

TESE DE DOUTORADO

Astronomia nova: a história da guerra contra Marte como exposição do método astronômico de Kepler

Anastasia Guidi Itokazu

Orientadora: Profa. Dra. Fátima R. R. Évora

Departamento de Filosofia – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas
Universidade Estadual de Campinas
Abril de 2006

Anastasia Guidi Itokazu

Astronomia nova: a história da guerra contra Marte como exposição do método astronômico de Kepler

Tese de Doutorado apresentada no Departamento de Filosofia do Instituto de Filosofia e Ciências Humanas da Universidade Estadual de Campinas sob a orientação da Profa. Dra. Fátima R. R. Évora.

Este exemplar corresponde à redação final da Tese defendida e aprovada pela comissão julgadora em 28/04/2006.

BANCA

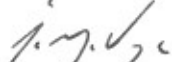
Profa. Dra. Fátima Regina Rodrigues Évora (orientadora)

Prof. Dr. Márcio Damin Custódio (membro)

Prof. Dr. Tadeu Mazzola Verza (membro)

Prof. Dr. José Augusto Chinellato (membro)

Prof. Dr. Enéias Júnior Forlin (membro)



UNIDADE BC
Nº CHAMADA T/UNICAMP
IFCH
V _____ EX _____
TOMBO BC/ 70340
PROC 16.123-06
C _____ D X
PREÇO 14,00
DATA 27/09/06
Nº CPD _____

BIB ID: 388204

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DO IFCH - UNICAMP

It 6 a

Itokazu, Anastasia Guidi

*Astronomia nova : a história da guerra contra Marte como
exposição do método astronômico de Kepler / Anastasia Guidi
Itokazu. - Campinas, SP : [s. n.], 2006.*

Orientador: Fátima Regina Rodrigues Évora.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
Instituto de Filosofia e Ciências Humanas.

1. Kepler, Johannes, 1571-1630. 2. Filosofia da natureza –
História – Séc. XVII. 3. Astronomia – Filosofia. I. Évora, Fátima
Regina Rodrigues. II. Universidade Estadual de Campinas.
Instituto de Filosofia e Ciências Humanas. III. Título.

(mfbm/ifch)

Palavras chaves em inglês (keywords) : Philosophy of nature – History –
17th century
Astronomy - Philosophy

Área de Concentração: Filosofia

Titulação: Doutorado

Banca examinadora: Fátima Regina Rodríguez Évora (orientadora)
Márcio Damin Custódio
Tadeu Mazzola Verza
José Augusto Chinellato
Enéias Júnior Forlin

Data da defesa: 28 de abril de 2006.

Ao Danny, por tudo.

Resumo

Apresentamos aqui um estudo da *Astronomia nova*, trabalho publicado pelo astrônomo alemão Johannes Kepler em 1609. O livro é composto na forma de uma narrativa histórica daquela que o astrônomo chamou sua guerra contra Marte, trabalho exaustivo de análise e interpretação dos dados previamente coletados pelo grande observador Tycho Brahe que teve como resultado a descoberta das duas primeiras leis dos movimentos planetários que levam o nome de Kepler. Mostramos que, à luz da *Defesa de Tycho contra Ursus*, tratado póstumo escrito por Kepler cerca de uma década antes da publicação da *Astronomia nova*, a estrutura narrativa desta última revela-se como a exposição de um método de pesquisa, segundo o qual o astrônomo percorreu o caminho que leva dos movimentos observados do planeta à determinação de seu percurso real em torno do Sol. Procuramos destacar os principais elementos constituintes deste método, reconstruindo o caminho que leva à descoberta da forma elíptica da órbita do planeta.

Abstract

We present an exposition on the New astronomy, published by the german astronomer Johannes Kepler in 1609. The book is composed in the form of a historical narrative of Kepler's war on Mars, exhaustive work of analysis and interpretation of data relative to the planet previously collected by the great obderver Tycho Brahe, which resulted on the discovery of the two first laws of planetary motion that bear Kepler's name. We have shown here that in light of Tycho's defence against Ursus, posthumous work written by Kepler about a decade before the publication of the New astronomy, the historical narrative presented in the latter is the blueprint of a method, by means of which the astronomer derived the true orbit of Mars around the Sun from the observed motions of the planet. We have attempted to provide an account of the main elements of this method, reconstructing the path that leads to the discovery of the elliptical shape of the planet's orbit.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Belkiss e Aluisio, que me ensinaram o quanto estudar pode ser divertido.
À professora Fátima Évora que me sugeriu pela primeira vez a leitura de um texto de Kepler. Sua orientação séria, dedicada e inteligente tornou possível a realização deste trabalho.

Ao professor Jean-Jacques Szczeciniarz da Universidade de Paris VII, pelos relevantes comentários sobre a *Astronomia nova* e fraterno apoio durante o período de pesquisa em Paris.

Aos membros da banca do exame de qualificação, professores Enéias Júnior Forlin, Márcio Damin Custódio e José Augusto Chinellato, pelas preciosas sugestões.

Aos professores do Departamento de Raios Cósmicos do Instituto de Física da Unicamp, que contribuíram decisivamente para minha formação científica, e em especial aos professores Anderson Campos Fauth, Ernesto Kemp e André Assis.

Aos colegas do grupo de estudos “Revolução Científica dos Séculos XVI e XVII, Origens, Influências e Bases Científicas e Filosóficas”, e em especial ao Tadeu Verza, Marcelo Moschetti, Helena Telles, Rachel, Edson, Fábio e Francisco de Assis.

Aos professores do departamento de filosofia do IFCH – UNICAMP, com quem muito tenho aprendido, e em especial aos professores Carlos Arthur, Benjamin e Lucas Angioni.

Ao professor Paulo Sérgio de Vasconcelos, pelas aulas excelentes e pelas sugestões de tradução de alguns trechos mais nebulosos do latim de Kepler.

Aos professores Pablo Rúben Mariconda e Marilena de Sousa Chaui do departamento de filosofia da FFLCH USP, que durante os anos de 2002 e 2003 permitiram que eu participasse semanalmente dos seus seminários de pesquisa e discutisse meu trabalho em seus grupos de estudo.

À professora Karine Chemla do Grupo de Estudos de História das Matemáticas da equipe REHSEIS, e à Sandrine e Virginie da secretaria, pela gentileza com que me receberam na Universidade de Paris VII.

Ao Claudemir Tossato, que com suas valiosas sugestões me ajudou a encontrar um caminho através da *Astronomia nova*.

À minha irmã Ericka Itokazu pelas longas e sempre agradáveis conversas filosóficas.

Ao Professor Zen, à D. Glória, e ao meu tio Benito Carneiro pelo estímulo constante.

Aos amigos Alfredo, Hector, Daniel, Angélica, Homero, Viviane, Rarfs e Lúcio, que tanto ouviram falar da astronomia de Kepler.

Aos caríssimos Sonia, Cristino, Guillaume e Virginie Garcia, que com sua amizade e generosidade tornaram possível a conclusão bem-sucedida do período de pesquisa em Paris.

Ao pessoal da FEF - UNICAMP, e em especial aos professores Paulo Sakanaka, Marcus Vinicius e Renata Cordeiro e aos demais membros do Centro de Estudos de Artes Marciais Chinesas.

À querida Benó, *in memoriam*.

Ao Centro de Pesquisas Educacionais *Rerum Novarum* por ter generosamente cedido suas dependências para a impressão dos exemplares enviados à banca examinadora.

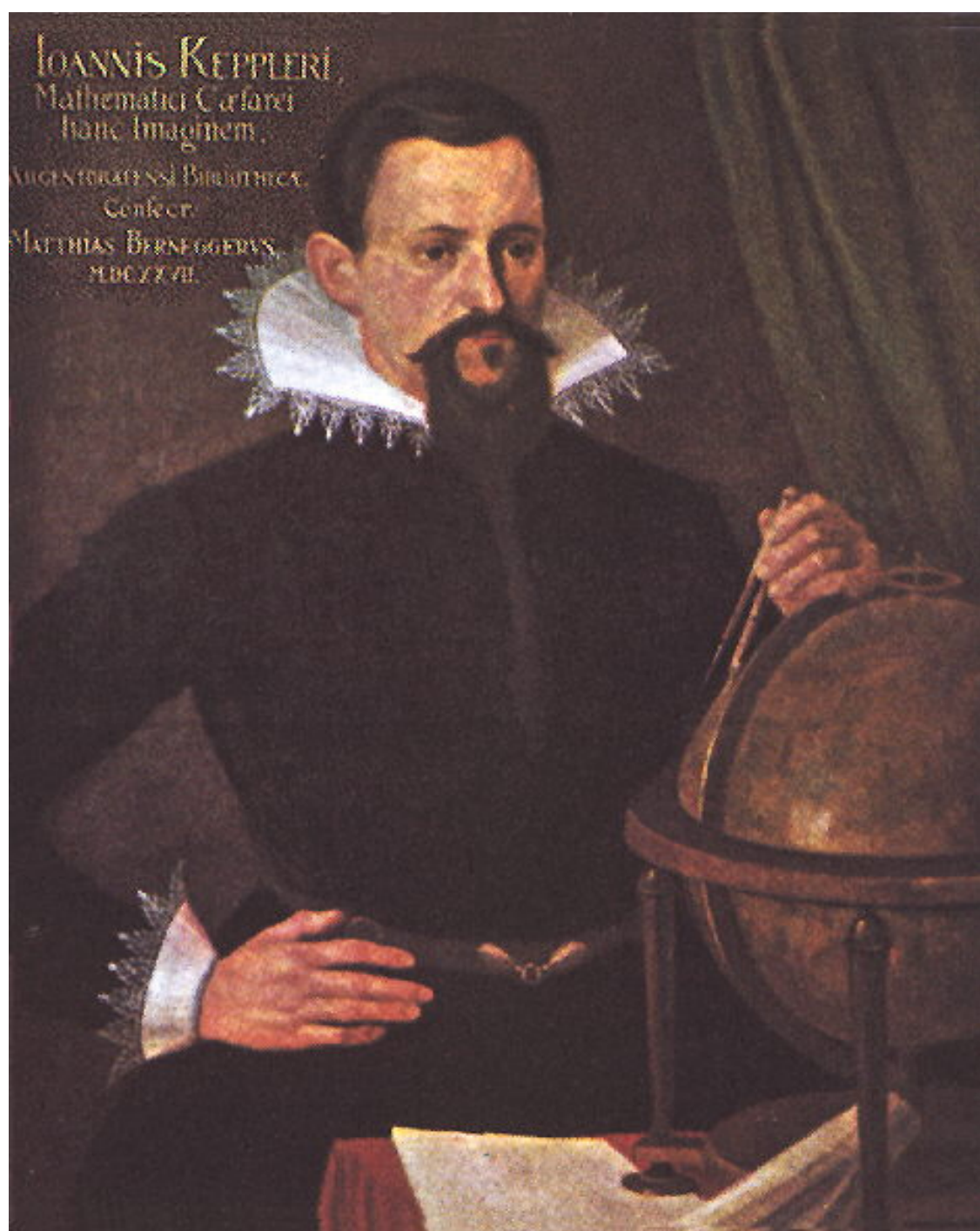
Ao Rogério e à Cidinha, pelo apoio competente nas secretarias do IFCH.

À CAPES, pela bolsa de doutorado e pela auxílio financeiro que possibilitou as pesquisas na Universidade de Paris VII durante o ano letivo 2003/2004.

ÍNDICE

Introdução.....	17
1. <i>Mistério cosmográfico</i> : os primeiros fundamentos do heliocentrismo kepleriano..	25
1.1 O sistema dos sólidos regulares.....	35
1.2 A alma motriz do Sol.....	39
2. O estatuto da astronomia na <i>Defesa de Tycho contra Ursus</i>	45
2.1 Da natureza das hipóteses astronômicas.....	47
2.2 Do método.....	57
3. <i>Astronomia nova</i>	67
3.1 Do <i>Mistério cosmográfico</i> à <i>Astronomia nova</i>	70
3.2 A estrutura retórica da <i>Astronomia nova</i>	75
3.3 A defesa do copernicanismo.....	88
4. A força solar.....	95
4.1 O problema da atenuação da força solar.....	99
4.2 A emissão e a propagação da força solar.....	106
5. A equivalência entre hipóteses astronômicas na primeira parte da <i>Astronomia nova</i>	109
5.1 Uma pequena história da astronomia.....	111
5.2 Movimentos observados e modelos para descrevê-los.....	117
5.3 A troca do sol médio pelo sol aparente.....	124
6. O novo método astronômico exposto através de dois exemplos: o equante ptolomaico e o movimento da Lua.....	137
6.1 Uma explicação física para o <i>punctum aequans</i> de Ptolomeu.....	138
6.2 A explicação física do movimento da Lua.....	146

6.3 Por que motivo e até que ponto pode uma falsa hipótese produzir a verdade?.	154
7. A elipse e o método.....	159
7.1 Da impossibilidade física de um movimento planetário circular e excêntrico.	159
7.2 A lei das áreas.....	168
7.3 Ruptura com a tradição.....	175
7.4 A elipse.....	184
8. Conclusão: das aparências aos movimentos reais.....	203
Apêndice I: da natureza da luz.....	211
Apêndice II: glossário de termos astronômicos.....	223
Bibliografia.....	241



No que segue o leitor perdoará minha credulidade, pois eu estimo todos segundo meu próprio engenho. Com efeito, não me parecem muito menos admiráveis as circunstâncias pelas quais os homens chegam ao conhecimento dos fenômenos celestes do que a própria natureza desses fenômenos. Explico portanto estas circunstâncias cuidadosamente, sem dúvida com algum tédio do leitor. Porém, é mais agradável a vitória alcançada em meio ao perigo, e mais brilhante das nuvens sai o Sol. Esteja portanto, ó leitor, atento aos perigos de nossa campanha, e contempla as nuvens horrendas de negrume. Contempla, eu digo. Porque além destas nuvens certamente se esconde o Sol da verdade, e ele emergirá em breve.¹

¹ *In sequentibus lector ignoscet meae credulitati, dum omnes ex meo ingenio aestimo. Quippe mihi non multo minus admirandae videntur occasiones, quibus homines in cognitionem rerum coelestium deveniunt; quam ipsa Natura rerum coelestium. Occasiones igitur has diligenter explico: non dubium, quin cum aliquo lectoris taedio. Sed tamen jucundior est victoria, quae parta erat cum periculo; et nitidior ex nubibus Sol exit. Attende igitur lector ad pericula nostrae militiae; contemplare nubes nigredine horrendas; contemplare inquam. Nam post has nubes certò Sol veritatis latet, et brevi emerget.* KEPLER, *Astronomia nova*, p. 47.

Introdução

O astrônomo alemão Johannes Kepler (1571 – 1630)² é célebre sobretudo por sua descrição cinemática dos movimentos planetários, sintetizada nos resultados que hoje denominamos suas três leis dos movimentos dos planetas.³ As leis de Kepler revolucionaram a astronomia teórica do século XVII, conferindo-lhe um grau de precisão comparável ao da astronomia observacional de Tycho Brahe⁴. Seria com as *Tábuas Rudolfinas* (*Tabulae Rudolphinae*, 1627), elaboradas por Kepler a partir dos dados coletados por Tycho no observatório de Uraniburgo, que o heliocentrismo superaria o geocentrismo de Ptolomeu no acordo entre teoria e experiência.⁵

Entretanto, a importância do grande astrônomo não se restringe ao domínio da descrição dos movimentos celestes. Ao contrário, Kepler expandiu os limites da astronomia tradicional, cinemática e descritiva, para desenvolver uma nova astronomia na qual os astros são tratados como corpos físicos e têm seus movimentos explicados por meio de forças de natureza magnética ou quase-magnética, capazes de agir à distância. Na longa história do desenvolvimento da ciência moderna Kepler ocupa um lugar importante, entre outras coisas, por ter criado uma física dos céus, por ter contribuído para o desenvolvimento de uma matemática capaz de lidar com variações contínuas, por ter desenvolvido uma teoria da visão na qual a mente do sujeito trabalha a imagem

² Kepler publicou vários tratados astronômicos, dentre os quais podemos destacar o *Mistério cosmográfico* (*Mysterium cosmographicum*, 1596), a *Astronomia nova* (*Astronomia nova*, 1609) e a *Harmonia do mundo* (*Harmonice mundi*, 1619). Estes trabalhos representam etapas decisivas no desenvolvimento da astronomia kepleriana, e embora apresentem diferenças metodológicas marcantes, fazem parte de um mesmo programa, a descoberta da real disposição e dos reais movimentos dos astros no céu. Kepler ainda apresentaria sua nova astronomia no primeiro livro-texto a adotar o copernicanismo como sistema de mundo, a *Súmula de astronomia copernicana* (*Epitome astronomiae copernicanae*), publicada entre 1618 e 1621.

³ O enunciado das leis encontra-se no glossário de termos astronômicos anexado ao final deste trabalho.

⁴ Tycho Brahe (1546 – 1601), astrônomo dinamarquês, o maior observador da astronomia pré-telescópica. Em seu observatório de Uraniburgo, construído na ilha de Hven, Dinamarca, Tycho reuniu uma equipe internacional de jovens astrônomos e criou numerosos instrumentos, aperfeiçoando também os já existentes. Ele conseguiu assim coletar dados sobre os movimentos dos astros sem precedentes em número e precisão. Há três boas biografias científicas de Tycho Brahe, THÖREN, 1990, DREYER, 1963 e a saborosa descrição das atividades na ilha de Hven oferecida por CHRISTIANSON, 2002.

⁵ Como o próprio Kepler observa no prefácio às *Tábuas Rudolfinas*, as *Tábuas Prutênicas de Reinhold*, elaboradas a partir do sistema copernicano, não ultrapassavam em precisão as *Tábuas Alfonsinas*, baseadas no sistema geocêntrico. Desde a época de Ptolomeu a precisão das tábuas astronômicas permanecera em torno dos 10' de arco. Com as *Tábuas Rudolfinas*, a precisão sobe para 2'.

opticamente formada no olho. Sua contribuição científica estende-se sobre vários domínios da natureza, manifestando sempre, qualquer que seja o tema tratado, a confiança no intelecto humano e na sua capacidade de conhecer a verdade.

Apresentamos aqui um estudo sobre uma de suas obras mais influentes, a *Astronomia nova*. No livro Kepler apresenta as suas duas primeiras leis dos movimentos planetários, forjadas por um longo processo de investigação que tem como objetivo a descoberta do real movimento descrito por Marte em torno do Sol. A adesão de Kepler ao copernicanismo data de seu período como estudante na universidade de Tübingen⁶. Michel Mästlin⁷, professor dos cursos de astronomia e matemática, embora oficialmente adotasse o sistema ptolomaico em seu curso, ensinava também o novo sistema de mundo aos seus alunos, e o estudante que planejava tornar-se pastor logo estaria defendendo o copernicanismo nas disputas com os outros alunos da faculdade de artes.⁸ Mais tarde Kepler acabaria por tornar-se astrônomo, e em sua obra adotaria o sistema de Copérnico como o ponto de partida para uma reforma profunda nos métodos e no próprio estatuto da astronomia, contribuindo de maneira decisiva para a eliminação da dicotomia entre os mundos celeste e terrestre.

A nova astronomia de Kepler já não é da mesma natureza daquela de Copérnico. Suas premissas e seus métodos são outros. Kepler incorpora a centralidade do Sol proposta no *De Revolutionibus*⁹, mas descarta a teoria cinemática de Copérnico, ainda profundamente ligada ao quadro conceitual e metodológico da astronomia antiga.¹⁰ A nova interpretação

⁶ Uma interessante exposição sobre o ambiente intelectual na Tübingen do final do século XVI é fornecida por Charlotte Methuen em METHUEN, 1998.

⁷ Michael Mästlin (1550-1631), professor de matemática e astronomia na universidade de Tübingen, é mais conhecido por ter despertado o interesse de Kepler pela astronomia copernicana. Em 1582 Mästlin publicou um livro-texto, a *Epitome astronomiae*. Ele ali não se pronuncia abertamente a favor do copernicanismo, optando por seguir o modelo geocêntrico e empregando os artifícios tradicionais da astronomia ptolomaica. C.f. CASPAR, 1993, p. 46. Além da biografia clássica de Max Caspar, co-editor das obras completas de Kepler na primeira metade do séc. XX, uma outra boa biografia científica, mais sucinta, é aquela de James VOELKEL, 1999.

⁸ C.f. CASPAR, 1993, p. 45-47. Kepler ingressou na Universidade de Tübingen em 1589, aos 17 anos. Em 1594 ele abandonaria os estudos de teologia para tornar-se professor de matemática no seminário protestante de Graz.

⁹ *De revolutionibus orbium coelestium* (1543). COPÉRNICO, 1984.

¹⁰ C.f. SZCZECINIARZ, 1998, p. 364-366.

física do heliocentrismo apresentada na *Astronomia nova* é baseada em forças que atravessam o espaço e afetam corpos espacialmente distantes. No processo de radicalização do heliocentrismo empreendido por Kepler, a centralidade do Sol torna-se essencial para a explicação causal e a descrição geométrica dos movimentos celestes.¹¹ Além de iluminar o mundo, o Sol passa a funcionar como fonte da força que movimenta todos os planetas. Na *Astronomia nova*, a premissa física da força solar serve como fundamento para a derivação de uma descrição matemática do movimento de Marte (e por extensão dos movimentos planetários em geral) extremamente precisa, sintetizada nas suas duas primeiras leis.

As leis de Kepler substituem os mecanismos computacionais tradicionalmente empregados pelos astrônomos ao mesmo tempo em que rompem com os princípios mais profundos nos quais se baseavam esses mecanismos. Os epíclis ainda remanescentes na astronomia de Copérnico são eliminados com a nova astronomia física, e o próprio axioma de acordo com o qual os movimentos celestes são sempre circulares ou compostos de movimentos circulares, jamais questionado desde a Antiguidade, é subvertido com a primeira lei.

Este trabalho não se concentra no entanto na descrição cinemática do movimento de Marte, sintetizada nas leis, mas no método de pesquisa empregado por Kepler no tratamento dos dados observacionais, que a forma narrativa da *Astronomia nova* permite conhecer. No livro, o movimento de Marte serve de suporte para a exposição de como funciona, na prática, o método de pesquisa previamente descrito na *Defesa de Tycho contra Ursus (Apologia Tychonis contra Ursum)*¹², pequeno texto escrito em 1601 que Kepler não chegou a publicar. Pretendemos mostrar que a *Astronomia nova* encerra com efeito a exposição de um método de pesquisa, e tem sua estrutura retórica moldada por essa exposição.

¹¹ Veremos ao longo do texto que Copérnico não empregava o corpo solar, mas o centro da órbita da Terra, um ponto vazio, como ponto de referência nas suas análises geométricas dos movimentos planetários.

¹² In: JARDINE, 1988.

A nova astronomia é moldada pela cosmologia copernicana e pela tese de que a Terra se move no espaço junto com os demais planetas. Se a Terra não é o centro do mundo, mas um planeta como os demais, então as relações causais observadas no mundo terrestre devem valer também para os corpos celestes. Como observa Alexandre Koyré, um dos mais eminentes estudiosos da astronomia kepleriana, a nova astronomia é inovadora sobretudo em vista das perguntas ali propostas.¹³ Kepler indaga sobre as causas dos fenômenos celestes e sobre os reais percursos descritos pelos astros no céu, não se contentando em obter uma descrição precisa dos movimentos observados. Essa nova maneira de interpretar os movimentos celestes como o resultado de uma interação física que pode vir a ser compreendida pressupõe um novo método de tratamento dos dados observacionais, e foi com a intenção de comunicar esse método da maneira mais completa possível que, acreditamos, Kepler optou pela composição de uma narrativa de suas descobertas.

Com efeito, o caminho percorrido pelo astrônomo até a descoberta do trajeto descrito por Marte em torno do Sol revela detalhes do método de pesquisa por ele forjado. Esses detalhes dificilmente poderiam ser revelados por uma exposição mais sistemática, dada a complexidade do método. Há elementos que se conservam ao longo de toda a análise, mas os procedimentos variam em função do problema tratado, entre outros motivos, porque Kepler frequentemente precisa desenvolver as próprias ferramentas matemáticas, uma vez que os problemas de que ele trata já não são os problemas da astronomia antiga. Procuramos seguir o percurso traçado por Kepler, tratando mais detalhadamente de alguns problemas que se revelam especialmente interessantes quando analisados à luz da *Defesa de Tycho*.

