Círculo em que o ponto de movimentos circulares e uniformes está fora do centro.

**Latitude:** Coordenada eclíptica de um ponto da esfera celeste; distância angular desse ponto à eclíptica.

**Longitudes Heliocêntricas:** pontos (posições) dos planetas durante o seu percurso ao redor do Sol.

**Oposição:** Ocorre quando dois corpos celestes estão a  $180^\circ$  um do outro, vistos da Terra., p. e., Marte está em oposição ao Sol quando entre eles está a Terra.

**Periélio :** Ponto da órbita em que o planeta, ou o Sol, está mais perto do centro.

**Perigeu:** Ponto da órbita em que o Sol, ou um planeta, está mais perto da Terra.

**Primeira Desigualdade (ou Primeira Irregularidade):** Irregularidade constatada observacionalmente, que mostra a inconstância dos períodos nos percursos dos corpos celestes. Por exemplo, a variação na intensidade de luz de um planeta, a inconstância nos

<sup>220</sup>Cohen, I. B., *O Nascimento de uma Nova Física*, p. 34.

períodos das estações, etc. A primeira desigualdade expressa a não uniformidade dos movimentos dos planetas.

**Quadrante:** O círculo excêntrico é dividido em quatro partes, a partir da excentricidade, cada parte é um quadrante. Quando se divide em oito partes, cada parte chama-se **Octante**.

**Segunda Desigualdade (ou Segunda Irregularidade) Movimento Retrógrado:** Irregularidade constatada observacionalmente, que mostra as inconstâncias nas trajetórias dos corpos celestes, isto é, os movimentos de retrogradação dos planetas (ver figura 25). A segunda irregularidade expressa a não circularidade dos movimentos planetários.

## BIBLIOGRAFIA

- AITON, E.J., "Kepler's Second Law of Planetary Motion", in *Isis*, nº 205, Set. 1969, pp. 75 - 90.
- APOLÔNIO, *Les Coniques d'Apollonius de Perge*, Paris, 1963.
- ARISTÓTELES, - *De Caelo*, Oxford, 1922.
- \_\_\_\_\_, *Phisica*, Oxford, 1922.
- BURTT, E., *As Bases Metafísicas da Ciência Moderna*, Ed. Universidade de Brasília, 1983.
- CASPAR, M., *J. Kepler*, N. York, 1959.
- COHEN, I. B., *O Nascimento de uma Nova Física*, Edart, São Paulo, 1976.
- COHEN, M. R., & Drabkin, I.E., *A Source Book in Greek Science*, McGraw-Hill Book Company, New York, Toronto, London, 1948.
- COPÉRNICO, N., - *Commentariolus*, Nova Stella, 1990.
- \_\_\_\_\_, *As Revoluções dos Orbes Celestes*, Fundação Calouste Gulbenkian.
- CROMBIE, A.C., *Historia de la Ciencia: De San Agustín a Galileo*, 2 vol. Alianza Editorial 1987.
- CROWE, M. J., *Theories of the World from Antiquity to the Copernican Revolution*, Dover, New York, 1990.
- DIJKSTERHUIS, E.J., *The Mechanization of the World Picture*, Princeton, 1986.
- DONAHUE, W. H., "Kepler's Invention of the Second Law", in *The British Journal of the History of Science*, 27 (1), 1994, pp. 89 - 102.
- DREYER, J. L. E., *A History of Astronomy from Thales to Kepler*, Dover, New York, 1953.
- DUHEM, P., *Salvar os Fenômenos*, Cadernos de História e Filosofia da Ciência, 3/ 1984.
- EUCLIDES, *The Thirteen Books of Euclid's Elements*, Trad. Thomas Heath, Dover, New York, 1956.
- EVANS, J., "Fonction et Origine probable du point équante de Ptolémée" in *Revue D'Histoire des Sciences*, vol. XXXVII, nº 3 - 4, Jul/Dez de 1984, pp. 193 - 213.

- ÉVORA, F. R. R., *A Revolução Copernicano-Galileana*, 2 vol. CLE, 1993.
- GILBERT, W., *De Magnete*, Dover, New York, 1958.
- HANSON, N. R., *Constelaciones y Conjeturas*, Alianza Universidad, 1985.
- HEATH, T., *Aristarchus of Samos, the Ancient Copernicus*, Dover, New York, 1981.
- HOLTON, "Johannes Kepler's: Its Physics and Metaphysics"
- JAMMER, M., *Concepts of Force*, Harvard, Cambridge, Massachusetts, 1957.
- JARDINE, N., "The Forging of Moderne Realism: Clavius and Kepler Against the Sceptics"  
in *Studies in History and Philosophy of Science*, 10 (2), pp. 141 - 173.
- KEPLER, J., *Astronomia Nova*, (trad. de Jean Peyroux) Ed. Diffusé par la Librairie, 1979.
- \_\_\_\_\_, *New Astronomy* (trad. de W.H. Donahue), Cambridge, 1992.
- \_\_\_\_\_, *Mysterium Cosmographicum*, New York, 1981.
- \_\_\_\_\_, *Epitome of Copernican Astronomy*, University of Chicago, 1958
- KOESTLER, A., *Os Sonâmbulos*, Ibrasa, 1961.
- KOYRÉ, A., - *Estudos de História do Pensamento Científico*, Forense Universitária, 1982.
- \_\_\_\_\_, *La Révolution Astronomique*, Paris, 1961.
- KUHN, T., *The Copernican Revolution*, Cambridge, 1957.
- LACEY, H. M., "Lições de Copérnico", in *Ciência e Filosofia*, nº 1, 1979, pp. 111 - 124.
- MOURÃO, R., R., F., *Dicionário Enciclopédico de Astronomia e Astronáutica*, Ed. Nova Fronteira, 1995.
- PTOLOMEU, C., *The Almagest*, Chicago, 1952.
- RUSSEL, J. L., "Kepler's Laws of Planetary Motion: 1609 - 1666" in *The British Journal of the History of Science*, 2 -3, 1964, pp. 1 - 24.
- RUSSO, F., "L'Explication des Mouvements des Planètes des Grecs à Kepler, in *Cahiers d'Histoire & Philosophie des Sciences*, nº 30, 1990.
- SIMON, G., *Kepler, Astronome Astrologue*, Gallimard, 1979.
- WESTMAN, R. S., "The Astronomer's Role in the Sixteenth Century: A Preliminary Study",  
in *History of Science*, XVIII, 1980, nº 40, pp. 105 - 147.
- \_\_\_\_\_, *The Copernican Achievements*, Berkeley/London, 1975.
- WILSON, C., "Kepler's Derivation of Elliptical Path" in *Isis*, 1958, nº 59, pp. 5 - 25.