Há obras, como a *Astronomia nova*, onde zonas de penumbra parecem resistir a séculos de estudos. Se é verdade o que diz a máxima de Descartes, que “ aquilo que há de importante e de útil nos livros dos gênios superiores não consiste nestes ou naqueles pensamentos que dali possamos extrair; o fruto precioso que eles encerram deve sair do

¹³ C.f. KOYRÉ, 1961, p. 122.

corpo inteiro da obra”¹⁴, então é importante que o significado desses trechos pouco conhecidos seja trazido à luz. Por esse motivo priorizamos a leitura das duas primeiras partes dessa obra monumental, ainda pouco exploradas pela crítica mas importantes, esperamos mostrar, para a constituição do argumento do livro. Se é verdade que a intenção de Kepler ao compor a *Astronomia nova* da maneira como ele o faz é proporcionar à comunidade astronômica uma exposição do método de pesquisa que o levou à descoberta das leis, então as duas primeiras partes do livro devem ser importantes do ponto de vista da constituição desse método. Por outro lado, a derivação das leis na terceira e quarta partes da *Astronomia nova* também é investigada à luz dos conceitos expostos na *Defesa de Tycho*, pois ainda que este tema seja mais amplamente discutido pela crítica ainda resta muito a ser esclarecido.¹⁵

O primeiro capítulo tem caráter preliminar. Tratamos ali das primeiras etapas da criação de uma astronomia baseada em causas e da introdução do conceito de alma motriz no *Mistério cosmográfico*. O livro foi publicado em 1596, quando Kepler tinha apenas 25 anos¹⁶, e é uma defesa vibrante do copernicanismo, onde Kepler lança alguns dos fundamentos que haveriam de orientar toda a sua pesquisa futura. No segundo capítulo procedemos a um exame da *Defesa de Tycho contra Ursus*, pequeno tratado póstumo onde Kepler traça um panorama teórico de suas concepções metodológicas sobre a ciência astronômica. Os conceitos discutidos neste capítulo, em especial a distinção entre hipóteses astronômicas e hipóteses geométricas, serão retomados nos capítulos seguintes quando procurarmos explicitar os elementos daquele que chamamos ‘o método astronômico de Kepler’.

No terceiro capítulo propomos nossa visão geral acerca da estrutura narrativa da *Astronomia nova*, e salientamos a sua estreita conexão com as teses discutidas na *Defesa de Tycho*. O reconhecimento da artificiosidade do argumento de Kepler é relativamente

¹⁴ DESCARTES, *Apud*. GUÉROULT, 1968, p. 11.

¹⁵ A derivação das duas primeiras leis de Kepler na *Astronomia nova* é discutida por TOSSATO, 1997; DONAHUE, 1996; STEPHENSON, 1987 e WILSON, 1958.

¹⁶ Sobre as circunstâncias que cercaram a publicação do *Mistério cosmográfico* c.f. CASPAR, 1993, p. 60-71.

recente, datando das últimas décadas do século XX.¹⁷ Propomos uma nova interpretação do argumento cuidadosamente construído pelo astrônomo, fundamentada nas concepções teóricas expostas na *Defesa de Tycho*.

No quarto capítulo investigamos a noção de *vis motiva*, a força imaterial emanada do Sol que na *Astronomia nova* responde pelos movimentos dos planetas. A força motriz solar explica como é possível que o Sol funcione como causa eficiente dos movimentos dos planetas, apesar da distância que o separa deles. Essa discussão relaciona-se estreitamente com o estudo da natureza da luz exposto no primeiro capítulo do *Suplemento a Vitelo (Ad Vitellionem paralipomena, 1604)*¹⁸, discutido por nós em um apêndice anexado a este trabalho.

O quinto, sexto e sétimo capítulos trazem reconstruções do argumento da *Astronomia nova* onde procuramos mostrar que, à luz da *Defesa de Tycho*, a intrincada narrativa do livro aparece como a exposição de um método de pesquisa. O quinto capítulo trata da primeira parte da *Astronomia nova*, onde Kepler discute a equivalência geométrica entre as diversas representações dos movimentos dos astros. No sexto capítulo avaliamos o método astronômico de Kepler a partir de dois problemas que fazem parte do argumento geral do livro mas que podem ser investigados isoladamente, o movimento da Lua e a construção de uma explicação física para o equante ptolomaico. Finalmente, o sétimo capítulo trata da derivação das duas primeiras leis na terceira e quarta parte do livro.

Dois apêndices encontram-se anexados ao final do trabalho. No primeiro deles, discutimos a exposição sobre a natureza da luz apresentada por Kepler no *Suplemento a Vitelo (Ad Vitellionem paralipomena, 1604)*. O segundo apêndice traz um glossário de termos astronômicos, onde são elucidados os significados de alguns conceitos básicos da astronomia de posição.

¹⁷ Entre os trabalhos que discutem a construção da estrutura narrativa da *Astronomia nova* destacam-se VOELKEL, 2002, DONAHUE, 1988 e STEPHENSON, 1987.

¹⁸ O *Suplemento a Vitelo* é o mais importante estudo de Kepler sobre a óptica. Em 1611 Kepler publicaria a *Dióptrica (Dioptrice)*, onde é discutido o funcionamento do telescópio de Galileu.

Na medida do possível, as figuras foram diretamente reproduzidas a partir dos textos de Kepler. No caso específico da *Astronomia nova* isso às vezes implica em alguma obscuridade, que procuramos solucionar adicionando legendas detalhadas e explicações exaustivas no corpo do texto. Acreditamos que um dos objetivos do tipo de trabalho acadêmico a que nos propomos aqui seja a abertura de textos pouco acessíveis a um público mais amplo, e nesse sentido a familiarização com as construções geométricas originais de Kepler é importante porque facilita o acesso à *Astronomia nova*.

A *Astronomia nova* é um livro muito técnico, o que torna delicada a situação do intérprete. Por um lado, se insistirmos demais no viés geométrico, corremos o risco de nos tornar desnecessariamente obscuros. Pelo outro, deixar de lado as demonstrações geométricas impossibilitaria a construção de nossa argumentação, que trata justamente do método matemático pelo qual Kepler progressivamente se distancia das aparências para chegar à descoberta do real movimento descrito por Marte em torno do Sol. Evitaremos nos aprofundar quando isso for dispensável, ao mesmo tempo em que nos esforçaremos para tornar mais clara a estrutura da *Astronomia nova*.

Enquanto na astronomia geocêntrica da Antigüidade as observações coincidem com a realidade dos céus, no heliocentrismo o movimento do observador deve ser conhecido e abstraído das observações, para que estas possam ser convertidas nos movimentos reais dos astros. A terminologia cunhada pelos proponentes da astronomia geocêntrica é empregada por Kepler na descrição das observações, ao mesmo tempo em que novos conceitos (como o conceito de órbita) são empregados na descrição da realidade subjacente aos fenômenos. A distinção entre o plano das aparências e o plano da realidade é fundamental na argumentação da *Astronomia nova*, ainda que o astrônomo seja obscuro no que diz respeito à delimitação entre eles.

A não ser por algumas cartas, Kepler escreveu em latim. Salvo menção em contrário, empregamos os textos editados por M. von Dyck, M. Caspar et al., *Johannes Kepler: Gesammelte Werke*, 22 vols, e os designamos pelo título em português, *Mistério cosmográfico*, *Astronomia nova*, *Harmonia do mundo*, *Súmula de astronomia*

copernicana etc. Na citação de trechos extraídos de cartas, adotamos o padrão usual entre os estudiosos da obra de Kepler, e nos referimos aos volumes dos *Gesammelte Werke* pelas iniciais K.G.W. seguidas do volume correspondente em numerais romanos. As passagens da *Defesa de Tycho contra Ursus* foram traduzidas a partir do texto latino reproduzido em JARDINE, 1998. Dentro do possível tentamos ser fiéis aos termos empregados por Kepler, mantendo as suas opções e indicando nas notas de rodapé as possíveis ambigüidades. Algumas traduções disponíveis estão enumeradas na bibliografia. Elas são designadas ao longo do trabalho pelo nome do autor seguido do ano da publicação, como as demais obras.

Capítulo 1 - *Mistério cosmográfico*: os primeiros fundamentos do heliocentrismo kepleriano

O *Mistério cosmográfico* é o primeiro tratado astronômico de Kepler. O livro foi escrito quando o autor da *Astronomia nova* tinha apenas 25 anos, durante o período em que Kepler ocupou a cátedra de matemática e astronomia do seminário protestante de Graz, entre 1594 e 1600. Embora Kepler não tenha obtido muito êxito como professor de matemática¹⁹, o emprego permitiu que ele aprofundasse os estudos de astronomia iniciados na Universidade de Tübingen, nas aulas de Michel Mästlin. No ano de 1600 o seminário protestante seria fechado em virtude da Contra-reforma e Kepler seria obrigado a deixar Graz.²⁰ Em 1621, doze anos depois da publicação da *Astronomia nova*, Kepler lançaria uma segunda edição do *Mistério Cosmográfico* acrescida de notas. Na carta dedicatória ao imperador Fernando II (1578-1637) que abre essa segunda edição Kepler expressa seu apreço pelas idéias lançadas no trabalho de juventude:

Embora em verdade eu fosse muito jovem naquela época, e produzisse o meu primeiro ensaio nesta profissão astronômica, seu êxito todavia foi atestado em alta voz nos tempos que se seguiram, e nenhum primeiro ensaio jamais foi edificado de maneira mais admirável ou com maior felicidade, porque nenhum trata de assunto mais digno. Mas não se deve atribuir essa descoberta somente ao meu engenho (...) visto que, assim como se me tivessem sido ditadas por um oráculo baixado dos céus, todas as principais [teses] da pequena publicação foram assim concebidas, e imediatamente reconhecidas por aqueles que as entenderam como completamente verdadeiras, como ordinariamente é manifesto nas obras de Deus ...²¹

¹⁹ Cf. CASPAR, 1993, p. 56-57.

²⁰ Cf. CASPAR, 1993, p. 111-115.

²¹ *Etsi vero tunc oppidò iuuenis eram, primumque hoc Astronomicae professionis tyrocinium edebam: successus tamen ipsi consecutorum temporum elata voce testantur, nullum admirabilius, nullum felicius, nullum scilicet in materia digniori positum esse vnquam à quoquam tyrocinium. Non enim haberi debet illud nudum ingenij mei commentum (absit huius rei iactantia à meis, admiratio à lectoris sensibus, dum Sapientiae Creatricis tangimus Psalterium heptachordum) quandoquidem, non secus, ac si dictatum mihi fuisset ad calamum, oraculum coelitus delapsum, ita omnia vulgati libelli capita praecipua, et verissima statim (quod solent opera Dei manifesta) fuerunt agnita ab intelligentibus... *Mistério cosmográfico* (2ª ed.), p. 9; KEPLER, 1992-a, p.47.*

Apesar das diferenças metodológicas que claramente distinguem a *Astronomia nova* do *Mistério cosmográfico*, as principais idéias expostas neste primeiro ensaio continuarão a exercer um papel importante nos trabalhos subseqüentes de Kepler. Mesmo o sistema dos sólidos geométricos, do qual Kepler não faz menção na *Astronomia nova*, será retomado em 1619, na *Harmonia do mundo*²².

O objetivo do *Mistério cosmográfico* é explicar as causas pelas quais o número, o tamanho e o movimento dos planetas são aqueles observados e não outros.²³ A procura por uma explicação causal para a distribuição dos planetas em torno do Sol e para a forma de seus movimentos o projeto kepleriano de fundação de uma astronomia física desde a sua primeira obra astronômica. Veremos que, ao longo dos anos, o tipo de causa empregada vai variar consideravelmente em função do tema tratado, mas em nenhum momento essa idéia geral será abandonada. No *Mistério cosmográfico* Kepler emprega causas geométricas para explicar a arquitetura do mundo criado. Essas causas geométricas são introduzidas a partir de critérios de perfeição das cinco figuras sólidas regulares, que teriam servido de modelo na criação do mundo. No *Mistério* Kepler também introduz uma explicação causal para os movimentos dos planetas, fundada na centralidade do Sol. Uma alma motriz situada no centro do sistema heliocêntrico é responsável pelos movimentos de todos os planetas, e responde pelas velocidades observadas.

Outro tema avançado no *Mistério* que jamais será abandonado nas obras posteriores de Kepler é o da inteligibilidade do mundo e da identificação do conhecimento do mundo com o conhecimento de Deus. Quando iniciou os seus estudos na Universidade de Tübingen Kepler pretendia tornar-se pastor²⁴, e a sua interpretação do copernicanismo

²² Um excelente estudo sobre a *Harmonia do mundo* é aquele de STEPHENSON, 1994.

²³ Kepler escreve movimentos dos orbes (*Et tria potissimum erant, quorum ego causas, cur ita, non aliter essent, pertinaciter quaerebam, Numerus, Quantitas, et Motus Orbium.*) *Mistério cosmográfico*, p. 9; KEPLER, 1992-a, p. 66, grifo meu. Entretanto, veremos logo adiante que no *Mistério* ele já não acreditava na existência de esferas cristalinas ligadas aos astros. Por volta de 1600, na *Defesa de Tycho contra Ursus*, Kepler ainda usava os termos *sphaera*, *orbis* e *circulus* de maneira irregular. Cf. JARDINE, 1988, p. 83. Seguimos a opção de Jardine, traduzindo *sphaera* por esfera, *orbis* por orbe e *circulus* por círculo, e indicando nas notas de rodapé qualquer possível ambigüidade.

²⁴ Cf. CASPAR, p. 48.

está impregnada de uma motivação de ordem religiosa que é muito evidente nas obras mais cosmológicas, o *Mistério* e a *Harmonia do mundo*, mas que também jaz sob a análise de dados empíricos que ocupa a maior parte da *Astronomia nova*. Na carta dedicatória à primeira edição, Kepler compara o estudo do universo com a leitura do *livro da natureza, no qual se contempla Deus como o Sol num espelho d'água*.²⁵ Anos mais tarde, reagindo às observações telescópicas de Galileu²⁶, Kepler diria que a humanidade é conduzida por Deus de descoberta em descoberta, em um processo análogo ao amadurecimento intelectual de uma criança.²⁷ Kepler mantém que o elo entre o mundo e a razão humana é justamente a geometria, impressa pelo criador tanto na estrutura do mundo quanto na razão humana: “A geometria é una e eterna, e resplandece na mente divina, sendo a participação nela concedida aos homens uma das causas por que este é a imagem de Deus.”²⁸

O objetivo do astrônomo é revelar o plano elaborado por Deus para a criação do mundo. A astronomia possui um estatuto elevado porque ela possibilita uma ascensão do intelecto humano em direção às idéias divinas. Essa visão depende da possibilidade de intelecção da estrutura do mundo criado, pois em caso contrário o astrônomo não poderia louvar a Deus, já que a sua obra não lhe seria acessível. O homem é capaz de ler o livro da natureza porque ele faz parte desse livro. Em outras palavras, assim como o cosmos o homem também reflete a imagem de Deus, e o conhecimento do mundo, do qual faz parte a astronomia, é a atividade mais adequada à mente humana:

²⁵ *Atqui hic est ille liber Naturae, tantopere sacris celebratus sermonibus; quem Paulus gentibus proponit, in quo Deum, ceu Solem in aqua vel speculo contemplentur. Mistério cosmográfico*, p. 5. KEPLER, 1992-a, p. 55.

²⁶ No dia 15 de março de 1610 Wackher von Wackenfels, um dos melhores amigos de Kepler em Praga, foi à casa do astrônomo para contar-lhe das luas de Júpiter, recém descobertas por Galileu Galilei nas primeiras observações telescópicas da história da astronomia. Logo depois uma cópia do pequeno livro de Galileu, a *Mensagem das estrelas (Sidereus nuncius)* chegou às mãos de Kepler, que respondeu prontamente com a publicação da *Dissertação com o mensageiro das estrelas (Dissertatio cum nuncio sidereo)* ainda em 1610. Cf. CASPAR, 1993, p. 161, 189; VOELKEL, 1999, p. 68-70; HALLEUX, In: KEPLER, 1975, p. 5.

²⁷ GALILEU-KEPLER, 1984, p. 141; *Dissertação com o mensageiro das estrelas*, p. 306.

²⁸ *Geometria una et aeterna est, in mente Dei refulgens: cuius consortium hominibus tributum inter causas est, cur homo sit imago Dei. Dissertação com o mensageiro das estrelas*, p. 308; GALILEU-KEPLER, 1984, p. 145.

Pois o motivo pelo qual a mente foi unida aos sentidos pelo nosso benfeitor não foi tanto para que o homem se sustentasse, coisa que muitos gêneros de animais podem fazer muito melhor com a ajuda de inteligências brutas, mas também para que a partir das coisas que com os olhos vemos que existem nos dirijamos até as causas porque elas existem e acontecem, ainda que disso não obtenhamos nenhuma utilidade. (...) Pelo que, assim como a providência da natureza nunca deixe faltar alimento aos animais, do mesmo modo podemos dizer não sem fundamento que por isso há tanta variedade nas coisas e tantos tesouros escondidos na fábrica dos céus, para que jamais falte à mente humana alimento fresco, para que não desdenhe o [alimento] velho, nem descanse, mas disponha neste mundo de uma escola eterna para exercitar-se.²⁹

Assim como a música e a pintura existem para o deleite dos sentidos, a astronomia existe para o deleite da razão. E como a razão é a mais nobre das faculdades humanas, a astronomia é a mais nobre das ocupações possíveis.³⁰ Anos mais tarde, na *Defesa de Tycho contra Ursus*³¹, Kepler manifestará a mesma opinião ainda mais claramente:

Aqueles que observam as coisas as coisas imediatamente discerniram nos números e figuras geométricas, isto é, naquilo que dentre todas as coisas da natureza é mais claro e adequado à mente humana, aquela luz de nossa mente que prospera mais diretamente nas figuras [geométricas], mas também em todas as coisas em geral, e sem o que nada existiria que a nossa mente pudesse conhecer.³²

²⁹ *Est enim ideò mens adjuncta sensibus ab Opifice nostro; non tantùm vt seipsum homo sustentaret, quod longè solertiùs possunt vel brutae mentis ministerio multa animantium genera: sed etiam, vt ab ijs, quae, quod sint, oculis cernimus, ad causas quare sint et fiant, contenderemus: quamuis nihil aliud vtilitatis inde caperemus. (...) Quare vti Naturae prouidentiâ pabulum animantibus nunquam deficit: ita non immeritò dicere possumus, propterea tantam in rebus inesse varietatem tamque reconditum in coelorum fabrica thesaurus; vt nunquam deesset humanae menti recens pabulum, ne fastidiret obsoletum, neu quiesceret, sed haberet in hoc mundo perpetuam exercendi sui officinam.* Mistério cosmográfico, p. 6; KEPLER, 1992-a, p. 56-57.

³⁰ Cf. Mistério cosmográfico, p. 6; KEPLER, 1992-a, p. 56.

³¹ A *Defesa de Tycho contra Ursus* é o tema do segundo capítulo do presente trabalho.

³² *Statim in Geometricis figuris et numeris, nempe in re totius naturae clarissima, mentique humanae maxime apta, deprehenderunt rerum contemplatores lumen illud mentis nostrae, quod rectissime quidem in figuris, sed tamen etiam in alijs rebus omnibus generatim vigeret, et sine quo nihil esset, cujus cognitionem capere mens nostra posset.* KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 88.

A concepção kepleriana sobre a inteligibilidade racional do mundo pode ser melhor compreendida à luz do opúsculo *Sobre a neve hexagonal*, redigido em 1610 (ou em 1609³³, em todo caso após a publicação da *Astronomia nova*) e oferecido ao seu amigo Johannes Matthäus Wackher von Wackhenfels (1550-1619) como presente de ano novo em janeiro de 1611. O assunto tratado no pequeno texto é aparentemente simples: uma investigação da causa da forma hexagonal dos flocos de neve:

Cada vez que começa a nevar, acontece regularmente que as primeiras partículas de neve possuem a forma de um asterisco de seis ângulos. Isso implica em uma causa bem determinada. Pois se acontece por acaso, por que os flocos não tombam também com cinco ou mesmo sete ângulos?³⁴

A resposta definitiva a essa pergunta só é encontrada após o exame de uma série de possibilidades, que vão sendo eliminadas uma a uma. O autor começa por descartar que a causa esteja situada na matéria dos flocos de neve, o vapor, e decide que a causa deve ser procurada no *agente*.³⁵ Após descartar outras possibilidades, Kepler acaba por atribuir a causa da forma hexagonal dos flocos de neve a uma certa faculdade formadora da Terra. A Terra é, acredita Kepler, provida do conhecimento das diversas figuras regulares, planas e sólidas, e imprime as formas geométricas que observamos na natureza, como nas flores e nos cristais. No caso da neve, a forma hexagonal é escolhida porque ela otimiza a ação do frio sobre o vapor.³⁶ O tratamento dado por Kepler à questão reflete um tema fundamental de sua obra, como observa Halleux, responsável pela tradução francesa do livro: “encontrar na matéria, mesmo que numa ínfima partícula, as correspondências geométricas onde se lê a obra de Deus.”³⁷ Kepler escreve:

Assim como nada aqui ocorre sem que haja uma razão suprema, certamente não aquela que seria inventada pelo discurso racional, mas por aquela que teria existido originalmente no projeto do criador e que, desde o princípio até o presente, estaria

³³ Cf. HALLEUX, In: KEPLER, 1975, p. 3.

³⁴ *Dissertação com o mensageiro das estrelas*, p. 265; KEPLER, 1975, p. 56.

³⁵ Cf. *Dissertação com o mensageiro das estrelas*, p. 265; KEPLER, 1975, p. 56-57.

³⁶ Cf. *Dissertação com o mensageiro das estrelas*, p. 278-280; KEPLER, 1975, p. 79-81.

³⁷ HALLEUX, In: KEPLER, 1975, p. 7.

conservada na admirável natureza das faculdades dos animais; eu também não acredito que na neve essa figura regular exista por acaso.³⁸

O que nos interessa nessa discussão é que, também no estudo de fenômenos relativos ao mundo terrestre³⁹, Kepler fundamenta a possibilidade de ascensão às causas dos fenômenos na existência de uma estrutura geométrica impressa pelo criador simultaneamente na mente humana e no mundo criado.

A localização da Terra foi designada por Deus de maneira a otimizar a realização de observações astronômicas.⁴⁰ Em 1604, no *Suplemento a Vitelo*, os eclipses serão apontados por Kepler como uma demonstração de que existe um Deus criador da natureza que deseja que o homem, criado à sua imagem, venha a conhecer a natureza dos céus.⁴¹ Kepler se refere aqui à equivalência entre os diâmetros aparentes do Sol e da Lua e ao fato de que os movimentos aparentes desses astros têm lugar na mesma região do céu, em torno da eclíptica. Esses fatos são considerados por ele indícios de que Deus criou o universo de maneira tal que este fosse inteligível para o homem, tendo em vista a grande importância dos eclipses para o desenvolvimento da astronomia.

A concepção do universo expressa por Kepler no *Mistério* é essencialmente heliocêntrica. O interesse de Kepler pelas ciências astronômicas foi despertado pela descoberta do sistema de Copérnico, nas aulas de Mästlin:

³⁸ *Ac cum in his nihil fiat sine ratione summa, non quidem quae discursu ratiocinationis inueniatur, sed quae primitus in creatoris fuerit consilio, et ab eo principio hucusque per mirabilem facultatum animalium Naturam conseruetur; ne in Niue quidem hanc ordinatam figuram temerè existere credo. Dissertação com o mensageiro das estrelas*, p. 275; KEPLER, 1975, p. 73.

³⁹ Kepler logo percebe que com o copernicanismo deixa de fazer sentido a distinção entre os mundo terrestre e celeste, sobre a qual alicerçava-se a física de Aristóteles, e faz da união dos dois mundos sob uma única ciência um de seus principais objetivos. Mantemos a terminologia tradicional porque ela é empregada por Kepler e torna a discussão mais clara, mas o leitor deve atentar para o fato de que a crítica a essa distinção é um dos traços mais importantes da ciência kepleriana.

⁴⁰ Essa idéia seria retomada em 1610, na *Dissertatio*. Cf. *Dissertação com o mensageiro das estrelas*, p. 308 – 309; GALILEU-KEPLER, 1984, p. 147 – 148.

⁴¹ Cf. *Suplemento a Vitelo*, p. 16; KEPLER, 1980, p. 102. Como observa Otto Neugebauer, os eclipses são, ao lado das relações entre períodos de revolução, os principais fundamentos empíricos de que dispõem os astrônomos da Antigüidade. Cf. NEUGEBAUER, 1983, p. 101.

Desde que, em Tübingen, há seis anos eu estava atento ao esclarecido mestre Michael Mästlin, me preocupavam os múltiplos inconvenientes das concepções usuais [geocêntricas] do mundo, e me satisfazia de tal modo com Copérnico, de quem ele fazia muitas menções em suas lições, que eu não apenas defendia suas opiniões nas disputas dos candidatos em física, mas cheguei a escrever uma meticulosa *disputatio* sobre o primeiro movimento [a rotação do céu de estrelas fixas]⁴², para mostrar que ele surge da revolução da Terra. E eu logo comecei a trabalhar para atribuir à Terra o movimento [observado] do Sol por razões físicas ou, se preferir, metafísicas, como Copérnico havia atribuído por razões matemáticas.⁴³

O primeiro capítulo do *Mistério cosmográfico* é uma justificativa da adesão de Kepler ao copernicanismo. Após um breve parágrafo conciliatório afirmando que as teses ali expostas não entram em conflito com as escrituras⁴⁴, Kepler parte para a defesa do sistema copernicano a partir de argumentos metafísicos, físicos e astronômicos. O primeiro desses argumentos evoca a maior precisão preditiva obtida através do novo sistema:

Visto que neste campo nenhum escrúpulo religioso me tenha impedido, quanto menos de escutar Copérnico, se diz coisas razoáveis, a primeira confiança me foi dada por aquela belíssima conformidade de tudo o que aparece no céu com as sentenças de Copérnico. De modo que ele não apenas demonstrava os movimentos passados, que remontam à mais remota Antiguidade, mas também predizia os

⁴² O primeiro movimento corresponde ao movimento dos astros em torno da Terra em um período de 24 horas (vide o glossário de termos astronômicos).

⁴³ *Quo tempore Tubingae, ab hinc sexennio clarissimo viro M. MICHAELI MAESTLINO operam dabam: motus multiplici incommoitate vsitatae de mundo opinionis, adeo delectatus sum COPERNICO, cuius ille in praelectionibus suis plurimam mentionem faciebat: vt non tantum crebrò eius placita in physicis disputationibus candidatorum defenderem: sed etiam accuratam disputationem de motu primo, quòd Terrae volutione accadat, conscriberem. Iamque in eo eram, vt eidem etiam Telluri motum Solarem, vt COPERNICUS Mathematicis, sic ego Physicis, seu mauis, Metaphysicis rationem ascriberem. Mistério cosmográfico*, p. 9; KEPLER, 1992-a, p. 65.

⁴⁴ Kepler foi aconselhado por seus professores em Tübingen, Mästlin e Haefenreffer, a não se envolver na disputa teológica a respeito da compatibilidade entre o copernicanismo e as escrituras, cf. KEPLER, 1992-a, p. 226, n. 1. Essa defesa, composta para figurar na introdução do *Mistério*, só seria publicada em 1609, na introdução da *Astronomia nova*.

movimentos futuros, e ainda que não com exatidão absoluta, certamente com precisão muito maior que Ptolomeu, Alfonso e os demais.⁴⁵

Isso não é verdade: a precisão das Tabelas Prutênicas de Reinhold, baseadas no sistema de Copérnico, é semelhante à precisão das Tabelas Alfonsinas e Ptolomaicas, ambas baseadas na cosmologia geocêntrica de Aristóteles.⁴⁶ Somente com a publicação de suas *Tábuas Rudolfinas* (*Tabulae Rudolphinae*, 1627) Kepler elevaria o copernicanismo a um nível de precisão superior ao da astronomia ptolomaica. Como observa Thomas Kuhn, a maior precisão das *Tabulae* de Kepler seria um fator importante na conversão de astrônomos ao copernicanismo.⁴⁷ Mas à época da publicação da primeira edição do *Mistério cosmográfico* uma maior precisão preditiva não podia ser apontada como fator de adesão à cosmologia copernicana.

Todavia esse não é o principal motivo alegado por Kepler. Segundo ele, o verdadeiro motivo de sua adesão ao copernicanismo é que “somente Copérnico forneceu uma explicação belíssima desses [movimentos celestes] e eliminou a causa da admiração, que reside na ignorância das causas.”⁴⁸ Chegamos aqui à diferença fundamental que Kepler vê, já no *Mistério cosmográfico*, entre os sistemas de Copérnico e Ptolomeu: embora ambos sejam aptos a reproduzir os movimentos observados no céu, o sistema ptolomaico não corresponde à real estrutura do cosmos, o que se reflete no grande número de mecanismos independentes ali empregados para descrever os movimentos celestes.

A conclusão a partir de premissas falsas é fortuita, e a natureza da [premissa] falsa aparece por si mesma logo que ela é aplicada a outra coisa aparentada, a não ser que

⁴⁵ *Cum igitur hac in parte nulla religione impedirer, quò minùs COPERNICVM, si consentanea diceret, audirem: primam fidem mihi fecit illa pulcherrima omnium, quae in coelo apparent, cum placitis COPERNICI consensio: vt qui non solùm motus praeteritus ex vltima antiquitate repetitos demonstraret, sed etiam futuros antea, non quidèm certissimè, sed tamen longè certiùs, quàm PTOLEMAEVVS, ALPHONSVS, et caeteri, diceret. Mistério cosmográfico*, p. 14; KEPLER, 1992-a, p. 75.

⁴⁶ Cf. GARCÍA, In: KEPLER, 1992-a, p. 226, n. 2.

⁴⁷ Cf. KUHN, 1994, p. 194.

⁴⁸ *... eorum solus COPERNICVS pulcherrimè rationem reddit, causamque admirationis, quae est ignoratio causarum, tollit. Mistério cosmográfico*, p. 14-15; KEPLER, 1992-a, p. 75.

de bom grado permitas que o argumentador admita outras infinitas proposições falsas, e jamais seja consistente na argumentação, ascendente ou descendente.⁴⁹

As outras infinitas proposições falsas são uma referência à proliferação de círculos no sistema de Ptolomeu⁵⁰. Kepler observa que os arranjos de círculos empregados na astronomia ptolomaica são diferentes para cada planeta e têm como única finalidade reproduzir os movimentos celestes observados, e não correspondem aos movimentos reais dos astros no céu.⁵¹ Esse caráter meramente descritivo da astronomia ptolomaica implica na impossibilidade de obtenção de uma explicação unificada para os movimentos de todos os planetas. A astronomia copernicana, por outro lado, graças a sua unidade preditiva, deve corresponder à real estrutura cósmica, possibilitando a criação de uma astronomia capaz de explicar por meio de causas as aparências observadas.

Respondo, em primeiro lugar, que as hipóteses antigas claramente não fornecem explicação alguma de certos aspectos notáveis. De tal modo que desconhecem as causas do número, da quantidade e do tempo das retrogradações, e porque elas se ajustam exatamente dessa maneira com o movimento médio do Sol. Como no sistema de Copérnico aparece, em todas essas coisas, um ordenamento maravilhoso, é necessário que também a causa esteja nele.⁵²

No *Mistério cosmográfico* Kepler também lança sua artilharia contra o sistema misto de Tycho Brahe (vide glossário). O sistema de Tycho havia se popularizado ao final do século XVI por combinar as vantagens astronômicas do copernicanismo, decorrentes do

⁴⁹ *Nam ista sequela ex falsis praemissis fortuita est, et quae falsi natura est, primum atque alij rei cognatae accommodatur, seipsam prodit: nisi sponte concedas argumentatori illi vt infinitas alias falsas propositiones assumat, nec vnquam in progressu, regressuque sibijpsi constet. Mistério cosmográfico*, p. 15; KEPLER, 1992-a, p. 76.

⁵⁰ Sobre a astronomia ptolomaica, ver PEDERSEN, 1996, ÉVORA, 1993 e NEUGEBAUER, 1983.

⁵¹ A distinção entre teorias físicas referentes à real estrutura do mundo e teorias matemáticas destinadas a reproduzir os fenômenos observados, ou ‘salvar as aparências’ foi forjada pelos astrônomos da Grécia Antiga. C. f. CROMBIE, 1971, p. 3 - 8.

⁵² *Respondeo primum, antiquas hypotheses praecipuorum aliquot capitum, nullam planè rationem reddere. Cuiusmodi est, quòd ignorant, numeri, quantitatis, temporisque retrogradationum causas: et quare illae ad amussim ita cum loco et motu Solis medio conueniant. Quibus omnibus in rebus, cum apud COPERNICVM ordo pulcherrimus appareat, causam etiam inesse necesse est. Mistério cosmográfico*, p. 15; KEPLER, 1992-a, p. 76.

arranjo no qual os cinco planetas giram em torno do Sol, com a separação essencial entre os mundos celeste e terrestre na qual baseava-se a física da Antiguidade. No sistema de Tycho a Terra continua ocupando o centro do cosmos, com a Lua e o Sol girando em torno dela. Em torno do Sol giram os planetas. Do ponto de vista puramente astronômico, Kepler reconhece que o sistema de Tycho apresenta as mesmas vantagens que o de Copérnico em relação ao sistema ptolomaico. Porém, de acordo com Kepler a superioridade do sistema de Copérnico não se restringe ao campo da astronomia:

Pois que eu passe da astronomia para a física ou cosmografia, estas hipóteses de Copérnico não apenas não pecam contra a natureza das coisas, mas muito mais as favorecem. Pois ela [a natureza] ama a simplicidade, ama a unidade. Nada de inútil ou supérfluo jamais nela se manifestou, mas freqüentemente uma coisa tem muitos efeitos a ela ligados. Ora, segundo as hipóteses usuais não há limite para a imaginação de círculos; segundo Copérnico, de pouquíssimos círculos seguem muitos movimentos.⁵³

Do ponto de vista físico, no sistema mais simples um maior número de fenômenos pode ser explicado a partir de um mínimo de suposições. Esse deve ser o sistema verdadeiro, pois nele podem operar as relações causais simples que são características do mundo natural. Enquanto no sistema de Tycho há dois centros de movimento, a Terra e o Sol, no sistema de Copérnico todos os movimentos (exceto o da Lua) se dão em torno do corpo solar, que repousa no centro do mundo.⁵⁴ Assim, à simplicidade geométrica do sistema heliocêntrico, capaz de proporcionar uma explicação unificada para fenômenos que antes pareciam não ter conexão entre si, vem somar-se a simplicidade da explicação física que

⁵³ *Nam vt ex Astronomia ad Physicam, siue Cosmographiam deueniam, hae COPERNICI hypotheses non solum in Naturam rerum non peccant, sed illam multò magis iuuant. Amat illa simplicitatem, amat unitatem. Nunquam in ipsa quicquam ociosum aut superfluum extitit: at saepiùs vna res multis ab illa destinatur effectibus. Atqui penes vsitatas hypotheses orbium fingendorum finis nullus est: penes COPERNICVM plurimi motus ex paucissimis sequuntur orbibus.* *Mistério cosmográfico*, p. 16; KEPLER, 1992-a, p. 77. Nesta passagem achamos mais conveniente traduzir orbium com círculos.

⁵⁴ A rigor, no sistema de Copérnico o centro do mundo coincide com o centro da órbita da Terra, ponto situado próximo do Sol. Nesse sentido Kepler é o autor da primeira astronomia propriamente heliocêntrica, porque ele desloca o centro geométrico do mundo para o centro do corpo solar.

pode ser associada a esse sistema. Essa explicação na *Astronomia nova* tomará a forma do conceito matematizado de força solar.

A favor do movimento da Terra Kepler também apresenta um argumento empírico. O período de revolução anual da Terra, igual a 365 dias, é intermediário entre os períodos de Vênus (225 dias) e Marte (687 dias). Copérnico já havia notado a proporcionalidade entre os tamanhos dos orbes e os períodos dos planetas em seu sistema⁵⁵, e é essa proporcionalidade que Kepler procura explicar através da alma motriz solar, conceito do qual trataremos mais adiante.

1.1 O sistema de sólidos geométricos

O objetivo de Kepler no *Mistério cosmográfico* é demonstrar, à luz do copernicanismo, o número, o tamanho e o movimento dos orbes (*Numerus, Quantitas et Motus Orbium*). A grande unidade descritiva proporcionada pelo sistema copernicano sugere a Kepler que exista um ordenamento geométrico subjacente às aparências, responsável pelos principais parâmetros do cosmos, e passível de ser descoberto pelo intelecto humano:

Pois o que se poderia dizer ou imaginar de mais admirável ou mais adaptado à persuasão do que isso, que aquilo que Copérnico estabeleceu a partir dos fenômenos, da observação, dos efeitos, daquilo que é posterior, quase como um cego que firma seus passos com a bengala (como o mesmo Rhetico costumava dizer), em uma conjectura mais afortunada do que confiável, e acreditou que as coisas se dessem assim, eu digo que tudo aquilo seria compreendido e estabelecido com muito mais segurança mediante causas e razões *a priori*, deduzidas a partir da idéia de Criação.⁵⁶

⁵⁵ Cf. SZCZECINIARZ, 1988, p. 252-253.

⁵⁶ *Nam quid admirabilius, quid ad persuadendum accommodatius dici aut fingi potest: quàm, quòd ea, quae COPERNICVS ex παρνομένων, ex effectibus, ex posterioribus, quasi caecus baculo gressum firmans (vt ipse RHETICO dicere solitus est) felici magis quàm confidenti coniectura constituit, atque ita sese habere credidit, ea inquam omnia rationibus à priori, à causis, à Creationis idaea deductis rectissimè constituta esse deprehendantur. Mistério cosmográfico, p. 26; KEPLER, 1992-a, p. 96.*

As causas a que Kepler aqui se refere são geométrico-arquetípicas. Deus criou o mundo a partir de um plano, e este plano é geométrico. O astrônomo pretende descobrir o modelo ou arquetipo matemático de que Deus se serviu na Criação, completando o trabalho iniciado por Copérnico. Kepler cita Platão: “Deus sempre geometrizo”, e afirma ser a quantidade o propósito da criação.⁵⁷ A aplicação de um modelo geométrico na construção do cosmos expressa a primazia da quantidade na criação. Kepler também cita Nicolau de Cusa e a distinção por ele estabelecida entre o reto e o curvo, segundo a qual ao reto está associado ao homem e o curvo a Deus.⁵⁸ Kepler desenvolve essa noção, associando o Deus cristão a uma esfera, a mais perfeita das formas. Deus é bom, e ao criar o mundo o faz a sua imagem, o que explica a forma esférica do mundo limitado pela esfera das estrelas fixas. O Sol corresponde à imagem de Deus Pai, a esfera das estrelas fixas ao Deus Filho, e o espaço intermediário ao Espírito Santo.⁵⁹ Com essa construção, Kepler opera uma síntese entre o copernicanismo e o cristianismo.

Se Deus somente tivesse se servido do curvo ao criar, nada mais existiria além de seu reflexo, o Sol circundado pela esfera das estrelas fixas. Mas Deus também se serve do reto, e por isso existem os planetas. Os planetas têm seus movimentos errantes explicados pelo emprego das quantidades retas na criação. Os sólidos geométricos regulares são as mais perfeitas formas tridimensionais feitas de retas, e por isso foram escolhidos por Deus para estabelecer as relações entre os planetas.

O círculo, obtido cortando-se a esfera com um plano, é o princípio de inteligibilidade da estrutura cósmica. A noção do círculo é a porção divina estampada na mente humana, que por meio dela é capaz de compreender a estrutura geométrica da Criação. É a capacidade de raciocinar geometricamente que faz do homem um ser semelhante a Deus. A geometria de que se serve Kepler no *Mistério cosmográfico* é aquela que pode ser construída com uma régua e um compasso. Os sólidos regulares satisfazem essa condição porque têm seus lados comensuráveis com as esferas neles inscritas e circunscritas,

⁵⁷ Cf. *Mistério cosmográfico*, p. 23; KEPLER, 1992-a, p. 92.

⁵⁸ Cf. *Mistério cosmográfico*, p. 23; KEPLER 1992-a, p. 92.

⁵⁹ Cf. *Mistério cosmográfico*, p. 23-24; KEPLER 1992-a, p. 93.

motivo pelo qual Kepler também os denomina sólidos inteligíveis. Assim, através do círculo e da geometria dele derivada, Kepler cria uma conexão entre a estrutura cósmica, o plano divino e a racionalidade humana.

No sistema proposto por Kepler no *Mistério cosmográfico*, os cinco sólidos regulares⁶⁰ descritos por Euclides no livro X dos *Elementos*, conhecidos como sólidos platônicos, são encaixados entre as esferas que contêm as órbitas dos planetas, conforme a figura 1.1. A idéia de usar os sólidos platônicos para determinar as proporções entre as órbitas dos planetas lhe ocorreu no dia 19 de julho de 1595, durante uma aula do curso de matemática que ministrava no seminário protestante de Graz.⁶¹ Kepler observou que a proporção entre os diâmetros dos círculos inscrito e circunscrito em um triângulo equilátero era igual à proporção entre os diâmetros dos orbes de Júpiter e Saturno. Empregando outros polígonos para determinar as razões entre as órbitas dos demais planetas Kepler não obteve resultados satisfatórios, até perceber que estava lidando com um problema tridimensional e que portanto deveria substituir os polígonos por poliedros ou sólidos regulares.

Saturno

CUBO -----

Júpiter

TETRAEDRO sólidos primários

Marte

DODECAEDRO -----

Terra

ICOSAEDRO sólidos secundários

Vênus

OCTAEDRO -----

Mercúrio

⁶⁰ Os sólidos regulares são definidos por Euclides como aqueles cujas faces são polígonos equiláteros e equiângulos.

⁶¹ Cf. VOELKEL, 1999, p. 29-31; CASPAR, 1993, p.62-63.

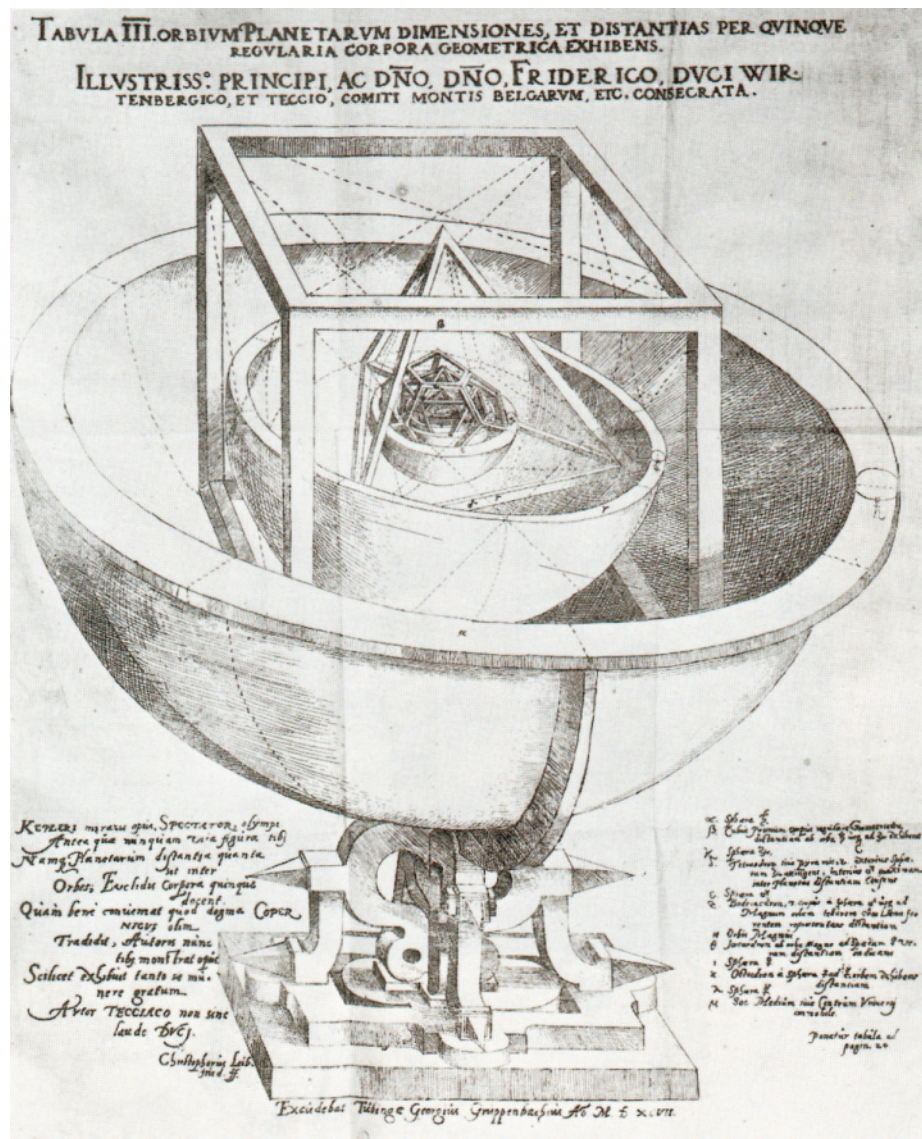


Figura 1.1 O sistema dos sólidos geométricos. *Apud*. COHEN, 1980, p. 52.

No sistema dos sólidos que constitui a tese central do *Mistério Saturno*, o planeta mais externo, tem sua esfera circunscrita em torno de um cubo, o primeiro sólido regular, cujos vértices contêm três linhas ortogonais, representando as três dimensões espaciais. Neste cubo está inscrita a esfera de Júpiter, que por sua vez circunscreve um tetraedro, o segundo sólido mais perfeito, também com três linhas por vértice e formado a partir do cubo. A esfera inscrita no tetraedro contém a órbita de Marte, e nela está inscrito um dodecaedro, o terceiro dos sólidos principais, composto de partes do cubo semelhantes ao

tetraedro. A esfera contida no dodecaedro contém a órbita da Terra e circunscreve um icosaedro, o primeiro dos sólidos regulares secundários, cujos vértices contêm mais de três linhas. A Terra, planeta habitado pelo Homem, distingue duas regiões no Cosmos, a região exterior preenchida por sólidos primários, mais perfeitos, e a região interior preenchida pelos sólidos secundários. Isso revela a posição de certo modo ainda privilegiada ocupada pela Terra. Inscrita no icosaedro está a esfera de Vênus. Nesta esfera está inscrito um octaedro no qual está inscrita a esfera que contém a órbita de Mercúrio. No centro do mundo está o Sol, onde reside a causa dos movimentos de todos planetas.

A interposição dos sólidos entre os orbes explica geometricamente as distâncias entre eles. O modelo também explica o número de planetas conhecidos à época de Kepler. São cinco e apenas cinco os sólidos regulares (conforme o escólio da proposição 18 do livro 13 dos *Elementos*): cubo, tetraedro, octaedro, icosaedro e dodecaedro. Os planetas são seis porque seis é o número de orbes que podem ser encaixados entre os cinco sólidos

1.2 A alma motriz do Sol

A teoria dos orbes sólidos não deve ser falsamente interpretada como se Kepler conferisse existência física a essas estruturas. Ao contrário, no *Mistério cosmográfico* ele já rejeita a solidez dos recém-introduzidos sólidos regulares: “Pois é absurdo e monstruoso situar estes corpos no céu providos de alguma materialidade de modo que impeçam a passagem de outros corpos...”⁶² Essas considerações físicas respondem à recente comprovação da inexistência dos orbes sólidos por Tycho Brahe, que através de medidas de paralaxe de um cometa visível entre 13 de novembro de 1577 e 26 de janeiro de 1578 havia concluído que a ausência de paralaxe observável significava que o cometa estaria situado na região celeste, muito acima da esfera da Lua. Tycho afirma no *Dos fenômenos recentes do mundo etéreo* que a órbita do cometa é uma elipse muito alongada, que quebraria os orbes caso eles fossem sólidos. Mas Tycho não rejeita os orbes sólidos apenas porque a observação dos cometas o levou a fazê-lo. Ele também é

⁶² Nam absurdum et *Mistério cosmográfico*, p. ; KEPLER 1992-a, p. 165-166.

motivado pela configuração do seu sistema de mundo, no qual o orbe de Marte atravessa o orbe de Sol. Se existissem orbes sólidos ligados aos planetas, então o sistema de Tycho seria irrealizável fisicamente.

Quando Tycho recebe uma cópia do *Mistério* enviada por Kepler, ele responde ao autor enviando uma carta, datada do dia 1º de abril de 1598. Na carta, Tycho elogia o conteúdo do livro, mas critica severamente o suposto emprego dos orbes sólidos.⁶³ A acusação é injusta, já que Kepler desde o início rejeita a materialidade dos orbes, bem como dos sólidos regulares.

A explicação por ele tecida para os movimentos planetários com efeito pressupõe a inexistência dos orbes sólidos. Uma vez eliminadas essas estruturas, os movimentos dos planetas devem receber alguma outra explicação física, que Kepler provê com a introdução do conceito de alma motriz solar:

Pois assim como a fonte da luz está no Sol, e a origem do círculo está no lugar do Sol, isto é, no centro, assim aqui a vida, o movimento e a alma do mundo são recolhidos nesse mesmo Sol, de modo que caiba às [estrelas] fixas o repouso, aos planetas os atos segundos dos movimentos e ao Sol o próprio ato primeiro, que é incomparavelmente mais nobre do que os atos segundos em todas as coisas. E não é de maneira distinta que o mesmo Sol sobressai amplamente em relação a todos os demais [astros] pela beleza de seu aspecto, pela eficácia de sua força e pelo esplendor de sua luz.⁶⁴

Esse texto evoca a famosa passagem do primeiro livro do *De Revolutionibus*:

No meio de todos encontra-se o Sol. Ora quem haveria de colocar neste templo, belo entre os mais belos, um tal luzeiro em qualquer outro lugar melhor do que

⁶³ Cf. K.G.W. XIII p. 197-202.

⁶⁴ *Sicut igitur fons Lucis in Sole est, et principium circuli in loco Solis, scilicet in centro: ita nunc vita, motus et anima mundi in eundem Solem recidit: vt ita fixarum sit quies, Planetarum actus secundi motuum; Solis actus ipse primus: qui incomparabiliter nobilior est actibus secundis in rebus omnibus: non secus atque Sol ipse et speciei pulchritudine, et virtutis efficacia, et lucis splendore caeteris omnibus longuè praestat.* *Mistério cosmográfico*, p. 70; KEPLER, 1992-a, p. 193-194.

aquele donde ele pode alumiar todas as coisas ao mesmo tempo? Na verdade, não sem razão, foi ele chamado o farol do mundo por uns e por outros a sua mente, chegando alguns a chamar-lhe o seu Governador. [Hermes] Trimegisto apelidou-o de Deus visível, e Sófocles em *Electra*, o vigia universal. Realmente o Sol está como que sentado num trono real, governado a sua família de astros, que giram à volta dele.⁶⁵

O registro mais antigo de que dispomos dessa idéia de estabelecer uma relação causal entre a distância ao Sol e os períodos dos planetas está em uma carta a Mästlin datada de 14 de setembro de 1595.⁶⁶ Em primeiro lugar, Kepler estabelece uma relação causal entre o Sol e os movimentos dos planetas. Se o Sol é um astro tão notável, se ele ocupa o centro do mundo e o ilumina, parece razoável para Kepler supor que ele seja responsável pelos movimentos dos planetas. Essa causalidade é estabelecida pela introdução de uma alma motriz situada no Sol, que vem substituir as almas de cada planeta.

As tabelas de Copérnico mostram uma relação entre os períodos e as distâncias dos planetas ao Sol. Kepler observa que os períodos dos planetas não são proporcionais aos raios de suas órbitas, o que deveria acontecer se todos os planetas estivessem sujeitos à mesma ação do Sol. Ele reproduz no *Mistério* uma tabela, da qual pode ser extraída a relação entre as distâncias dos planetas ao Sol e suas respectivas velocidades.⁶⁷

Períodos dos planetas (dias)

	Saturno	Júpiter	Marte	Terra	Vênus	Mercúrio
Saturno	<u>10759,12</u>					
Júpiter	6159	<u>4332,37</u>				
Marte	1785	1282	<u>686,59</u>			
Terra	1174	843	452	<u>365,15</u>		
Vênus	844	606	325	262 30	<u>224,42</u>	
Mercúrio	434	312	167	135	115	<u>87,58</u>

⁶⁵ COPÉRNICO, 1984, p. 52-53.

⁶⁶ Cf. K.G.W., XIII, p. 33.

⁶⁷ *Mistério cosmológico*, p. 69; KEPLER, 1992-a, p. 192.

A diagonal da tabela traz os períodos dos planetas, igual a 10759,12 dias (terrestres) para Saturno, 4332,37 dias para Júpiter, 686,59 dias para Marte, etc. Os números situados abaixo do período de cada planeta representam os períodos que os planetas interiores a ele teriam caso descrevessem seus percursos em torno do Sol com velocidade igual à do planeta em questão. Assim, 6159 dias seria o período de Júpiter caso ele fosse tão lento quanto Saturno, 1785 seria o período de Marte com a mesma velocidade, 1174 o período da Terra, etc.

Isso significa que o aumento nos períodos dos planetas com o aumento da distância ao Sol não resulta apenas do aumento nos raios das órbitas, mas também de uma correspondente diminuição nas velocidades. Os planetas mais externos descrevem seus percursos anuais com velocidade superior àquela dos planetas mais internos, e a diminuição da velocidade translacional média dos planetas com o aumento da distância ao Sol é linear.⁶⁸

A distância tem portanto um duplo efeito: aumentar o tamanho da órbita – proporcional ao raio, e atenuar a alma motriz, também linearmente com o raio. Inicialmente, Kepler propõe que o veículo através do qual o Sol causa os movimentos dos planetas seja a própria luz, mas as observações mostram que os planetas não têm seus movimentos alterados quando sofrem ocultações da luz solar pela interposição de um outro planeta, por ocasião dos eclipses. Kepler introduz então uma segunda entidade imaterial, emanada do Sol juntamente com a luz com o objetivo expresso de mover os planetas. Imaginando que esse princípio de movimento se propague no espaço e se difunda da mesma maneira que a luz, Kepler deduz que a sua atenuação, como aquela da luz, é linear com a distância ao Sol.⁶⁹ Por esse expediente, ele explica a dependência entre os períodos de revolução tabelados e a distância que separa cada planeta do Sol.⁷⁰

⁶⁸ *Mistério cosmográfico*, p. 69; KEPLER, 1992-a, p. 192.

⁶⁹ À época da redação do *Mistério cosmográfico* Kepler ainda não havia descoberto a lei de atenuação da luz com o quadrado da distância à fonte. Uma das grandes contribuições de Kepler para a óptica, a determinação da forma correta da atenuação da luz é apresentada no *Suplemento a Vitelo*, publicado em 1604. No livro, Kepler define a luz como uma superfície esférica em expansão sem sofrer perdas, e deriva a sua intensidade a

Kepler também explica as variações de velocidade reproduzidas pelo equante de Ptolomeu (vide glossário) a partir da idéia de alma motriz solar.⁷¹ Essa idéia, que também será desenvolvida na *Astronomia nova*, é detalhadamente discutida por nós no sexto capítulo do presente trabalho. A introdução da alma motriz solar remove provisoriamente a necessidade de atribuir aos próprios planetas as causas de seus movimentos.⁷² Somente o Sol conserva uma alma motriz, responsável pelo movimento de todos os planetas que o circundam. Às estrelas fixas corresponde o repouso, aos planetas o ato segundo dos movimentos impressos pelo Sol, e ao Sol, alma do mundo, o ato primeiro de causar todos os movimentos.

Na cosmologia do *Mistério cosmográfico*, o Sol possui portanto um estatuto radicalmente diferente daquele dos planetas. Centro geométrico e físico do mundo, fonte da luz e do calor e causa dos movimentos celestes, o Sol é o reflexo no mundo físico do Deus Criador. Astronomicamente, isso se reflete na substituição do sol médio pelo sol aparente como ponto de referência na determinação das posições dos astros. Copérnico efetuara uma inversão no sistema ptolomaico, deslocando a Terra do centro e colocando-a a girar junto com os outros planetas em torno do Sol. Contudo, por uma questão de simplicidade computacional, Copérnico empregou, nos cálculos das distâncias mínimas e máximas dos planetas ao centro do sistema, não o corpo solar (o sol aparente), mas o sol médio, o ponto vazio de corpo correspondente ao centro da órbita da Terra.⁷³ Kepler adverte que o objetivo de Copérnico era ocupar-se de astronomia, e não de física celeste, e insiste na necessidade da substituição do sol médio pelo sol aparente. Como veremos no quinto capítulo deste trabalho, essa idéia será retomada na *Astronomia nova*.

uma distância 'r' da fonte a partir da área da superfície esférica correspondente, dada por $4 \pi r^2$. Cf. *Suplemento a Vitelo*, p. 22; KEPLER, 1980, p. 112. Discutimos a exposição da natureza da luz no primeiro apêndice anexado a este trabalho.

⁷⁰ Cf. *Mistério cosmográfico*, p. 71; KEPLER, 1992-a, p. 194.

⁷¹ Cf. *Mistério cosmográfico*, p. 75-77; KEPLER, 1992-a, p. 208-211.

⁷² Veremos nos capítulos seguintes que a ação do Sol causa um movimento circular simples. A explicação dos detalhes das órbitas dos planetas envolve o recurso a outras relações de causalidade além daquela situada no Sol.

⁷³ Cf. *Mistério cosmográfico*, p. 50-51; KEPLER, 1992-a, p. 158-159.

No *Mistério cosmográfico* Kepler não chega à forma correta da lei que relaciona os quadrados dos períodos de revolução dos planetas com os cubos de suas distâncias relativas ao Sol. Aqui ele conclui simplesmente que, dados dois planetas, a relação entre o período do planeta mais externo e o período do planeta mais interno depende do dobro da diferença das distâncias ao Sol. A lei correta só será obtida anos mais tarde, em 1619, na *Harmonia do mundo*, através de uma analogia com os intervalos musicais.

Capítulo 2 – O estatuto da astronomia na *Defesa de Tycho contra Ursus*

Parece seguro afirmar que a *Defesa de Tycho contra Ursus*, composta por volta do Natal de 1600⁷⁴, é um dos textos fundadores da história e da filosofia da ciência. “A primeira exploração da história e da estrutura lógica das hipóteses astronômicas”, segundo Edward Rosen⁷⁵. De acordo com Jardine,

Asserções concernentes às origens dos gêneros e disciplinas inevitavelmente introduzem simplificações na descrição de processos complexos e são vulneráveis à descoberta de documentos mais antigos. No entanto, eu conjecturo que se algum trabalho pode ser tomado como o marco do nascimento da história e filosofia da ciência como um modo distinto de reflexão acerca do estatuto da ciência natural, este trabalho é a *Defesa* de Kepler.⁷⁶

No texto o astrônomo apresenta uma pequena história da astronomia, introduzida por uma exposição bastante detalhada de suas concepções teóricas sobre a natureza das hipóteses astronômicas, a possibilidade de conhecimento dos céus e o método adequado para se chegar a esse conhecimento. As circunstâncias que levaram Kepler a escrever a *Defesa de Tycho* merecem ser rapidamente lembradas. No final de 1595 Kepler escreve a Ursus⁷⁷, perguntando a opinião do então matemático imperial sobre o sistema dos sólidos geométricos que seria publicado no *Mistério cosmográfico*. Nesta carta Kepler escreve, em meio a uma série de elogios, a frase fatídica: ‘eu admiro a sua hipótese.’ Em 1596, Tycho acusa Ursus publicamente não apenas de ter plagiado o seu sistema de mundo, mas também Christopher Rothmann (1550 - c.1608), Paul Wittich (c. 1546 - 1586) e outros matemáticos alemães, além de ter furtado documentos no observatório de Uraniburgo. Em 1597 Ursus responde ferozmente com a publicação do seu *Tractatus*, onde ele ataca Tycho Brahe ao mesmo tempo em que procura promover uma atitude cética na

⁷⁴ O texto latino da *Defesa de Tycho* acompanhado de uma tradução para o inglês e de uma série de ensaios acerca de sua composição e de seu significado encontram-se em JARDINE, 1988. Sobre o estabelecimento da data de composição da *Defesa de Tycho* ver JARDINE, 1988, p. 9.

⁷⁵ ROSEN, 1986, p. 15.

⁷⁶ JARDINE, 1988, p. 1-2.

⁷⁷ Nicolaus Raimarus Ursus ou Nicolai Raymers Baer (? – 1600), também conhecido como Ursus Dithamarsus em referência a sua cidade natal, Ditmar, precedeu Tycho Brahe como matemático imperial na corte de Rudolfo II.

astronomia.⁷⁸ O principal ataque a Tycho é o de tê-lo plagiado no seu sistema de mundo misto.⁷⁹ No *Tractatus Ursus* reproduz a tal carta de Kepler como uma indicação de que há astrônomos que o subscrevem na polêmica contra Tycho. Após uma longa série de cartas e eventos⁸⁰, e apesar da morte de Ursus, ficou acertado que chegando a Praga a primeira tarefa de Kepler seria a composição da *Defesa de Tycho*.

A *Defesa de Tycho* é incompleta e só seria publicada em 1858, na edição de Frisch das obras completas de Kepler⁸¹. Ela é composta de quatro capítulos. O primeiro estabelece a noção kepleriana de hipótese astronômica, ao mesmo tempo em que combate a posição defendida por Ursus no *Tractatus*. Nos três capítulos seguintes Kepler defende Tycho Brahe da acusação de plágio por meio de uma refutação da história da astronomia apresentada por Ursus no *Tractatus*.

No prefácio ao leitor Kepler acusa Ursus de ter-se apropriado do modelo misto de Tycho Brahe⁸², no qual a Terra ocupa o centro do mundo e é circundada pela Lua e pelo Sol, em torno do qual giram os seis planetas (vide glossário).⁸³ Entretanto, embora tenha sido redigida com o objetivo de refutar a exposição oferecida por Ursus no *Tractatus*, a *Defesa de Tycho* tem um interesse muito mais amplo. O argumento de Kepler ataca a hipótese de Ursus naquilo em que ela supostamente difere da de Tycho não do ponto de vista astronômico (a atribuição do primeiro movimento à Terra), mas de um ponto de vista metafísico. De acordo com Kepler a astronomia de Ursus é inferior àquela de Tycho porque ela não pretende dar conta da real estrutura do mundo.

⁷⁸ Cf. JARDINE, 1988, p. 29-36.

⁷⁹ A atribuição do sistema misto a Tycho Brahe não é livre de controvérsias, e é possível que Ursus seja inocente da acusação de plágio. Cf. ROSEN, 1986, p. 161-181; CHRISTIANSON, 2003, p. 308; JARDINE, 1988, p. 30-31.

⁸⁰ A história completa é contada por JARDINE, 1988, p. 9-28, por ROSEN, 1986 e por TOSSATO, na introdução a BRAHE, 2004.

⁸¹ K.O.O. I, p. 236-76.

⁸² Cf. KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 85-86; 134-135.

⁸³ O sistema de Tycho difere sutilmente daquele de Ursus. Ursus atribui o primeiro movimento à rotação diária da Terra, enquanto Brahe segue Aristóteles e atribui a rotação diária à esfera das estrelas fixas.

O pequeno texto é um manifesto em favor da tese de que o objetivo do astrônomo é descobrir a verdade. Kepler apresenta uma exposição teórica de teses concernentes à possibilidade de conhecimento da real estrutura do mundo e da maneira como se deve proceder nas ciências astronômicas, além de uma história da astronomia onde transparecem suas concepções relativas ao estatuto das ciências astronômicas e ao método próprio dessa ciência.

A atitude de Kepler diante da astronomia pode ser classificada como realista em oposição ao ficcionalismo⁸⁴ de Ursus, desde que se tenha em mente que esses termos pertencem à filosofia da ciência contemporânea e não são empregados pelos astrônomos do século XVII. O realismo de Kepler está intimamente ligado a sua interpretação particular do sistema proposto por Copérnico. A descoberta da estrutura heliocêntrica subjacente às aparências observadas e a explicação dessa estrutura a partir de causas físicas e geométricas constituem o objetivo primordial de sua astronomia. Esse objetivo é transportado do *Mistério cosmográfico* para a *Astronomia nova*, e mantém uma ligação clara entre as duas obras a despeito das diferenças metodológicas que as distinguem.

2.1 Da natureza das hipóteses astronômicas

O primeiro capítulo da *Defesa* é intitulado “O que é uma hipótese astronômica”.⁸⁵ Segundo Kepler, a origem da palavra hipótese (ὑποθέσεις) remontaria aos geômetras gregos.⁸⁶ O termo abarcava então três tipos de princípios admitidos nas demonstrações da geometria: axiomas, postulados e as premissas das demonstrações por absurdo. Kepler segue fontes clássicas, como o *Comentário ao primeiro livro dos Elementos de Euclides*, de Proclus, os *Segundos analíticos* e a *Retórica*, de Aristóteles.⁸⁷

Os primeiros princípios que, a exemplo da fundação de uma casa, sustentam o edifício da geometria, são os axiomas. Esses princípios são certos e aceitos por todos, e não são

⁸⁴ Empegamos esse termo estranho a Kepler para expressar a atitude cética assumida por Ursus diante da possibilidade de conhecimento dos céus.

⁸⁵ *Quid sit hypothesis astronomica*. KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 87; 136.

⁸⁶ Cf. KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 87; 137.

⁸⁷ Cf. JARDINE, 1988, p. 137, n.30.

demonstrados. Os postulados são proposições demonstráveis, mas cujas demonstrações são consideradas suficientemente evidentes para serem omitidas. Finalmente, há as proposições que são sabidamente falsas e que são assumidas como verdadeiras no início das demonstrações por absurdo.⁸⁸ Da geometria o termo teria sido tomado de empréstimo pela lógica e por outras as ciências, entre elas a astronomia. Qualquer que seja o sujeito tratado, a premissa de um silogismo é uma hipótese e, em longas demonstrações, constituídas por longas cadeias de proposições, o termo é reservado para as premissas dos primeiros silogismos.⁸⁹

Neste ponto Kepler apresenta a definição de hipótese por ele aceita: “hipótese é tudo o que é admitido como certo e demonstrado no início de qualquer demonstração.”⁹⁰ Essa definição de hipótese compreende os três significados atribuídos ao termo pelos geômetras gregos, ao mesmo tempo em que já deixa transparecer a atitude de Kepler, oposta àquela sustentada por Ursus nas primeiras linhas do *Tractatus*:

Uma hipótese ou suposição fictícia é um retrato de uma forma imaginária do sistema de mundo inventado a partir de certos círculos imaginários, projetada para reproduzir os movimentos celestes e concebida, adotada e introduzida com o propósito de acompanhar e salvar os movimentos dos corpos celestes, constituindo um método para o seu cômputo. (...) Essas hipóteses inventadas nada são além de certas construções que nós imaginamos e empregamos para retratar o sistema de mundo.⁹¹

Segundo Kepler, Ursus teria dito que “é típico das hipóteses gerar conhecimento da verdade a partir daquilo que é falso”.⁹² Essa visão seria decorrente de uma compreensão errônea do significado original do termo grego *hupotithesthai* (ὑποτίθεσθαι), como

⁸⁸ Cf. KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 87-88; 137-138.

⁸⁹ Cf. KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 88; 139.

⁹⁰ *Hypothesin autem in genere dicimus, quicquid ad quamcunque demonstrationem, pro certo et demonstrato affertur.* KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 88; 138. Algumas páginas adiante, Kepler escreverá: “Pois isto é próprio das hipóteses (se fazemos uma idéia adequada das hipóteses), que sejam verdadeiras em todos os aspectos. (et proinde hypothesibus hoc est proprium (si ideam fingamus justarum hypothesium) ut sint undiquaque verae...) KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 93; 143.

⁹¹ URSUS, In: JARDINE, 1988, p. 41.

⁹² *Item, proprium esse hypothesium ex falso verum sciscitarj...* KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 92; 144.

sinônimo de ‘fingir’ (*fingere*).⁹³ A posição de Kepler é estritamente realista e sua argumentação é construída com o intuito de demonstrar que as hipóteses devem necessariamente ser verdadeiras e que hipóteses falsas não podem implicar em resultados coerentes quando aplicadas a um conjunto suficientemente amplo de observações.

Quanto às hipóteses astronômicas, elas tradicionalmente designam, nos diz Kepler, “a opinião sobre a forma do universo que cada um dos filósofos derivou de sua inspeção dos céus”⁹⁴, isto é, os grandes sistemas de mundo (vide glossário). Cada sistema reúne uma totalidade de proposições defendidas por algum praticante célebre, das quais são derivados os movimentos celestes passados e futuros. As hipóteses astronômicas incluem as observações e todas as premissas físicas e geométricas empregadas na derivação dos movimentos dos astros, sejam estas provenientes da observação ou emprestadas de outras ciências.

Tendo definido o que são as hipóteses astronômicas, Kepler parte para a análise dos aspectos que caracterizam as hipóteses astronômicas legítimas. Em primeiro lugar ele considera que o objetivo da astronomia, a exemplo do que ocorre em outras ciências, é atingir a verdade. Mas a verdade só pode ser encontrada se as premissas do silogismo, isto é, as hipóteses, forem verdadeiras: “Além disso, para que a verdade seja legitimamente inferida as premissas do silogismo, isto é, as hipóteses, devem necessariamente ser verdadeiras.”⁹⁵

No *Mistério* Kepler havia afirmado que uma premissa falsa só implica na verdade às vezes e por acaso, e que a falsidade se torna evidente quando a premissa é aplicada a outro problema correlato.⁹⁶ Aqui, esse argumento que havia sido mobilizado em um ataque a Ptolomeu, é amplamente desenvolvido no ataque a Ursus. Como os mentirosos que não se lembram do que disseram, as hipóteses falsas acabam por se trair, pois os

⁹³ Cf. KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 92; 144.

⁹⁴ *...ut quam quisque philosophorum ex intuitu caeli, de mundi dispositione concepisset opinionem, ea nomen aliquod haberet, Hypotesisque diceretur.* KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 87; 136.

⁹⁵ *Porro ut verum concludatur legitime propositiones in syllogismo, hoc est hypotheses veras esse necesse est.* KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 89; 139.

⁹⁶ Cf. *Mistério cosmológico*, p. 15; KEPLER, 1992-a, p. 76.

erros nelas contidos são transportados nos silogismos delas derivados.⁹⁷ Desse modo, Kepler conclui, os autores das hipóteses astronômicas não adotam premissas falsas deliberadamente, ou eles deveriam esperar que resultados falsos fossem delas derivados.

Se isso é verdade, se não é possível que conclusões verdadeiras decorram de hipóteses falsas, então a existência de hipóteses diferentes (e mesmo excludentes) capazes de dar conta dos movimentos celestes observados deve ser explicada. Kepler tem em mente um problema bem definido. Como astrônomo de profissão ele sabe que a astronomia tradicional, sintetizada no *Almagesto* de Ptolomeu, é muito eficiente na descrição e predição dos movimentos observados no céu.⁹⁸ Porém, todo o seu projeto astronômico é baseado no estabelecimento do copernicanismo como a verdadeira estrutura do mundo, e na crença profunda de que somente esse conhecimento pode possibilitar a constituição de uma astronomia matemática arbitrariamente precisa. O fato de que os três grandes sistemas sejam capazes de descrever com aproximadamente a mesma precisão os fenômenos observados a princípio parece entrar em contradição com uma visão realista da astronomia, e na *Defesa* Kepler pretende mostrar que o sucesso da astronomia tradicional não decorre propriamente do geocentrismo, mas da representação geométrica dos movimentos relativos dos planetas que é por ele fornecida.

A solução oferecida por Kepler possibilita a conciliação do inegável sucesso preditivo da astronomia antiga com a atitude realista frente ao heliocentrismo que é a marca de sua astronomia física. De um modo geral, é possível que hipóteses diferentes logrem descrever um mesmo fenômeno, mas essas hipóteses vão necessariamente implicar em conseqüências distintas quando outros aspectos forem analisados à luz delas. Essas conseqüências particulares de cada hipótese podem se manifestar tanto no domínio da geometria quanto no domínio da física celeste.

⁹⁷ Cf. KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 89; 140.

⁹⁸ A distinção entre teorias físicas referentes à real estrutura do mundo e teorias matemáticas destinadas a reproduzir os fenômenos observados, ou 'salvar as aparências' foi forjada pelos astrônomos da Grécia Antiga. C. f. CROMBIE, 1971, p. 3 - 8.

É possível, por exemplo, derivar os deslocamentos diários dos planetas a partir dos sistemas geocêntrico e copernicano. Porém, no sistema geocêntrico os planetas se mantêm a uma distância aproximadamente constante da Terra, e as variações observadas nos seus diâmetros aparentes não recebem uma explicação adequada. Já o sistema copernicano prevê distâncias bastante variáveis entre a Terra e os planetas, dependendo das posições relativas entre eles e o Sol. E, o que é mais importante, a maneira como se dá a variação observada coincide com a previsão do sistema de Copérnico, visto que o diâmetro aparente de um planeta como Marte deve ser máximo quando ele é visto em oposição ao Sol (o que significa que a Terra e o planeta encontram-se na mesma região do sistema solar - vide glossário).⁹⁹

Este exemplo mostra que duas hipóteses equivalentes no que diz respeito à descrição de um determinado fenômeno revelam-se distintas quando outros aspectos geométricos do problema são envolvidos – no caso, embora os dois sistemas de mundo reproduzam os movimentos planetários observados, as distâncias relativas entre os corpos constituintes do mundo dependem do sistema adotado. Porém, ainda que do ponto de vista geométrico as duas hipóteses se revelem perfeitamente equivalentes em todos os aspectos, em todo caso a interpretação física associada a cada uma delas será distinta: “pois ainda que as conclusões de duas hipóteses possam coincidir [no domínio] da geometria, qualquer uma delas vai ter os seus próprios corolários [no domínio] da física.”¹⁰⁰ Por exemplo, supondo que o sistema de Tycho Brahe seja equivalente ao de Copérnico com relação à predição das coordenadas celestes aparentes dos astros, as duas hipóteses ainda diferem do ponto de vista físico, como no que diz respeito à dimensão da esfera das estrelas fixas, que é muito maior no sistema de Copérnico do que naquele de Tycho.¹⁰¹

⁹⁹ Cf. KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 90; 141.

¹⁰⁰ *Nam si in Geometricis duarum hypotesium conclusiones coincidant, in physicis tamen quaelibet habebit suam peculiarem appendicem.* KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 90; 141-142.

¹⁰¹ Este é um dos principais argumentos levantados contra o sistema de Copérnico à época de Kepler. Se a Terra gira em torno do Sol, então deveria haver alguma paralaxe anual observável nas estrelas fixas, a não ser que estas estivessem muito mais afastadas do que então se acreditava. A paralaxe estelar é de fato muito pequena devido à grande distância que separa o Sol das estrelas mais próximas, e foi medida pela primeira vez por Bessel, no séc. XVIII. A estrela mais próxima do Sol, Proxima centauri, tem uma paralaxe anual de apenas 0,76 segundos de grau, indetectável mesmo para o grande observador Tycho Brahe.

Mesmo no domínio da astronomia geométrica, o fato de os mesmos movimentos aparentes poderem ser derivados de hipóteses diferentes não significa que a verdade possa ser extraída a partir de premissas falsas. Consideremos o exemplo do primeiro movimento (vide glossário): Ptolomeu o atribui à rotação diária da esfera das estrelas fixas no sentido Leste-Oeste em torno da Terra imóvel, enquanto Copérnico recorre à rotação da Terra no sentido contrário, também em vinte e quatro horas, mantendo a esfera das estrelas em repouso. Em ambos os sistemas (ou hipóteses astronômicas) o fenômeno do movimento diário dos astros é adequadamente reproduzido. Não é verdade porém que Ptolomeu tenha derivado conclusões corretas a partir de premissas falsas. Uma análise mais acurada dos parâmetros geométricos envolvidos na representação dos movimentos celestes aparentes revela que as teses da centralidade e do repouso da Terra não entram diretamente na dedução desses movimentos. É o movimento relativo entre a Terra e o céu de estrelas fixas que aparece, em ambos os sistemas, como o movimento diário dos astros de Leste para Oeste. Não há derivação de conclusões semelhantes a partir de premissas diferentes; a obtenção dos mesmos resultados nos dois sistemas só é possível porque do ponto de vista geométrico as hipóteses de Copérnico e de Ptolomeu são equivalentes, mesmo que do ponto de vista físico a diferença entre elas seja evidente. Em outras palavras, as duas hipóteses não produzem um mesmo resultado a partir daquilo que as distingue, mas porque, no que diz respeito à obtenção daquele resultado, elas pertencem a um mesmo gênero. Do ponto de vista da física celeste o sistema de Copérnico difere daquele de Ptolomeu em uma série de aspectos fundamentais, mas esses aspectos não são considerados na representação do primeiro movimento.¹⁰²

Trocando em miúdos, se é constatado que sistemas diferentes podem reproduzir as mesmas aparências, isso só é possível porque a diferença entre os sistemas não compreende os pressupostos dos quais foram deduzidas essas aparências. Hipóteses aparentemente diferentes que produzem o mesmo resultado geralmente têm um termo médio comum, e é esse termo médio que está na origem da demonstração. A aplicação das mesmas hipóteses a outros problemas torna possível a identificação das

¹⁰² Cf. KEPLER, In: JARDINE, p. 91; 142.

consequências particulares de cada uma, e permite que se decida qual delas é a verdadeira.

Em astronomia, toda conclusão não é obtida senão a partir de um mesmo e único termo médio, e pressupõe uma hipótese que tem uma só forma, ainda que esta seja diferenciada [em hipóteses aparentemente distintas] quando considerada fora desta demonstração. E por sua vez qualquer hipótese, se a considerarmos cuidadosamente, produz conclusões que são inteiramente suas próprias e que não são comuns a nenhuma outra hipótese. Nem pode suceder em astronomia que seja verdadeiro em todos os aspectos aquilo que foi deduzido de uma hipótese originalmente falsa.¹⁰³

A distinção entre hipóteses astronômicas e geométricas explica dentro do quadro realista da astronomia kepleriana a possibilidade de que duas construções geométricas diferentes reproduzam o mesmo fenômeno. Kepler classifica como astronômicas as hipóteses referentes à real estrutura do mundo, ainda que estas sejam mais restritas do que os grandes sistemas. O termo hipótese astronômica possui portanto para Kepler um duplo significado: ele significa qualquer asserção referente à real natureza dos céus que sirva como base nas demonstrações astronômicas ao mesmo tempo em que conserva o antigo sentido de sistema de mundo.¹⁰⁴

O teorema de Apolônio (vide glossário) demonstra a equivalência entre um excêntrico e um concêntrico com epiciclo, desde que os círculos sejam construídos com dimensões e velocidades apropriadas. Também neste caso duas hipóteses aparentemente excludentes implicam no mesmo resultado: o fato de que os astros passam mais tempo próximos ao apogeu do que ao perigeu. Mas assim como no exemplo precedente, também aqui as duas hipóteses implicam em um mesmo resultado graças àquilo que elas têm em comum, e não a partir daquilo que as diferencia. Mais uma vez é um mesmo termo médio que está, em

¹⁰³ *Omnis in astronomia conclusio non nisi ab uno et eodem medio perficitur, et uniformem praemittit hypothesin: etsi illa a seipsa differat, quatenus extra hanc demonstrationem consideratur. Et vicissim, quaelibet hypothesis, si accurate consideremus, propriam nec ulli alij hypothesi communem penitus producit conclusionem: Nec fieri potest in astronomia, ut ex omni parte verum sit, quod ex falsa primitus hypothesi fuit extructum...* KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 92.

¹⁰⁴ Cf. KEPLER, In: JARDINE, p. 89, 98; 139, 153.

cada caso, por trás da demonstração: o fato de que o planeta atravessa porções diferentes do seu percurso em cada metade do círculo zodiacal, e que a porção atravessada nas vizinhanças do apogeu é maior do que aquela atravessada nas vizinhanças do perigeu, o que produz uma variação aparente na velocidade do planeta mesmo que ele se desloque com velocidade uniforme.¹⁰⁵ O excêntrico e o concêntrico com epiciclo são construções ou hipóteses geométricas destinadas a reproduzir a hipótese propriamente astronômica da variação aparente de velocidade do planeta ao longo do círculo zodiacal. Os outros aspectos desses modelos geométricos são irrelevantes na demonstração, e é isso que explica a obtenção de um mesmo resultado a partir de duas premissas aparentemente diferentes.¹⁰⁶

Apolônio foi um geômetra.¹⁰⁷ O seu teorema mostra a equivalência entre duas construções geométricas, e não entre duas hipóteses astronômicas. Já o astrônomo, este se serve de construções geométricas para expressar as suas concepções acerca do sistema do mundo, derivadas a partir das observações e suportadas pela física. É a ausência dessa componente física que diferencia as hipóteses geométricas das hipóteses astronômicas. As hipóteses geométricas são ferramentas empregadas pelos astrônomos que tomadas em si mesmas não dizem respeito à real estrutura do céu, mas somente à representação matemática das aparências dela resultantes.

No teorema de Apolônio, a hipótese astronômica é a variação aparente de velocidade do astro em seu curso através do zodíaco. Essa hipótese deve necessariamente ser verdadeira, ou dela não seria possível extrair as aparências observadas. As diversas maneiras como essa hipótese astronômica pode ser representada no papel são hipóteses geométricas, como o excêntrico e o deferente com epiciclo. A distinção entre hipóteses astronômicas e hipóteses geométricas fornece uma explicação para o sucesso da astronomia ptolomaica: tratam-se de modelos geométricos construídos para expressar os

¹⁰⁵ Cf. *Astronomia nova*, p. 66-67; KEPLER, 1992-b, p. 123-124.

¹⁰⁶ Cf. KEPLER, In: JARDINE, p. 91-92; 142-143.

¹⁰⁷ Quando Kepler afirma que Apolônio não é um astrônomo mas um geômetra, ele argumenta que o matemático grego não fazia considerações de ordem física acerca da estrutura do mundo e nem relacionava as suas demonstrações geométricas com as observações dos movimentos dos astros. Cf. KEPLER, In: JARDINE, p. 122-123; 190-192.

movimentos relativos dos astros. Kepler fornece dois exemplos esclarecedores: a constatação de que a órbita da Lua é oval é uma hipótese astronômica, enquanto as combinações de círculos pelas quais essa oval é construída são hipóteses geométricas; a diminuição de velocidade de um planeta próximo ao apogeu e o correspondente aumento próximo ao perigeu é uma hipótese astronômica na astronomia ptolomaica, mas o círculo equante (vide glossário) que representa essa variação de velocidade é uma hipótese geométrica.¹⁰⁸

As hipóteses astronômicas devem necessariamente corresponder à disposição e aos movimentos reais dos corpos no universo. Quanto às hipóteses geométricas, estas operam em outro plano, o da representação das hipóteses astronômicas. Elas não podem ser ‘verdadeiras’ ou ‘falsas’ porque não são formuladas com a intenção de expressar a realidade dos céus, mas apenas de permitir a manipulação das hipóteses astronômicas e a dedução das posições aparentes dos astros a partir delas.

No início da *Astronomia nova* Kepler trata da equivalência geométrica quase perfeita entre os sistemas de Tycho Brahe, Copérnico e Ptolomeu. Essa demonstração costuma ser negligenciada pela crítica, que a trata como um suporte à introdução do sol aparente como centro dos movimentos, creditando a exposição nos três sistemas a uma promessa feita a Tycho no seu leito de morte, e conferindo pouca importância à demonstração no argumento da *Astronomia nova*. À luz da *Defesa do Tycho*, no entanto, o propósito da primeira parte da *Astronomia nova* se torna evidente.¹⁰⁹ Demonstrada a equivalência dos sistemas do ponto de vista geométrico, a instância que vai decidir qual dentre eles corresponde à real estrutura do mundo é a física, a nova física celeste, pela qual Kepler demonstra que o sistema de Copérnico, e só ele, é capaz de gerar a representação mais perfeita possível dos dados de Tycho, quaisquer que sejam os aspectos considerados.

¹⁰⁸ Veremos mais adiante que na *Astronomia nova* Kepler emprega um epiciclo para representar o movimento de libração responsável pela forma oval da órbita de Marte. Esse emprego pode ser facilmente compreendido em vista da distinção aqui apontada: a hipótese astronômica é a forma oval (e finalmente elíptica) da órbita de Marte; o epiciclo é meramente uma hipótese geométrica, e Kepler não acredita que ele de fato exista no céu.

¹⁰⁹ No quinto capítulo do presente trabalho procuramos oferecer uma interpretação da primeira parte da *Astronomia nova* à luz do método astronômico exposto da *Defesa*.

Na *Defesa de Tycho* Kepler também dirige a sua artilharia contra Andreas Osiander (1498 – 1552) e Francesco Patrizi (1529-1597). Osiander é por ele identificado como o autor do famoso prefácio anônimo que confere um caráter meramente computacional ao heliocentrismo de Copérnico e às hipóteses astronômicas em geral.¹¹⁰ Segundo Kepler, Ursus teria mencionado no *Tractatus* o prefácio ao *De revolutionibus*, sem no entanto conhecer a identidade do seu autor.¹¹¹ O fato é que a posição assumida por Osiander frente ao copernicanismo é diametralmente oposta à sua própria, e Kepler toma partido da oportunidade para desacreditá-lo.

O ataque é incisivo: Kepler compara o astrônomo que não procura pelas causas ao médico que somente considera os sintomas, sem indagar pelas causas internas da doença. Além disso ele questiona a competência de Osiander como astrônomo e o acusa de má fé, já que a atitude realista de Copérnico com relação ao seu sistema de mundo é evidente desde o início do *De revolutionibus*, ao contrário do que afirma Osiander no seu prefácio.¹¹² O prefácio é uma mentira, um dissimulação, e teria sido redigido sem convicção pessoal, como se Osiander ‘desejasse adoçar o trabalho de Copérnico’¹¹³, não se importando em ocultar as teses mais sérias e verdadeiras do autor do *De revolutionibus*.

¹¹⁰ O *De Revolutionibus* de Copérnico (1473-1543) havia sido publicado em 1543 com um breve prefácio anônimo intitulado “Sobre as hipóteses desta obra”, que Kepler parece ter sido o primeiro a reconhecer publicamente como da autoria do ministro luterano Andreas Osiander. Cf. JARDINE, 1984, p. 150, n. 75. O teor do prefácio é sintetizado em suas linhas finais: “Como, porém, se apresentam por vezes diferentes hipóteses para explicar um e mesmo movimento, por exemplo, a excentricidade e o epiciclo para o movimento do Sol, o astrônomo preferirá aquela que for mais fácil de compreender. (...) E ninguém espere da astronomia qualquer coisa de certo no que respeita a hipóteses porque ela nada pode garantir como tal. Assim não se afastará desta ciência mais ignorante do que se veio, como aconteceria se tomasse como verdadeiras meras hipóteses. Adeus.” COPÉRNICO, 1984, p. 2.

¹¹¹ Kepler escreve: “Vou auxiliar o diligente Ursus: caso não saibas, o autor do prefácio é Andreas Osiander, como atesta a pena de Hieronymus Schreiber de Nuremberg que pode ser vista no meu exemplar.” (*Juvabo laborantem Ursum, fuit ejus praefationis author, si nescis, Andreas Osiander, ut Hieronymj Schreiberj Noribergensis (...) manus in meo exemplarj visenda testatur.*) KEPLER, In: JARDINE, p. 96; 150.

¹¹² Cf. KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 96-99; 150-154.

¹¹³ ...itsa quasi lenimenta operj Copernicano praemittere voluisse. KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 97; 152.

Já Patrizi teria, nos diz Kepler, negado todas as hipóteses geométricas e astronômicas, sustentando que os movimentos reais dos astros são exatamente as complicadas espirais que nos aparecem no céu. Kepler zomba de Patrizi, comparando a sua atitude à de um homem que, caminhando no campo, pensa que as montanhas se precipitam sobre ele, porque é isso o que mostra a sua visão.¹¹⁴ A tarefa do astrônomo é identificada por Kepler, mesmo no interior da tradição geocêntrica, com a identificação de uma ordem mais profunda da qual resultam os complicados movimentos observados, em clara oposição ao tipo de ceticismo por ele atribuído a Patrizi.

Contrariando a opinião de Ursus quanto à impossibilidade de se conhecer o real sistema de mundo e à natureza fictícia das hipóteses astronômicas, Kepler vê o desenvolvimento da astronomia como um processo gradual que parte de observações livres de qualquer interpretação em direção à descoberta da verdadeira astronomia, da verdadeira estrutura física do mundo criado e das relações nela operantes.

2.2 Do método

A discussão teórica acerca do método não é sistemática como aquela que trata das hipóteses astronômicas, mas se distribui de maneira um tanto difusa ao longo da *Defesa*. Um dos elementos fundamentais do pensamento de Kepler é a crença profunda na inteligibilidade do mundo criado. Acessível à razão, o cosmos de Kepler é transparente à investigação astronômica, e cabe ao astrônomo descobrir qual é a sua real estrutura e quais os movimentos que nele têm lugar. Desse modo a tarefa do astrônomo se desdobra em duas: por um lado ele deve ser capaz de calcular os movimentos celestes e realizar predições. Além disso, o astrônomo deve também indagar a respeito da real estrutura do mundo, e é só assim que ele pode praticar a astronomia com o máximo de excelência¹¹⁵:

¹¹⁴ Contra Patrizi, Kepler chega a mencionar a história de um conhecido seu que, viajando de carruagem e admirando o gado nos campos, teria exclamado: “*Miraculum, bovem multipedem!*” ao olhar para um boi em cuja linha de visão encontrava-se suspensa, na janela, uma aranha. Cf. KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 98-100; 154-156.

¹¹⁵ Em um artigo mais recente, Jardine credita a procura de Kepler pelo real sistema de mundo a uma visão maneirista da tarefa do astrônomo. Cf. JARDINE, 1998, p. 54-55.

Desempenha bem o dever do astrônomo aquele que prevê o mais exatamente os movimentos e posições dos astros. Porém aquele que, além disso, também emprega opiniões verdadeiras sobre a forma do mundo, a executa melhor e é digno de maior louvor. Aquele, com efeito, tira conclusões verdadeiras quanto ao que é visto; este ao tirar suas conclusões não apenas faz justiça ao que é visto, mas também, como foi explicado acima, ao obter conclusões abarca a mais profunda forma da Natureza.¹¹⁶

Segundo Kepler, a astronomia é constituída de três elementos: as hipóteses geométricas, as hipóteses astronômicas e os movimentos aparentes dos astros.¹¹⁷ Os movimentos aparentes são espirais complicadas que nunca se repetem, e cabe ao astrônomo descobrir quais os movimentos simples e regulares subjacentes a essas aparências. A esses três elementos correspondem duas operações: a formulação de hipóteses astronômicas relativas a aspectos reais dos movimentos celestes e das quais os movimentos aparentes possam ser derivados e a formulação de hipóteses geométricas que expressem as hipóteses astronômicas previamente determinadas e possibilitem os cálculos das posições aparentes dos astros a partir delas.

Kepler não pressupõe a existência de um corpo teórico subjacente às observações. Os dados sobre os movimentos dos astros, isto é, as coordenadas angulares dos astros em função do tempo, são para ele observações diretas e independentes de qualquer hipótese. As observações constituem o primeiro fundamento a partir do qual são formuladas todas as hipóteses:

Em toda ação de conhecer acontece que, começando pelas coisas que atingem nossos sentidos, nós somos levados pela operação da mente até coisas mais elevadas que não podem ser abarcadas por nenhuma agudez dos sentidos. A mesma coisa acontece no trabalho astronômico, onde nós primeiro percebemos com os olhos as posições

¹¹⁶ *Bene fungitur officio astronomj, qui quam proxime motus et situs stellarum praedicit: melius tamen facit, et majori laude dignus habetur, qui praeter hoc etiam veras de mundi forma sententias adhibet. Ille namque verum, quoad visum, concludit: hic non tantum visui concludens satisfacit, sed etiam Naturae penitissimam formam concludendo amplectitur, ut supra fuit explicatum.* KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 92-93.

¹¹⁷ *Summa, tria sunt in astronomia, Hypotheses Geometricae, Hypotheses Astronomicae, et ipsi apparentes stellarum motus...* KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 98; 154.

dos planetas em diferentes tempos, e então o raciocínio se impõe sobre essas observações e conduz a mente até o reconhecimento da forma do universo. E o traçado dessa forma do universo assim derivado das observações é em seguida chamado ‘hipótese astronômica’.¹¹⁸

O registro dos movimentos aparentes dos astros é o objeto da parte prática ou mecânica da astronomia. A descoberta dos caminhos verdadeiramente percorridos pelos astros no céu é o objeto da parte contemplativa da astronomia. E a descrição geométrica desses caminhos é a tarefa menos nobre dos geômetras, pois não reflete diretamente a criação divina mas apenas encontra formas de expressá-la no papel.¹¹⁹

O *Suplemento a Vitelo* foi escrito poucos anos depois da *Defesa de Tycho* e publicado em 1604, o que significa que as teses ali sustentadas representam a posição de Kepler durante os anos de composição da *Astronomia nova*. Kepler abre o prefácio do *Suplemento* com uma descrição razoavelmente detalhada da estrutura da astronomia¹²⁰, em uma formulação ligeiramente diferente daquela que encontramos na *Defesa de Tycho*, mas que em linhas gerais oferece uma interpretação semelhante da tarefa do astrônomo.

Em primeiro lugar Kepler define o objeto da astronomia: os movimentos dos astros. A ciência que estuda os movimentos dos astros é construída em dois estágios sucessivos: a parte teórica da astronomia consiste na investigação filosófica da forma desses movimentos, e a parte prática na posterior descrição e predição dos movimentos aparentes, na elaboração de tábuas e no cálculo de efemérides. A construção de hipóteses astronômicas precede sua representação geométrica por meio de modelos especificamente designados a reproduzir este ou aquele fenômeno. As duas partes da astronomia, teórica e

¹¹⁸ *Quod enim in omni cognitione fit, ut ab iis quae in sensus incurrunt, exorsj, mentis agitatione provehamur ad altiora, quae nullo sensus acumine comprehendj queunt: idem et in astronomico negotio locum habet: ubi primum varios planetarum situs diversis temporibus oculis notamus, quibus observationibus ratiocinatio superveniens mentem in cognitionem formae mundanae deducit, cujus quidem formae mundanae, sic ex observationibus conclusae, delineatio Hypotheseon Astronomicarum postmodum nomen adipiscitur.* KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 92.

¹¹⁹ Cf. KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 156.

¹²⁰ Cf. *Suplemento a Vitelo*, p. 14 – 15; KEPLER, 1980, p. 99-101.

prática, são fundamentadas nas matemáticas; a parte teórica sobretudo na geometria e a parte prática na aritmética, embora não exista uma delimitação rígida.¹²¹

A astronomia teórica por sua vez é, ainda de acordo com o *Suplemento*, constituída de duas grandes partes, de um lado as observações e do outro os princípios físicos e metafísicos. Já a astronomia observacional se divide em três partes. A parte mecânica é relativa à construção de instrumentos astronômicos e à sua utilização nas observações.¹²² A parte histórica é constituída pelos registros das observações. Por fim, a astronomia observacional possui ainda uma parte óptica.¹²³

É dessa maneira que a tarefa do astrônomo consiste em descobrir os reais movimentos dos astros no céu. Em primeiro lugar é preciso que se reúna um grande volume de observações. Em seguida, essas observações são acomodadas em alguma hipótese relativa ao real ordenamento dos astros envolvidos, que posteriormente será associada a algum modelo geométrico apto a fornecer as coordenadas desejadas pelos astrônomos. A investigação física possibilita a seleção de modelos geométricos que expressem os movimentos reais dos astros e ao mesmo tempo possibilitem a descrição e predição de seus movimentos aparentes da maneira mais precisa possível.

Vimos que o realismo de Kepler vai além da crença na possibilidade de obtenção de uma teoria que descreva o real ordenamento do cosmos e os reais movimentos dos astros. Mesmo os modelos da astronomia tradicional que se provem inevitavelmente falsos têm

¹²¹ No *Suplemento* Kepler por vezes se refere à astronomia teórica como astronomia geométrica e à astronomia prática como astronomia aritmética. Isso pode gerar confusão com as hipóteses geométricas, que de acordo com o texto da *Defesa* constituem a parte geométrica da astronomia prática. Optamos por escrever sempre astronomia prática e astronomia teórica para evitar essa possível confusão.

¹²² Kepler tem em vista os instrumentos da astronomia pré-telescópica, empregados na determinação precisa das posições aparentes dos astros, tais como astrolábios, sextantes, quadrantes, etc. Tycho Brahe prestou uma grande contribuição ao aperfeiçoamento desses instrumentos, como Kepler reconhece no texto.

¹²³ Os astrônomos observam a luz dos astros e as ocultações dessa luz ocorridas por ocasião dos eclipses. A parte óptica da astronomia trata da luz e da sombra, da propagação e refração da luz nos meios por ela atravessados e da visão, operação sensorial pela qual os movimentos aparentes dos corpos celestes são percebidos por nós. O *Suplemento a Vitelo* tem o subtítulo ‘parte óptica da astronomia’. No apêndice II discutimos a propagação da luz, tema da primeira parte do *Suplemento* estreitamente ligado ao conceito de força motriz solar da *Astronomia nova*.

algo de verdadeiro ou simplesmente não poderiam gerar os fenômenos observados. O reconhecimento da equivalência dos diferentes modelos construídos pelos geômetras para representar os movimentos observados no céu possibilita o estabelecimento de um duplo critério para a seleção da configuração correspondente ao real ordenamento dos corpos no universo. Em primeiro lugar, há o teste constituído pela aplicação da representação geométrica em questão a uma série fenômenos correlatos, capaz de revelar qual hipótese abarca o maior número deles. A esse teste puramente geométrico vem se juntar um segundo, em que a física celeste atua como uma instância de teste mais rigorosa, visto que toda hipótese, mesmo aquelas perfeitamente equivalentes do ponto de vista da geometria, tem suas próprias consequências no domínio da física.

Na astronomia física de Kepler as hipóteses físicas mantêm o mesmo estatuto das causalidades geométricas que haviam orientado o argumento do *Mistério*: “Com efeito, a parte física da astronomia trata das causas eficientes dos movimentos, os motores, das causas formais, as figuras que afetam os motores e das causas materiais, os orbes e a intensão e remissão física dos movimentos.”¹²⁴ Nessa passagem fica patente que a parte física da astronomia kepleriana não trata apenas das causas eficientes dos movimentos, mas de todas as causas envolvidas, sejam elas eficientes, materiais ou formais. A parte física da astronomia constitui, ao lado das três partes observacionais, a astronomia teórica.

O estabelecimento das hipóteses físicas se dá por uma série de mecanismos, nos quais revelam-se elementos típicos da astronomia kepleriana tais como a constante verificação experimental ou a tese da homogeneidade entre a Terra e os planetas, que sustenta a

¹²⁴ ...*Astronomiae partem Physicam scilicet constituit, in qua agitur de causis motuum efficientibus, siue motoribus, de causis formalibus, seu figuris, quas motores affectant, de causis materialibus seu Orbibus, et motuum intentione vel remissione Physica. Suplemento a Vitelo*, p. 14. É certo que na astronomia de Kepler, como na de Brahe, os orbes sólidos não existem. O que Kepler quer dizer aqui é que a parte física da astronomia trata das causas dos movimentos dos astros, quaisquer que sejam elas: materiais, formais ou eficientes. Kepler, como o próprio Ursus, entende que os orbes sólidos da astronomia tradicional fornecem uma explicação física para os movimentos dos astros. Cf. KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 179. A necessidade de formulação de uma nova explicação física para os movimentos dos astros uma vez comprovada a inexistência dos orbes sólidos orienta a argumentação da *Astronomia nova*, como veremos mais adiante.

formulação de analogias entre os fenômenos astronômicos e os fenômenos observados no mundo terrestre, em particular o magnetismo, que constitui uma demonstração palpável da possibilidade de interação física entre corpos espacialmente separados. A intuição participa do estabelecimento desses princípios na medida em que as operações mentais compartilham da estrutura geométrica subjacente às interações físicas.

Acreditamos que o grande sucesso prático da *Astronomia nova* reflita a aplicação de um método novo, forjado para possibilitar a dedução dos movimentos dos astros a partir do conhecimento da estrutura real do universo. Esse método começou a ser avançado no *Mistério cosmográfico* e está estreitamente ligado à instituição de relações de causalidade e ao teste experimental dos modelos desenvolvidos. Os pressupostos da demonstração são indissociavelmente os princípios físicos e metafísicos, além das observações.¹²⁵

Com relação à formulação dos princípios físicos, mais uma vez a observação entra em jogo. Com efeito, Kepler afirma que a parte física da astronomia deverá ser concluída no seu ‘Comentário sobre Marte’ (a *Astronomia nova*) a partir de fundamentos extraídos das observações de Brahe:

Eu completarei esta parte, se Deus me conceder vida, nos meus comentários sobre os movimentos de Marte (desvendados a partir das observações de Tycho, sobre o fundamento extremamente sólido da astronomia reformada por Tycho Brahe: o movimento do Sol e as posições das [estrelas] fixas). E eu acredito poder dizer que esta [parte física] é a chave de uma astronomia mais profunda.¹²⁶

¹²⁵ Insistimos neste ponto porque nos opomos a Koyré, que aponta uma guinada em direção ao empirismo e uma correspondente recusa ao ‘apriorismo impenitente’ do *Mistério* como fator responsável pelo sucesso de Kepler na descrição do movimento de Marte. Cf. KOYRÉ, 1961, p. 173.

¹²⁶ ... *quam partem, si Deus vitam concesserit, Comentaribus de motibus Martis (ex Observationibus Tychonicis, et super fundamentum Astronomiae adamantinum restituti per TYCHONEM BRAHE motus Solis fixarumque ordinarum extructis) complectar, quam Clauem Astronomiae penitioris dicere posse mihi videor. Suplemento a Vitelo*, p. 14 - 15; KEPLER, 1980, p. 100.

Veremos que isso é verdade, quando acompanharmos o método intrincado como se combinam pressupostos físicos, geométricos e observações na solução de problemas astronômicos relativos à determinação da órbita de Marte.

No sistema heliocêntrico perde sentido a distinção entre dois mundos heterogêneos, nos quais ocorrem fenômenos de natureza essencialmente diversa. Kepler observa as relações de causalidade operantes na Terra e as aplica às hipóteses geométricas, testando sua possibilidade de existência física e transformando-as em hipóteses astronômicas, relativas à real estrutura física dos céus. Uma justificativa para esse tipo de procedimento analógico em termos da homogeneidade entre a Terra e os corpos celestes é oferecida no sexto capítulo do *Suplemento a Vitelo*¹²⁷: “Pois se é lícito aplicar modelos das coisas sublunares às coisas celestes (mas que isso é lícito, Moisés estabeleceu de que maneira há muito tempo, e mostrou que tudo [é feito] da mesma matéria)...”¹²⁸

A delimitação clara entre hipóteses geométricas e as verdadeiras hipóteses astronômicas permite que Kepler demonstre que a equivalência entre os sistemas de Copérnico e Ptolomeu não decorre de uma indiferença dos resultados com relação às teses centrais dessas teorias, mas da equivalência entre as hipóteses geométricas elaboradas a partir de termos médios semelhantes. Jean-Jacques Szczeciniarz observa que Copérnico faz no seu *De Revolutionibus* duas apresentações paralelas do movimento da Terra em torno do Sol. Em primeiro lugar, no livro I a tese do movimento da Terra é apresentada de um ponto de vista físico e realista. Mais adiante, no livro III, Copérnico elabora diferentes construções geométricas para representar esse movimento. Isso é possível porque a hipótese física do movimento da Terra é passível de diferentes representações geométricas. Entretanto, o professor Szczeciniarz observa que a equivalência geométrica entre diferentes modelos no interior do sistema heliocêntrico não é da mesma ordem que a equivalência observacional dos sistemas heliocêntrico e geocêntrico, ainda que uma transformação

¹²⁷ A justificativa acompanha a atribuição de uma máxima densidade ao corpo solar, o mais luminoso dos astros por analogia com os corpos luminosos terrestres, que emitem mais luz na proporção de suas densidades.

¹²⁸ *Nam si licet exempla rerum sublunarium accommodare coelestibus: (vt autem liceret, iam modo MOSES effecit, qui eandem omnibus materiam ostendit)...* *Suplemento a Vitelo*, p. 198; KEPLER, 2000, p. 237.

geométrica permita passar de um sistema de mundo a outro. Esta segunda equivalência envolve a hipótese copernicana de um observador em movimento, e a diferença entre um observador em repouso e um observador em movimento é real, e poderia ser observada por um Deus imóvel, por exemplo.¹²⁹ Kepler remete a equivalência entre os sistemas de mundo para o plano das hipóteses geométricas, interpretando os modelos de Ptolomeu como representações geométricas (ainda que demasiado complicadas se comparadas àquelas obtidas por Copérnico) dos movimentos planetários que têm lugar no mundo heliocêntrico. Na *Astronomia nova*, a interpretação dos dados de Brahe segundo os princípios da nova física celeste possibilitará a construção de hipóteses geométricas perfeitamente coincidentes com a realidade dos céus.

Por esse expediente o astrônomo concilia o sucesso preditivo da astronomia de posição geocêntrica com a sua interpretação realista do heliocentrismo. Kepler argumenta que os astrônomos ilustres que o precederam compartilhavam de sua atitude realista diante da astronomia. Ele lembra que na astronomia de Ptolomeu a ordem das esferas dos planetas não era necessária para a predição dos movimentos dos planetas, e no entanto o grande astrônomo da Antigüidade empreendeu um estudo diligente sobre essa questão porque lhe interessava conhecer a natureza do mundo. A invenção dos sistemas de Copérnico e Tycho também é creditada à atitude realista desses astrônomos. Eles poderiam ter-se contentado com o sistema geocêntrico, perfeitamente adequado à predição dos fenômenos, mas preferiram formular novas hipóteses, capazes de explicar também o motivo pelo qual os diâmetros aparentes dos planetas superiores são maiores quando estes se encontram em oposição ao Sol. Do mesmo modo a crítica de Copérnico ao equante de Ptolomeu é motivada por uma consideração metafísica, de que os planetas devem descrever seus percursos com velocidades uniformes, e não porque exista algum desacordo entre a explicação de Ptolomeu e os dados da experiência.¹³⁰

Ao criticar a identificação feita por Ursus entre hipótese e ficção Kepler expõe uma visão profundamente interessante do desenvolvimento da astronomia como um processo

¹²⁹ Cf. SZCZECINIARZ, 1998, p. 341-345.

¹³⁰ Cf. KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 93-94; 145-147.

contínuo. A formulação dos círculos com os quais os astrônomos antigos explicavam os complicados movimentos aparentes é remetida para o mesmo patamar que a explicação de fenômenos sinódicos a partir do movimento da Terra. Em ambos os casos, passa-se do mais complexo ao mais simples. Kepler situa a sua interpretação física do heliocentrismo na mesma linha evolutiva que, desde Tales de Mileto, orientou o progresso da ciência astronômica. Sua astronomia física deve muito a Copérnico, mas deve igualmente a Ptolomeu, ele faz questão de enfatizar. Esse tipo de concepção teórica sobre o progresso da astronomia seria expresso de maneira bem palpável anos mais tarde, no desenho que aparece no frontispício das *Tábuas Rudolfinas*. Kepler conclui o templo de Urânia, obra iniciada pelos astrônomos da Antigüidade e continuada por Copérnico e Tycho:



Figura 2.1 O templo de Urânia no frontispício das *Tábuas Rudolfinas*. *Apud*. COHEN, 1980, p. 53.

Os princípios físicos e metodológicos adotados por Kepler na *Astronomia nova* são mais sofisticados do que aqueles encontrados no *Mistério cosmográfico*. Do ponto de vista da física esse refinamento resulta da possibilidade de transformação de explicações qualitativas em explicações quantitativas através da análise de uma grande quantidade de dados experimentais. Por outro lado, a compreensão teórica do que seria uma força capaz de agir a distância tornou-se mais refinada com os estudos de óptica empreendidos por Kepler, impostos em última instância pela precisão dos dados de Tycho Brahe que exigiam uma interpretação adequada. Além disso, do ponto de vista matemático a *Astronomia nova* incorpora elementos que atestam a tentativa de Kepler em expressar matematicamente variações contínuas, revelada de maneira notória na lei das áreas (vide glossário).

Finalmente, a *Astronomia nova* traz em sua narrativa a aplicação do novo método a um problema delimitado, a descrição e explicação do movimento descrito pelo planeta Marte. A exposição do método astronômico de Kepler através desse problema exemplar tem o efeito de comprovar a sua eficácia ao mesmo tempo em que permite a visualização dos elementos que o constituem: dados da experiência, construções matemáticas, explicações físicas, tudo isso articulado em uma astronomia absolutamente realista.

Capítulo 3 – *Astronomia nova*

Publicada em 1609¹³¹, a *Astronomia nova* foi, dentre os tratados astronômicos de Kepler, aquele que haveria de exercer maior influência no desenvolvimento da ciência moderna.¹³² O título completo do livro diz *Astronomia Nova 'explicando as causas' ou física celeste apresentada através de comentários sobre os movimentos da estrela Marte segundo as observações do homem de ilustre família Tycho Brahe*.¹³³ Como o título indica, trata-se de um estudo do movimento de Marte. O planeta tem uma das órbitas mais excêntricas do sistema solar, e a descrição de seu movimento sempre fora considerada problemática, desde a Antigüidade.¹³⁴ Na *Astronomia nova* Kepler obtém uma descrição precisa do movimento de Marte em torno do Sol, fornecida pelos resultados que hoje conhecemos como suas duas primeiras leis (vide glossário). As duas leis apresentadas na *Astronomia nova* são válidas, por extensão, também para os demais planetas, fornecendo uma solução precisa para o problema da determinação da forma do percurso e da variação de velocidade dos planetas em torno do Sol. Entretanto, o mérito de Kepler na *Astronomia nova* não se restringe à determinação da forma exata dos movimentos planetários, mas compreende uma reformulação completa nos princípios e nos métodos da ciência astronômica, que pretendemos discutir neste e nos capítulos seguintes.

A nova astronomia é uma física dos céus; trata-se de estender ao estudo dos movimentos celestes o preceito básico da filosofia seiscentista, de acordo com o qual explicar um fenômeno é conhecer sua causa.¹³⁵ A principal relação de causalidade operante na *Astronomia nova* é aquela que liga o Sol aos movimentos planetários, ao movimento de

¹³¹ A *Astronomia nova* foi redigida entre 1600 e 1605. O atraso na publicação é creditado sobretudo a dificuldades práticas, entre as quais se destaca a oposição dos herdeiros de Tycho Brahe à utilização de suas observações por Kepler em uma obra que claramente defende a superioridade do sistema copernicano sobre o sistema misto de Tycho. Cf. CASPAR, 1993, p. 139.

¹³² Russel faz um inventário bem detalhado das citações aos trabalhos de Kepler a partir da publicação da *Astronomia nova* em RUSSEL, 1964, p. 1-24.

¹³³ *Astronomia Nova Αιτιολογητος sev Physica Coelestis, tradita comentariis de motibus stellae Martis, ex observationibus G. V. Tychonis Brahe*.

¹³⁴ A excentricidade da órbita de Marte, igual a 0,093, é muito maior do que a da órbita da Terra, igual a 0,0167, ou do que aquela dos demais planetas do sistema solar, com a exceção de Mercúrio. Kepler, na carta dedicatória a Rudolfo II que abre a *Astronomia nova*, resume a situação com a fórmula de Plínio, o Velho: “Marte é a estrela inobservável” (*Martis inobservabile sidus esse*). *Astronomia nova*, p. 8; KEPLER, 1992-b, p. 32.

¹³⁵ Cf. SANTIAGO, 2002, p. 109.

Marte em particular. A idéia de que do Sol emana uma força motriz responsável pelos movimentos dos planetas e a derivação das duas primeiras leis de Kepler a partir dessa idéia fazem do heliocentrismo de Kepler uma astronomia física, como ele orgulhosamente anuncia no título.¹³⁶ O título ainda indica que os dados relativos ao movimento de Marte empregados na *Astronomia nova* foram coletados pelo grande astrônomo dinamarquês Tycho Brahe. Estes dados foram cuidadosamente recolhidos por Tycho e sua equipe ao longo de uma década no observatório de Uraniburgo entre os anos de 1576 e 1598. Brahe é considerado o maior observador da astronomia pré-telescópica. Uraniburgo, o observatório por ele construído na ilha de Hven, Dinamarca, funcionou durante duas décadas como um importante centro de pesquisa sob o comando de Tycho e a patronagem do rei Frederico II. Seus cadernos continham os mais precisos dados astronômicos até então jamais coletados, com erros nas medidas de posição angular inferiores a dois minutos de arco.

Em 1599 Brahe chegara a Praga para ocupar a posição de matemático imperial na corte de Rudolfo II¹³⁷, após ter sido forçado a deixar a Dinamarca devido a problemas políticos decorrentes da subida do rei Christian IV ao trono.¹³⁸ Ele levara consigo alguns instrumentos e, o que é mais importante, os dados astronômicos coletados em Uraniburgo. Em 19 de outubro de 1600 Kepler chega a Praga com sua família para trabalhar como assistente de Tycho Brahe. Sobre as circunstâncias que o levaram a trabalhar com Tycho acerca do movimento de Marte, ele escreve:

Em 1597, eu escrevi a Tycho Brahe pedindo a sua opinião sobre o meu pequeno livro [o *Mistério cosmográfico*] e quando, respondendo, ele mencionou entre outras coisas as suas próprias observações, me inflamou de um imenso desejo de vê-las. Além disso, Tycho, que era com efeito uma grande parte do meu destino, não cessou desde então de me convidar para encontrá-lo. E como eu estava apreensivo com a distância do lugar, eu

¹³⁶ A importância do conceito de força motriz solar na derivação das duas primeiras leis dos movimentos dos planetas é um importante foco da crítica contemporânea da astronomia de Kepler. Ver, por exemplo, TOSSATO, 2003 e STEPHENSON, 1987.

¹³⁷ Rudolfo II (1552 - 1612), imperador do sacro império germânico a quem Kepler serviu como matemático imperial durante os dez anos compreendidos entre a morte de Tycho Brahe, em 1601, e a abdicação do imperador quando da tomada do poder por seu irmão Matthias, em 1611.

¹³⁸ Cf. THOREN, 1990, p. 367-375; CHRISTIANSON, 2003, p. 195-236.

novamente atribuo à providência divina que ele tenha vindo para a Boêmia. Eu assim fui visitá-lo no início de 1600 com a esperança de aprender as verdadeiras excentricidades dos planetas. (...) Retrocedendo, penso que foi graças à providência divina que eu cheguei ao mesmo tempo em que ele se dedicava ao planeta Marte, cujos movimentos proporcionam a única via de acesso possível aos segredos ocultos da astronomia, sem o qual nós permaneceríamos para sempre ignorantes sobre esses segredos.¹³⁹

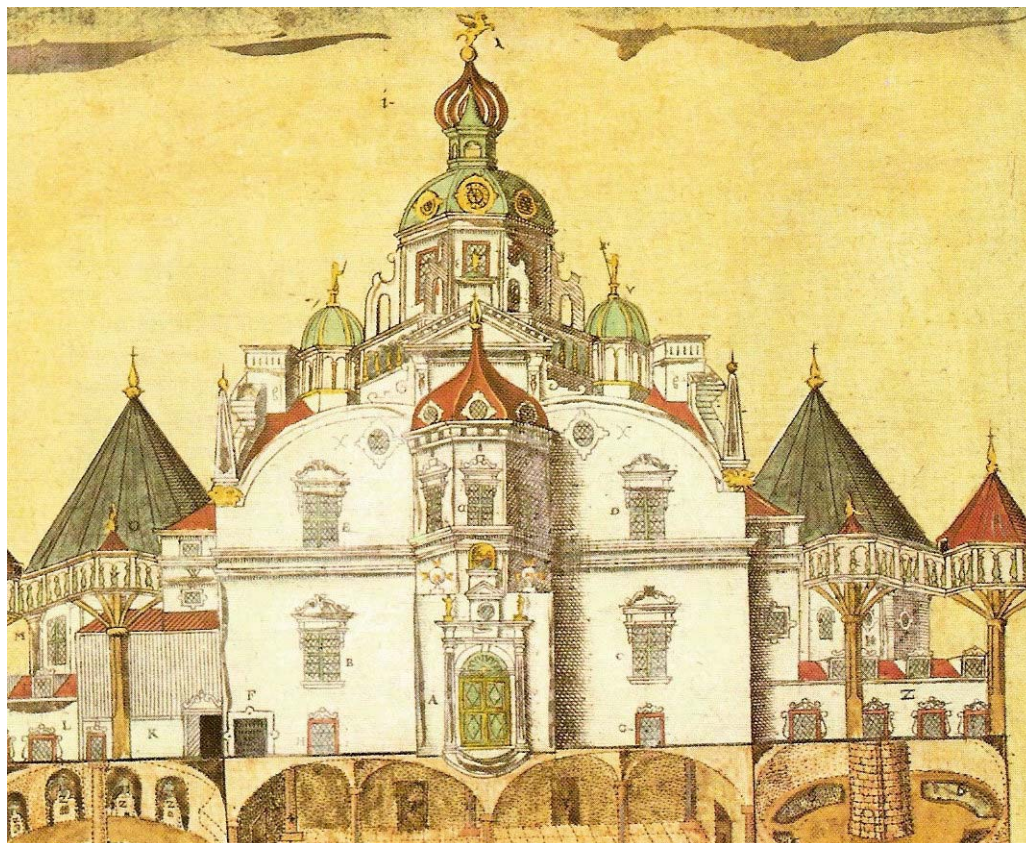


Figura 3.1 O observatório de Uraniburgo, onde foi coletada a maior parte dos dados sobre o movimento de Marte de que Kepler dispõe para escrever a *Astronomia nova*. Apud. DE LA COTARDIÈRE *et al.*, 1988, p. 16.

¹³⁹ Cumque anno MDXCVII ad TYCHONEM BRAHE scripsissem rogans ut suam de meo libello sententiam diceret, ipseque respondens inter caetera suarum etiam observationum meminisset, ingenti me cupiditate earum videndarum inflammavit. At vero TYCHO BRAHE ipse quoque magna pars fati mei ex eo non destitit me ultro hortari ut ad se venirem. Cumque me longinquitas loci esset absterritura, divinae rursum dispositioni asscribo quod in Bohemiam is venit. Eo igitur veni sub initium anni MDC spe Planetarum correctas eccentricitates addiscendi. (...) Rusrsus ergo divina dispositione accidisse puto, quod eodem tempore ego advenerim, quo tempore Marti ille erat intentus, ex cujus motibus omnino necesse est nos in cognitionem Astronomiae arcanorum venire aut ea perpetuo nescire. *Astronomia nova*, p. 109; KEPLER, 1992-b, p. 184-185.

Com o endurecimento da Contra-reforma Kepler se vira obrigado a deixar Graz, e após ter recebido uma resposta pouco encorajadora de seu antigo professor na Universidade de Tübingen, Michel Mästlin, Kepler resolveu aceitar o convite de Tycho.¹⁴⁰ Chegando a Praga, Kepler pretendia ter acesso às medidas das excentricidades dos planetas coletadas em Uraniburgo, necessárias para a determinação da espessura da calota esférica correspondente a cada planeta na sua teoria dos sólidos.¹⁴¹ Tycho no entanto não forneceu esses dados a Kepler quando ele chegou a Praga, designando-o para trabalhar na teoria de Marte sob a supervisão do astrônomo Longomontanus¹⁴². É desse trabalho que resulta a *Astronomia nova*.

3.1 Do Mistério cosmográfico à *Astronomia nova*

A *Astronomia nova* difere do *Mistério cosmográfico* em uma série de aspectos. Enquanto este último é um tratado cosmológico, que como tal tem o objetivo de explicar a totalidade do mundo criado, a *Astronomia nova* trata especificamente do movimento de Marte. Essa diferença de objeto implica em abordagens e métodos diferentes, em particular no que diz respeito à ausência, na *Astronomia nova*, de considerações estéticas mais elaboradas acerca da arquitetura do mundo. A isso se soma a grande influência do empirismo de Tycho Brahe sobre o pensamento de Kepler, que na *Astronomia nova* desenvolve cálculos detalhados de posições planetárias a partir dos dados coletados em Uraniburgo. Esses cálculos exigem a transformação da alma motriz solar no conceito matematizado de força solar e possibilitam a descoberta das leis dos movimentos planetários.¹⁴³

Dito isso, existe uma clara continuidade entre as duas obras, a despeito das diferenças metodológicas que as distinguem. Como procuramos mostrar no primeiro capítulo do

¹⁴⁰ Cf. CASPAR, 1993, p. 96-100.

¹⁴¹ Como vimos no capítulo 1, na teoria dos sólidos regulares exposta no *Mistério cosmográfico* Kepler atribui a cada planeta um orbe, ou calota esférica, que não tem existência física mas constitui o espaço no cosmos onde se dá o movimento de cada planeta. Esses orbes devem ter uma certa espessura porque as órbitas dos planetas são excêntricas com relação ao Sol, aproximando-se e afastando-se dele (vide glossário). Conhecendo as medidas exatas das distâncias do Sol ao centro da órbita circular de cada planeta, Kepler pretendia refinar a sua teoria dos sólidos, obtendo um acordo mais preciso com a experiência.

¹⁴² Christian Sørensen Lomberg (1562-1647), ou Longomontanus, chegou a Uraniborg em 1589, aos 25 anos, para ali trabalhar como assistente de Tycho até 1597, dedicando-se, entre outras tarefas, à elaboração do grande catálogo de 777 estrelas. Ele chegou a Praga em janeiro de 1600, menos de um mês antes de Kepler.

¹⁴³ Isso é observado por Claudemir Tossato em TOSSATO, 2003, p. 51-52.

presente trabalho, o *Mistério* já continha o projeto de fundação de uma astronomia física, baseada em causas, e muitos dos temas ali avançados são retomados na *Astronomia nova*. Dentre esses temas, destaca-se por sua importância central a adequação matemática entre o mundo criado e o intelecto humano, naturalmente capaz de compreendê-lo. No início do capítulo 7, intitulado “Em que oportunidade eu teria me deparado com a teoria de Marte” (*Qua occasione in theoriam Martis inciderim*), Kepler escreve:

É verdade que uma voz divina, que impõe aos homens o estudo da astronomia, é expressa no próprio mundo, não por meio de palavras ou sílabas mas, com efeito, na conformidade entre o intelecto e os sentidos humanos e o encadeamento dos corpos celestes e de suas relações.¹⁴⁴

Nas obras astronômicas, como a *Astronomia nova* e o *Mistério cosmográfico*, a possibilidade de descoberta da disposição e dos movimentos reais dos astros é assegurada pela semelhança estrutural entre o mundo criado e o aparato cognitivo humano, constituído do intelecto e dos sentidos. Em outros trabalhos científicos Kepler expressa a mesma crença na capacidade humana de vir a conhecer o funcionamento do mundo através da geometria. O conhecimento do mundo é possível porque nosso intelecto foi criado de maneira a se adequar naturalmente à tarefa de conhecê-lo. A matematização da ciência está ligada, para Kepler, à tese metafísica de que a verdadeira tarefa do homem neste mundo é se esforçar para que um dia a humanidade venha a conhecer sua real estrutura.

A grande diferença entre o método de pesquisa exposto na *Astronomia nova* e aquele operante no *Mistério* pode legitimamente ser identificada com uma sofisticação no processo de busca por causas decorrente do contato com o empirismo de Tycho e com os autores ópticos do séculos XIII e XIV. Entretanto, a afirmação de que Kepler teria em consequência do refinamento da componente empírica de seu sistema de pesquisa abandonado os modelos de causalidade geométrica¹⁴⁵, intuídos pela razão independentemente da experiência sensível,

¹⁴⁴ *Verum est, divinam vocem, quae discere jubeat homines Astronomiam, in mundo ipso expressam, non verbis aut syllabis, sed reipsa et commensuratione humani intellectus sensuumque cum serie corporum et affectionum coelestium. Astronomia nova*, p. 108; KEPLER, 1992-b, p. 183.

¹⁴⁵ Essa visão pode ser encontrada, por exemplo, em KOYRÉ, 1969, p. 170-173.

entra em clara contradição com uma série de escritos de Kepler, inclusive com trechos da própria *Astronomia nova*, onde ele se pronuncia explicitamente acerca da possibilidade de demonstração *a priori*:

Na verdade, se isso mesmo que eu agora demonstrei *a posteriori* (a partir das observações), por uma dedução um tanto mais longa, eu digo, fosse demonstrado *a priori* (a partir da beleza e excelência do Sol), de modo que a fonte da vida do mundo (vida que é vista no movimento dos astros) seja a mesma fonte que a da luz, que é o ornamento da inteira máquina [do mundo], e igualmente do calor, pelo qual tudo se desenvolve, eu penso que eu mereceria ser ouvido da mesma maneira.¹⁴⁶

Em 1610, na *Dissertação com o mensageiro das estrelas*, Kepler chegará a afirmar a superioridade do conhecimento *a priori*:

Pois se é maior a glória do arquiteto deste mundo do que aquela de quem o contempla, por mais engenhoso que seja, já que aquele extraiu de si mesmo as proporções da construção, enquanto este apenas reconheceu com grande trabalho as proporções ali expressas; então seguramente aqueles que concebem em sua imaginação as causas das coisas antes que se manifestem aos sentidos se parecem mais com o arquiteto do que os outros que consideram as causas depois de ter visto as coisas.¹⁴⁷

O empirismo de Brahe vem somar-se a outros elementos do pensamento kepleriano presentes desde o *Mistério*, relativos à inteligibilidade racional do mundo criado. Acreditamos que uma compreensão adequada da gênese e da operacionalidade do conceito de força motriz solar só pode ser atingida à luz dessa componente da ciência kepleriana, ainda que ela permaneça

¹⁴⁶ *Sane si hoc ipsum quod jam a posteriori (ex observationibus) per longiusculam deductionem demonstravi, si hoc inquam a priori (ex dignitate et praestantia Solis) demonstrandum suscepissem, ut idem sit fons vitae mundi (quae vita in motu siderum spectatur.) qui est et lucis, quo totius machinae constat ornatus, qui itidem et caloris, quo omnia vegetantur; puto me aequis auribus audiri meruisse. Astronomia nova, p. 238; KEPLER, 1992-b, p. 379.*

¹⁴⁷ *Nam si maior est gloria Architecti huius Mundi, quàm contemplatoris Mundi, quantumvis ingeniosi, quia ille rationes fabricae ex seipso deprompsit, hic expressas in fabrica rationes vix magno labore agnoscit: certè qui rerum causas, antequàm res patent sensibus, concipiunt ingenio, ii Architecti similiores sunt caeteris, qui post rem visam cogitant de causis. Dissertação com o mensageiro das estrelas, p. 304-305; GALILEU-KEPLER, 1984, P. 139.*

latente na *Astronomia nova* (a não ser por algumas curtas passagens, como a que citamos logo acima). Mais adiante veremos que a formulação do conecito matematizado de força motriz solar está estreitamente ligado a uma discussão cosmogônica sobre a forma esférica do mundo e da luz muito semelhante ao que encontramos no *Mistério*.

A intuição de relações harmônicas e geométricas capazes de expressar o ordenamento do mundo, justificada pela conformidade entre a razão humana e o mundo criado permanece um elemento importante do método de Kepler mesmo na *Astronomia nova*. Isso se torna manifesto sobretudo na descrição da natureza da força motriz solar, de que trataremos no capítulo seguinte do presente trabalho. Quando descobre que a órbita de Marte tem a forma de uma elipse, Kepler não conclui que o corpo solar tenha essa forma ou que a força por ele emitida se difunda elipticamente no espaço. A força solar é esférica como a luz porque as duas propagações imateriais reproduzem continuamente o movimento de criação do mundo esférico.

Outra idéia central do *Mistério* retomada na *Astronomia nova* é aquela que explica os movimentos de todos os planetas através de uma única causa situada no Sol, o centro do mundo. Na *Astronomia nova* a alma motriz do Sol, que no *Mistério* explicava os movimentos dos planetas, é substituída pela força solar, uma entidade matematizada.¹⁴⁸ Como se trata de um estudo do movimento de Marte, a relação entre os períodos dos planetas é deixada de lado. Já a explicação da variação de velocidade de um planeta em sua órbita pela ação da força solar será amplamente desenvolvida, e por fim dará origem à lei das áreas. Outra consequência importante da interpretação física do copernicanismo proposta por Kepler, que já havia aparecido no *Mistério cosmográfico* e que exercerá um papel decisivo na *Astronomia nova*, é a adoção do sol aparente (o corpo físico do Sol, em contraposição ao centro da órbita da Terra) como centro dos movimentos e referência nas medições astronômicas.

¹⁴⁸ A concepção de força solar, tal como ela é forjada na *Astronomia nova*, constitui o tema do próximo capítulo.

O emprego de forças físicas na solução de problemas relativos aos movimentos dos astros era visto com reservas pelos astrônomos do início do século XVII, como atesta uma carta que Kepler receberia alguns anos depois da publicação da *Astronomia nova*. Em 1616, a explicação do movimento da Lua apresentada por Kepler na *Síntese de astronomia copernicana* seria atacada por seu antigo professor na Universidade de Tübingen, Michel Mästlin, justamente por se basear em causas físicas (no caso, o magnetismo terrestre):

Eu não compreendo inteiramente o que você diz a respeito da Lua: que você tenha explicado todas as variações [de sua órbita] por causas físicas. Eu penso que nessa questão não se deveria apelar para causas físicas. Questões astronômicas deveriam ser tratadas astronomicamente, por meio de hipóteses astronômicas, e não por causas e hipóteses físicas. O cálculo astronômico é baseado na geometria e aritmética, e não em conjecturas físicas que perturbam o leitor ao invés de instruí-lo.¹⁴⁹

Mästlin, como astrônomo profissional, não aceitava a maneira como Kepler explicava os fenômenos celestes por meio de causas físicas, em especial forças agindo à distância, forjadas por analogia com a força magnética.¹⁵⁰

Uma diferença clara entre a *Astronomia nova* e o *Mistério* reside no teste das hipóteses físicas através da experiência, por meio de uma cadeia de iterações sucessivas que Kepler

¹⁴⁹ K.G.W. XVII, p. 187. *Apud*. Russel, in: BAER et BAER (eds.), p. 741, 1975.

¹⁵⁰ Isso não significa que antes de Kepler jamais se tivesse raciocinado acerca das causas dos fenômenos celestes. Como aponta Jardine, existia ao final do século XVI um largo abismo entre os ramos matemáticos da astronomia e a 'astronomia metafísica' que considera a natureza dos céus. A tradição aristotélica dos orbes ou esferas sólidas explicava a forma circular dos movimentos dos astros a partir da perfeição do éter, ao mesmo tempo em que oferecia uma descrição realista da arquitetura cósmica. Entretanto, o sistema físico de orbes sólidos não dava conta de todos os detalhes dos movimentos planetários. Estes eram reproduzidos pelos sistemas de epiciclos, deferentes e pontos equantes da astronomia de Ptolomeu. Os dois esquemas explicativos eram a princípio incompatíveis, pois enquanto os orbes sólidos aos quais estavam presos os planetas no esquema físico deveriam ser todos concêntricos, dispostos em torno da Terra, no sistema de epiciclos as distâncias entre os planetas e a Terra variava consideravelmente. A síntese entre as duas tradições foi efetuada pelos astrônomos árabes da Idade Média, que estenderam as esferas celestes até que elas pudessem acomodar os excêntricos e epiciclos de Ptolomeu em seus interiores. Entretanto, os princípios metafísicos da astronomia tradicional, tais como a centralidade da Terra, a circularidade dos movimentos celestes ou a existência de esferas cristalinas associadas aos planetas haviam sido forjados para explicar os aspectos mais gerais dos movimentos dos astros, e simplesmente não eram capazes de gerar uma descrição precisa desses movimentos. Ainda que após os desenvolvimentos dos astrônomos árabes esses princípios tenham deixado de entrar em conflito com os modelos da astronomia matemática, eles simplesmente não estavam na origem desses modelos. Cf. TOSSATO, 2003, 165-193; JARDINE, 1988, p. 225-231.

reproduz ao longo da argumentação. O grande volume de observações precisas das posições de Marte no céu efetuadas em Uraniburgo permitiu que Kepler examinasse a teoria de seu movimento nos mínimos detalhes, em cada estágio de elaboração, corrigindo as eventuais falhas até que uma reprodução perfeita fosse obtida, ainda que às custas de um dos maiores dogmas da astronomia tradicional, a circularidade dos movimentos celestes.

É importante notar no entanto que a visão segundo a qual Kepler chegou às duas primeiras leis por simples análise dos dados de Tycho caiu definitivamente por terra na segunda metade do século XX.¹⁵¹ A idéia de uma astronomia relacional, em que os corpos constituintes do mundo interagem entre si por meio de forças responsáveis por seus movimentos orienta todo o trabalho sobre os dados de Tycho, a ponto de poder-se seguramente dizer que as duas primeiras leis de Kepler são o resultado da maneira peculiar como os astrônomos interpretam os dados de Tycho a partir de princípios físicos.

Empirismo, relações causais e matemática se combinam na *Astronomia nova* para formar aquele que podemos denominar o *método astronômico kepleriano*. Esse método é apresentado no livro através de uma reconstrução (nem sempre acurada) do processo investigativo que teria conduzido o astrônomo à formulação da nova física celeste. Antes de passarmos a uma investigação mais detalhada da aplicação desse método a problemas astronômicos específicos, é preciso que nos detenhamos mais um pouco sobre alguns aspectos gerais da *Astronomia nova*.

3.2 A estrutura retórica da *Astronomia nova*

A *Astronomia nova* é escrita na forma de um relato histórico da guerra travada por Kepler contra Marte. A carta dedicatória a Rudolfo II anuncia uma narrativa dessa guerra: hipóteses físicas e geométricas serão convocadas, para aliarem-se e defrontarem-se com os dados de Tycho, serem submetidas a elaborações e reelaborações, em batalhas sucessivas, até que seja obtido um acordo com a experiência dentro da faixa de erro dos dados coletados por Tycho em Uraniburgo, da ordem de dois minutos de arco. De acordo com a carta, todas as etapas do

¹⁵¹ Veja, por exemplo, TOSSATO, 2003 e STEPHENSON, 1987.

processo que conduziu o astrônomo à descoberta da forma do percurso de Marte em torno do Sol e da lei que governa as suas velocidades ao longo deste percurso, mesmo as tentativas malogradas, seriam reproduzidas:

Eu mesmo devo ocupar-me de astronomia e, tendo guiado o carro triunfante, relatarei as derradeiras glórias de nosso cativo que me são particularmente conhecidas e, principalmente, todas as façanhas da guerra, desde o método até a conclusão.¹⁵²

Durante muito tempo não se discutiu que a *Astronomia nova* seria a reconstituição precisa das etapas que levaram Kepler à vitória contra Marte e à elaboração das duas primeiras leis. A narrativa intrincada do livro corresponderia à confusão que envolvia o próprio Kepler à época da descoberta das leis. Koestler escreve:

Kepler era incapaz de expor metodicamente as idéias, à guisa de livro de texto; tinha de descrevê-las na ordem em que lhe sobrevinham, incluindo todos os erros, desvios e armadilhas em que tombou. A Nova Astronomia possui um estilo não-acadêmico, barroco, pessoal, íntimo e, às vezes, exasperante. Mas é uma revelação ímpar dos modos pelos quais trabalhou o espírito criador.¹⁵³

A posição de Max Caspar é semelhante. Ele também vê o livro como uma reconstrução fiel e involuntária das etapas superadas por Kepler até a formulação das leis:

Não é, no entanto, como se ele [Kepler] houvesse construído essa fundação [da estrutura de sua *Astronomia nova*] a partir de um plano pré-concebido. A obra que se formava se desenvolveu segundo as leis abissais que regem a criação extremamente original. Certamente ele aparece como o ativo, agente, calculador, o meditativo, arquiteto, construtor, mas ele era o paciente, o estimulado, o assombrado, já que seu gênio dirigiu sua mente, guiou a sua mão, mostrou-lhe o caminho que deveria seguir, o chamou de volta quando ele cometeu um erro, instigou-lhe e não lhe deixou em paz até

¹⁵² *Ipse ad Astronomiam vertar, curruque triumphali invecus, reliquam captivi nostri gloriam, mihi peculiariter notam, omnesque adeo belli gesti confectique rationes explicabo. Astronomia nova*, p. 8; KEPLER, 1992-b, p. 31.

¹⁵³ KOESTLER, 1959, p. 215.

que tudo estivesse completo e ele, que tinha empreendido aquilo, finalmente olhou com espanto para a obra na qual ele havia saído vitorioso.¹⁵⁴

Alexandre Koyré também lê a *Astronomia nova* como uma *história do pensamento* de Kepler:

... Kepler não se limita – como haviam feito Copérnico e Newton – a nos expor os resultados obtidos: ele nos relata ao mesmo tempo, deliberadamente – assim como ele o fizera no *Mysterium cosmographicum* – a história de seu pensamento, de seus esforços, de suas derrotas. Pois o espírito de Kepler é constituído de tal maneira – pode ser, inclusive, que não seja apenas do espírito de Kepler, mas aquele do homem em geral que seja assim constituído – que ele não pode encontrar o caminho para a verdade sem haver previamente explorado todos os caminhos que conduzem ao erro.¹⁵⁵

Koyré observa que também o *Mistério* contém uma narrativa histórica¹⁵⁶. Ao contrário de Caspar e Koestler, Koyré acredita que a narrativa histórica corresponde a um estilo deliberadamente escolhido por Kepler, e não mais a um reflexo do espanto de Kepler diante de sua nova astronomia física ou à simples incapacidade do astrônomo que, sem ter conseguido sistematizar suas descobertas, decidira apresentá-las em *estado bruto*.

Entretanto, embora seja verdade que também o *Mistério* possui passagens onde Kepler narra etapas da história de suas descobertas, a aproximação entre a estrutura das duas obras, feita sem ressalvas, nos parece excessiva. Enquanto a *Astronomia nova* é escrita como um verdadeiro *jornal de viagem*, para usar as palavras do próprio Koyré, a exposição do *Mistério* é muito mais sistemática. Os trechos narrativos, escritos em primeira pessoa, estão esparsamente distribuídos em alguns capítulos, que de resto não são ordenados de acordo com a ordem das descobertas de Kepler, e sim com o tipo problema abordado em cada capítulo. Por fim, o motivo da escolha apontado por Koyré não é verossímil. Se descartada a

¹⁵⁴ CASPAR, 1993, p. 124.

¹⁵⁵ KOYRÉ, 1961, p. 165-166.

¹⁵⁶ Koyré não as cita, mas podemos apontar algumas passagens exemplares: *Mistério cosmográfico*, p. 14, KEPLER, 1992-a, p. 75; *Mistério cosmográfico*, p. 63, KEPLER, 1992-a, p. 180; *Mistério cosmográfico*, p. 75-76, KEPLER 1992-a, p. 208.

hipótese de que esse modo de exposição teria sido imposto ao espírito de Kepler pela novidade do assunto, resta que a forma da *Astronomia nova* seria determinada de maneira a tornar a nova astronomia acessível ao *homem em geral*. Isso certamente não é verdade, como nota o próprio Kepler:

Eu próprio, que sou reputado como matemático, quando releio esta minha obra sinto esgotar-se minha força mental conforme relembro a partir das figuras o sentido das demonstrações, as quais eu mesmo havia originalmente introduzido a partir da minha própria mente nas figuras e nos textos.¹⁵⁷

Claudemir Tossato também defende que a escolha da estrutura retórica da *Astronomia nova* tenha sido intencional, e a credita à honestidade intelectual de Kepler, que teria optado por expor todos os seus erros ao leitor, permitindo uma avaliação imparcial de suas realizações.¹⁵⁸

William Donahue¹⁵⁹ deu origem a uma nova perspectiva ao refazer os cálculos do capítulo 53 da *Astronomia nova* e mostrar que ali Kepler apresenta dados obtidos através de procedimentos diferentes daqueles expostos no capítulo:

A natureza da discrepância sugere que as próprias longitudes, bem como as distâncias, podem ter sido calculadas através da elipse e da lei das áreas [e não diretamente a partir das observações, como o capítulo mostra]. Essa reinterpretação ousada exigiria que a tabela de Kepler fosse vista como uma construção posterior destinada a justificar as conclusões. Essa conjectura foi testada, e os resultados são mostrados na tabela 9.

¹⁵⁷ *Ipse ego, qui Mathematicus audio, hoc meum opus relegens fathisco viribus cerebri, dum ex figuris ad mentem revoco sensus demonstrationum, quos a mente in figuras et textum ipse ego primitus induxeram. Astronomia nova*, p. 18; KEPLER, 1992-b, p. 45-46.

¹⁵⁸ Cf. TOSSATO, 2003, p. 28-29.

¹⁵⁹ DONAHUE, 1988.

O acordo é bom o suficiente para demonstrar que as longitudes foram calculadas muito depois que a investigação de que trata o capítulo havia sido conduzida. (...) Isso sugere portanto que a tabela da página 341 (isto é, nossa tabela 6) é uma fraude, uma completa fabricação. Ela nada tem em comum com os cálculos que supostamente a teriam gerado, além das meras datas e dos dados concernentes ao Sol.¹⁶⁰

A análise de Donahue mostra que a narrativa histórica em que consiste a *Astronomia nova* não corresponde inteiramente ao trajeto de fato percorrido por Kepler nos seus estudos sobre o movimento de Marte. Na introdução a sua excelente tradução da *Astronomia nova*, Donahue reitera esse ponto de vista:

... Isto é, embora freqüentemente Kepler pareça fornecer uma crônica de suas pesquisas, a *Astronomia nova* é na verdade um argumento cuidadosamente construído onde elementos históricos e (deve ser adicionado) de ficção são combinados com habilidade. Tomada como história, ela é freqüentemente demonstravelmente falsa, mas Kepler nunca pretendeu que ela fosse história. Sua introdução aos sumários dos capítulos individuais tornam as suas intenções abundantemente claras: *caueat lector!*¹⁶¹

Bruce Stephenson¹⁶² sustenta que a forma intrincada da *Astronomia nova* corresponde a uma construção retórica cuidadosamente tecida com um objetivo preciso: convencer os astrônomos contemporâneos a Kepler de que as teses ali apresentadas são as únicas capazes de reproduzir as observações de Tycho:

O livro foi escrito e (eu devo argumentar) reescrito cuidadosamente, com o objetivo de convencer uma audiência muito bem determinada, constituída pelos astrônomos

¹⁶⁰ DONAHUE, 1988, p. 232-233.

¹⁶¹ DONAHUE, In: KEPLER, 1992-b, p. 3.

¹⁶² STEPHENSON, 1987.

treinados, de que toda a teoria planetária por eles conhecida estava errada, e a nova teoria de Kepler estava certa.¹⁶³

Ao reformular tão profundamente uma ciência sofisticada e bem-estabelecida, Kepler sabia que deveria encontrar resistência da parte de seus praticantes - os seus leitores. Ele tinha que convencê-los de que sua astronomia não era apenas uma maneira aceitável de calcular posições planetárias, mas o verdadeiro sistema do mundo. É por esse motivo que ele os conduziu por um caminho tão tortuoso até chegar às suas teorias do movimento planetário. É certo que eles teriam de chegar a essa destinação, mas eles teriam também de perceber que não havia nenhuma outra parada possível.¹⁶⁴

James Voelkel¹⁶⁵ desenvolve essa idéia, construindo uma bem documentada discussão acerca do debate entre Kepler e os astrônomos de sua época para demonstrar que a composição da *Astronomia nova* foi de fato cuidadosamente estudada por Kepler. Voelkel distingue duas grandes influências operando na composição da *Astronomia nova*: de um lado os herdeiros de Tycho acusavam Kepler de usar as observações do astrônomo dinamarquês para os seus próprios fins idiossincráticos e de ser um ‘inventor de novidades’. A apresentação de toda a série de fracassos dos métodos tradicionais teria a finalidade de afastar essas objeções. Por outro lado, a correspondência entre Kepler e outros astrônomos, em particular David Fabricius¹⁶⁶, também teria influenciado na construção da narrativa. Com efeito, ele mostra que muitas das demonstrações redundantes presentes na *Astronomia nova* respondem diretamente a dúvidas e objeções de Fabricius. Desse modo, ele afirma que a *Astronomia nova* foi cuidadosamente construída com dois objetivos específicos: justificação e didática.

¹⁶³ STEPHENSON, 1987, p. 3.

¹⁶⁴ STEPHENSON, 1987, p. 21-22.

¹⁶⁵ VOELKEL, 2002.

¹⁶⁶ David Fabricius (1564-1617) foi o principal correspondente de Kepler entre 1602 e 1609, período que compreende os anos de composição da *Astronomia nova*. Em agosto de 1596 Fabricius descobriu a primeira estrela variável, Mira Ceti, mas ele é mais conhecido por sua extensa correspondência com Kepler. Foi numa carta a Fabricius que Kepler afirmou pela primeira vez que a órbita de Marte era elíptica. (carta 358, K.G.W. XV, p. 240-280)

O modo de exposição escolhido era admitidamente retórico. Ele levaria consigo os seus leitores durante a sua metafórica “batalha com Marte”, os conduzindo através de uma trilha fictícia na qual ele primeiro havia tentado de boa fé construir a teoria de Marte utilizando os métodos convencionais e só lançou mão de princípios físicos quando aqueles falharam. Ao mesmo tempo, ele repetiria suas demonstrações em todas as três maiores cosmologias [ptolomaica, tychônica e copernicana] com o objetivo de minimizar a percepção da influência de sua crença no heliocentrismo. A estrutura fina definitiva da *Astronomia nova* foi determinada pela interação entre Kepler e Fabricius. Aqui Kepler encontrou objeções precisas e confusões que podiam ser consideradas representativas de sua audiência, e ele as incorporou a sua narrativa. A correlação específica entre as objeções de Fabricius e as demonstrações de Kepler mostra a influência manifesta de suas discussões.¹⁶⁷

Voelkel desenvolve o seu argumento partindo do pressuposto segundo o qual Kepler teria se valido dos três elementos de persuasão descritos por Aristóteles na retórica: *ethos*, o caráter do autor, *pathos*, a emoção despertada na audiência e *logos*, o argumento.¹⁶⁸ A interpretação de Voelkel é consistente e bem documentada, e depois de ler o seu livro dificilmente podemos tornar a encarar a *Astronomia nova* como uma simples reprodução do processo de descobrimento das duas primeiras leis. Assim é possível distinguir claramente dois momentos na interpretação da *Astronomia nova*: antes de um estudo detalhado das demonstrações astronômicas ali presentes e da comparação entre a sequência apresentada no livro e aquela dos manuscritos¹⁶⁹ e das cartas, acreditava-se que a *Astronomia nova* era uma reprodução fiel das pesquisas de Kepler, ao passo que hoje, após o trabalho de Voelkel, parece pouco discutível o fato de que essa obra monumental contenha uma estrutura retórica cuidadosamente planejada.

O fato de que a *Astronomia nova* traz uma exposição sistemática subjacente à descrição aparentemente caótica e espontânea do processo de descoberta que levou o grande astrônomo

¹⁶⁷ VOELKEL, 2002, p. 251.

¹⁶⁸ Cf. VOELKEL, 2002, p. 215.

¹⁶⁹ Os manuscritos das pesquisas de Kepler sobre o movimento de Marte foram conservados no seu *Caderno de Marte*, que encontra-se hoje em São Petesburgo e pertence à Academia Russa de Ciências.

a fundar uma nova física celeste se torna menos surpreendente à luz de um comentário feito por Cathérine Chevalley, a propósito do *Suplemento a Vitelo*:

A análise dos *Paralipômenos* [o *Suplemento*] mostra que, assim como nas meditações de Descartes, a ordem da exposição, reivindicada por Kepler como a ordem das descobertas, é de fato uma ordem reconstruída de acordo com as ‘razões’.¹⁷⁰ Desse ponto de vista, os *Paralipômenos* estão para a *Dióptrica* assim como as *Meditações* estão para a primeira parte dos *Princípios de filosofia*: sob a aparência de uma história pessoal, eles se tratam de uma empresa sistemática de fundamentação.¹⁷¹

A construção da *Astronomia nova* como uma narrativa histórica tem o objetivo, acreditamos, de possibilitar uma exposição do novo método astronômico criado por Kepler. Essa interpretação permite que a sua obra mais influente pode ser lida também como um tratado metodológico, onde é mostrado o procedimento adequado para se tratar dos fenômenos astronômicos, segundo o método discutido teoricamente na *Defesa de Tycho*. Essa interpretação é corroborada pela justificativa oferecida pelo próprio Kepler para a forma narrativa do livro:

Não é de se admirar portanto se aos métodos precedentes [dedutivo e indutivo] eu mesclar um terceiro, familiar aos oradores, isto é, uma narração histórica de minhas descobertas. Onde não se trata tanto de conduzir o leitor à compreensão do tratado pelo caminho mais curto, mas também, e acima de tudo, de apresentar os argumentos, meandros, ou mesmo ocorrências fortuitas pelos quais eu, autor, primeiro cheguei a essa compreensão.¹⁷²

¹⁷⁰ Sobre a ordem das razões ver GUÉROULT, 1968.

¹⁷¹ CHEVALLEY, In: KEPLER, 1980, p. 23.

¹⁷² *Nil igitur mirum, si methodis suprioribus admisceam tertiam Oratoribus familiarem, hoc est, historicam mearum inventionum: ubi non de hoc solo agitur, quo pacto lector in cognitionem tradendorum perducatur via compendiosissima: sed de hoc potissimum, quibus Ego author seu argumentis seu ambagibus seu fortuitis etiam occasionibus primitus eodem devenerim. Astronomia nova*, p. 36; KEPLER, 1992-b, p. 78. O trecho também é citado por Claudemir Tossato em TOSSATO, 2003, p. 198.

O caminho que leva à instauração da nova astronomia é o grande tema subjacente ao estudo do movimento de Marte porque ele mostra como deve proceder o astrônomo em vista dos novos princípios da física celeste. A narrativa histórica permite que o leitor perceba como opera, em cada instância, aquela que Kepler considera a sua maior inovação, a introdução da força solar como causa dos movimentos planetários. Em uma carta a de 10 de fevereiro de 1605 ao chanceler bávaro Herwart von Hohenburg Kepler escreve, a respeito da *Astronomia nova*:

Eu explico todos os meus esforços, para que se torne o mais evidente possível que o caminho por mim percorrido é o melhor. Muito tenho indagado a respeito de causas físicas. O meu objetivo aqui é dizer que a máquina celeste não é como um ser animado ou divino, mas como um relógio (esse relógio que acredita-se ser animado, e que concede à obra a glória do criador); e que nela quase toda a variedade dos movimentos se deve a uma simplíssima força corpórea, como no relógio todos os movimentos se devem a um simplíssimo peso.¹⁷³

O que torna a nova astronomia singular com relação ao que havia sido feito antes é o recurso a causas físicas na construção de modelos geométricos designados a expressar os movimentos planetários em torno do Sol. Mas Kepler não se limita a expor que causas são essas e quais os resultados a que elas conduzem. Sua empresa é mais ambiciosa, e envolve uma reformulação completa nos métodos da ciência astronômica. Isso fica patente se notarmos que a física celeste não é apresentada como uma teoria acabada, visto que Kepler aponta uma série de problemas, dos quais voltaremos a tratar mais adiante.

A diferença básica entre a nossa interpretação e aquelas de Stephenson e Voelkel – as quais podemos claramente tratar em conjunto, já que embora os dois trabalhos se desenvolvam em

¹⁷³ *Explico omnes meos conatus, ut tanto melius constet, cur hanc potissimum viam iverim. Multus sum in causis physicis indagandis. Scopus meus hic est, ut Caelestem machinam dicam non esse instar divinj animalis, sed instar horologij (.qui horologium credit esse animatum, is gloriam artificis tribuit operj.), ut in qua penè omnis motuum varietas ab una simplicissima vi magnetica corporalj, utj in horologio motus omnes a simplicissimo pondere.* Carta 325, K.G.W. XV, p. 146.

planos diferentes, eles partem de pressupostos semelhantes e chegam a conclusões complementares - está no fato de que pretendemos demonstrar que a *Astronomia nova* tem antes a finalidade de instaurar um novo quadro metodológico dentro do qual a astronomia passará a se desenvolver do que a de instituir uma física celeste definitiva. Em outras palavras, acreditamos que Kepler escolheu deliberadamente a forma de um relato histórico de seu processo de descoberta porque, muito mais do que convencido da verdade das explicações físicas ali expostas, Kepler estava convencido da necessidade de fundação de uma astronomia física, e no relato histórico de suas descobertas ele encontrou uma maneira privilegiada de expor o método pelo qual é possível construir uma astronomia de posição fundada sobre princípios físicos. Com efeito, as explicações em termos de forças quase-magnéticas nem sempre são perfeitas, como veremos em várias passagens, e Kepler faz questão de frisar essas imperfeições, como ele já indica na introdução:

Eu também devo proceder da mesma maneira [revelarei lealmente o que digo nos principais capítulos] quando, como é costume na física, eu misturo o provável com o necessário e traço uma conclusão provável a partir da mistura. Pois como neste trabalho eu misturei física celeste com astronomia, ninguém deve se surpreender por eu ter recorrido a algumas conjecturas. Pois é esta a natureza da física, da medicina e de todas as ciências que fazem uso de outros axiomas além da segura evidência dos olhos.¹⁷⁴

Poderíamos dizer que o ‘núcleo duro’ da astronomia física de Kepler é o fato da interação entre o Sol e os planetas, e não alguma explicação particular e bem-definida dessa interação. O que Kepler estava procurando demonstrar na *Astronomia nova* era que mesmo sem saber a natureza precisa da interação, o simples fato de se encarar o heliocentrismo como a real constituição física do cosmos era o suficiente para a elaboração de uma teoria planetária cuja precisão não tinha precedentes. A nova astronomia é heliocêntrica e física, e os detalhes da

¹⁷⁴ *Idem faciam etiam tunc, ubi more Physicorum necessariis admiscuero probabilia, exque iis sic mixtis probabilem extruxero conclusionem. Nam quia hoc in Opere Physicam coelestem Astronomiae permiscui, nemo mirari debet, conjecturas etiam nonnullas adhiberi. Haec enim Physicae, haec Medicinae, haec omnium scientiarum Natura est, quae praeter oculorum certissimas indicationes alia etiam adhibent axiomata. Astronomia nova*, p. 19, KEPLER, 1992-b, p. 47.

interação física são lançados para o domínio da metafísica. Se é assim, não é para menos que sempre que vai discutir a forma precisa da interação Kepler cogita a possibilidade de que os planetas sejam dotados de mentes. Essas passagens não são indícios de fraqueza na teoria, mas um convite a pesquisas subseqüentes, algo que Isaac Newton parece ter compreendido.

Stephenson demonstrou que a exigência de que os mecanismos celestes fossem explicáveis fisicamente é a ruptura com a tradição fundamental para a descoberta das duas primeiras leis.¹⁷⁵ Kepler rompe com a distinção epistemológica entre céu e Terra e escreve um relato do processo de ruptura para mostrar aos seus interlocutores a nova forma de proceder em astronomia. Estamos certamente de acordo com Voelkel quanto à intencionalidade e cuidadosa elaboração do discurso narrativo de Kepler, e aceitamos a justificação e a didática como importantes elementos que o influenciaram a adotar forma de composição. Entretanto não acreditamos de forma alguma que essa tenha sido a principal razão. Kepler escreveu a *Astronomia nova* da maneira como ele o fez porque ele pretendia fundar uma nova tradição, mostrando aos astrônomos o caminho pelo qual deve se desenvolver a nova astronomia física. Nicholas Jardine afirma que as obras astronômicas de Kepler são animadas por questões metodológicas e epistemológicas.¹⁷⁶ Veremos aqui até que ponto isso é verdade no caso da *Astronomia nova* e em que medida a exposição da nova astronomia que encontramos aqui é paralela à exposição da *Defesa de Tycho*. Para suportar nossa tese veremos: a) em que constitui essa nova tradição e como Kepler trabalha para instaurá-la, b) como Kepler indica, em cada etapa, o que resta a ser explicado.

Nosso argumento tem o objetivo de demonstrar a importância das explicações deixadas em aberto na *Astronomia nova*, em especial no que diz respeito às explicações dos movimentos através de forças. Além de responder diretamente às questões levantadas na *Defesa de Tycho*, a leitura da *Astronomia nova* como uma exposição metodológica esclarece o significado de toda uma série de passagens sistematicamente escamoteadas pela crítica, onde Kepler parece desistir de encontrar uma explicação para os movimentos por meio de forças. A *Astronomia*

¹⁷⁵ STEPHENSON, 1987.

¹⁷⁶ JARDINE, 1988, p. 1.

nova não encerra uma física celeste acabada. Afinal, ali é resolvido o problema da determinação da forma dos percursos e das velocidades dos planetas, mas a arquitetura do cosmos terá de esperar até a *Harmonia do mundo* para ser explicada.

Kepler não se limita a explicar o movimento de Marte e a propor uma nova interpretação física do heliocentrismo. Ele mostra *como* os princípios da nova física celeste atuam na análise dos dados relativos ao movimento de Marte. A derivação de uma teoria geométrica precisa a partir de uma interpretação física do heliocentrismo é o grande tema da *Astronomia nova*, e a exposição em forma de narrativa histórica tem o objetivo de permitir a visualização da operacionalidade do conceito de força solar no desenvolvimento da teoria de Marte. Vista dessa maneira, a *Astronomia nova* tem para Kepler uma função semelhante à que Francis Bacon imagina para o seu *Novum organon*: servir de fundamento para os desenvolvimentos posteriores da ciência ali nascente.

Assim como Magalhães escreveu nos seus diários a história de sua viagem, abrindo um caminho que os futuros navegadores pudessem percorrer, Kepler, nos fazendo percorrer um longo caminho na investigação do movimento de Marte, nos demonstra que a astronomia física por ele proposta é a única capaz de dar conta do movimento deste planeta, abrindo ao mesmo tempo amplos campos de pesquisa que poderão ser percorridos por astrônomos do futuro.

Com efeito, a *Astronomia nova* é um livro escrito para astrônomos.¹⁷⁷ Seu corpo principal é precedido por três introduções, o que já indica logo de saída o grau de complexidade do caminho pelo qual Kepler pretende conduzir o seu leitor. A primeira introdução, um dos

¹⁷⁷ Em inúmeras passagens da *Astronomia nova* Kepler se dirige ao seu interlocutor como a alguém versado em astronomia matemática. No capítulo 44, por exemplo, ele escreve: 'Pois o meu discurso é dirigido a vós, que sois experimentados na profissão astronômica e que sabeis que em astronomia não se manifestam as evasões sofisticas tão numerosas nas demais disciplinas.' (*Vobiscum mihi sermo est, periti rerum Astronomicarum, qui Sophistica effugia caeteris disciplinis creberrima, in Astronomia nulli patere scitis.*) *Astronomia nova*, p. 286; KEPLER, 1992-b, p. 452. Em todo caso, isso é evidente pela própria natureza do livro e da demonstração nele contida. O argumento da *Astronomia nova* só pode ser apleciado por um leitor razoavelmente familiarizado com os métodos da astronomia de posição. Ou, como escreve Owen Gingerich, Kepler foi um astrônomo para astrônomos. Cf. GINGERICH, 1993, p. 329.

trechos mais amplamente comentados da obra de Kepler, traz um resumo geral das teses físicas mais importantes do livro: a defesa do sistema heliocêntrico como verdadeiro sistema do mundo, a tese da interação física entre o Sol e os planetas, a doutrina da gravidade como atração entre corpos semelhantes. Na segunda introdução se sucedem os sumários dos capítulos tomados isoladamente, e a estrutura da *Astronomia nova* é então explicitada de um ponto de vista estritamente astronômico. Por fim, essas duas introduções são complementadas por um quadro sinóptico da obra. Ao contrário da primeira introdução, os sumários dos capítulos e o quadro sinóptico são obscuros e pouco estudados.¹⁷⁸

A melhor reconstrução do argumento da *Astronomia nova* é aquela oferecida por Bruce Stephenson¹⁷⁹. Não pretendemos aqui rivalizar com sua exposição e nos limitaremos a examinar, à luz da *Defesa de Tycho*, a natureza das relações de causalidade operantes na *Astronomia nova* e em que aspectos a leitura do livro como uma exposição metodológica torna possível uma melhor compreensão de alguns problemas delimitados e pouco estudados: a demonstração da equivalência dos três sistemas de mundo na primeira parte (tema do quinto capítulo deste trabalho) e as explicações físicas oferecidas por Kepler para o ponto equante de Ptolomeu e para o movimento da Lua (de que tratamos no sexto capítulo).

A *Astronomia nova* é constituída de cinco partes. Na primeira delas Kepler demonstra a equivalência observacional entre os três grandes sistemas de mundo, ptolomaico, copernicano e tychônico. Esta é uma etapa importante do livro, pois como vimos nos capítulos precedentes Kepler adota uma posição estritamente realista com relação ao heliocentrismo, e deve explicar o sucesso preditivo dos modelos baseados em outros sistemas, diferentes do copernicano. A segunda parte reproduz uma tentativa de elaboração de uma teoria do movimento de Marte *à maneira dos antigos*, isto é, supondo uma órbita

¹⁷⁸ Voelkel parece ter sido o primeiro a notar que a segunda introdução se dirige aos astrônomos profissionais e a dedicar-lhe algumas páginas. Cf. VOELKEL, 2002, p. 231-234.

¹⁷⁹ Bruce Stephenson é, até onde sabemos, o primeiro a reconstruir o argumento completo da *Astronomia nova* em STEPHENSON, 1987.

circular.¹⁸⁰ Ali é tecida uma explicação física para o ponto equante de Ptolomeu, que Kepler adota preferencialmente ao epiciclo copernicano (vide glossário).

A terceira parte da *Astronomia nova* trata do movimento da Terra, e Kepler a denomina “a chave da astronomia mais profunda” (*clavis astronomiae penitioris*). Com efeito ele percebe que, se a Terra se move ao redor do Sol, então esse movimento deve ser semelhante àquele dos demais planetas, e que da sua compreensão depende a interpretação dos movimentos observados. Ali Kepler retoma a investigação acerca da variação de velocidade de um planeta em sua órbita excêntrica ao redor do Sol, e por fim o ponto equante é substituído pela lei das áreas. A quarta parte analisa o movimento de Marte nas longitudes, e a quinta o movimento de Marte nas latitudes (vide glossário).

3.3 A defesa do copernicanismo

Os argumentos apresentados em defesa do copernicanismo na introdução à *Astronomia nova* são algo diferentes daqueles propostos no *Mistério cosmográfico*.

Na *Astronomia Nova* a crítica de Kepler se dirige principalmente ao modelo de Tycho Brahe. No modelo de Tycho os planetas giram em torno do Sol mas este, assim como a Lua, gira em torno da Terra (os três grandes sistemas de mundo encontram-se representados no glossário). O modelo de Tycho era muito reputado à época de Kepler por conjugar as vantagens computacionais do modelo de Copérnico com a centralidade da Terra no cosmos, tese fundamental para a manutenção da física aristotélica dos lugares naturais.

Como Kepler havia notado no *Mistério cosmográfico*, Copérnico já observara que os períodos de revolução anual dos planetas aumentam de acordo com o aumento de suas distâncias ao Sol. Por outro lado, se a Terra se move, suas variações de velocidade também são governadas por sua distância ao Sol: quando se aproxima, sua velocidade aumenta e,

¹⁸⁰ Inicialmente Kepler acreditava que, de posse dos dados de Tycho, ele iria solucionar rapidamente o problema do movimento de Marte. O astrônomo chegou mesmo a fazer uma aposta com Longomontanus, comprometendo-se a concluir a tarefa em um prazo de oito dias. Cf. CASPAR, 1993, p. 126-127.

quando se afasta, sua velocidade diminui. Através de uma hipótese física, segundo a qual a fonte dos movimentos dos cinco planetas está no Sol, Kepler conclui que é muito mais provável que o movimento da Terra também seja causado pelo Sol, e que portanto a Terra se mova. Caso contrário, seria preciso supor a existência de duas fontes de movimento, uma situada no Sol, responsável pelos movimentos dos cinco planetas, e a outra situada na Terra e responsável pelo movimento do Sol.

Esse argumento, dirigido aos defensores do modelo misto de Tycho, é de ordem física. Destruídos os orbes sólidos e tendo sido introduzida uma causalidade física para explicar os movimentos dos cinco planetas em torno do Sol, o sistema de Tycho se torna pouco plausível. Se o Sol é a fonte de movimento de pelo menos cinco planetas, o mais provável é que ele repouse imóvel no centro do Universo e cause também o movimento da Terra. “Ora, é mais plausível que a fonte de todo movimento permaneça em seu lugar do que se mova.”¹⁸¹

Na introdução da *Astronomia nova*, Kepler expõe outros argumentos a favor do movimento da Terra. A explicação aristotélica para a queda dos corpos graves, atraídos para o centro do mundo, seu lugar natural, são rejeitadas. A física celeste kepleriana é essencialmente baseada na interação entre corpos físicos por meio de potências ou forças capazes de agir à distância. Na discussão sobre a gravidade Kepler chama a atenção para o absurdo em que consiste a atração de um corpo grave pelo centro do mundo, um ponto matemático:

Um ponto matemático, seja ele ou não o centro do mundo, não pode mover os corpos graves, nem de maneira efetiva e nem atuando como um objeto em direção ao qual eles tendem. (...) É impossível que a forma da pedra, ao mover seu corpo, busque um ponto matemático, o centro do mundo, sem consideração do corpo onde está localizado esse ponto.¹⁸²

¹⁸¹ *Fontem autem omnis motus verisimilius est suo loco manere quam moveri. Astronomia nova*, p. 23; KEPLER, 1992-b, p. 52.

¹⁸² *Punctum mathematicum, sive centrum mundi sive non, nequit movere gravia neque effective neque objective, ut ad se accedant. (...) Impossibile est, ut forma lapidis, movendo corpus suum,, quaerat punctum mathematicum aut mundi medium, citra respectum corporis in quo est illud punctum. Astronomia nova*, p. 24; KEPLER, 1992-b, p. 54.

A queda dos corpos deve-se unicamente à presença de outros corpos. O espaço não exerce nenhuma influência sobre os corpos que o ocupam, e não é capaz de causar seus movimentos. A teoria da gravidade proposta por Kepler é baseada em uma relação recíproca entre corpos de mesma origem (*cognata corpora*):

A gravidade é uma relação corpórea mútua entre corpos semelhantes para a união ou agrupamento (essa disposição das coisas também está presente na faculdade magnética); assim, a Terra atrai a pedra muito mais do que a pedra atrai a Terra.¹⁸³

A interpretação da gravidade como uma disposição natural dos corpos a se unirem com outros corpos de mesma natureza tem algumas consequências interessantes. Em primeiro lugar, a gravidade consiste uma interação à distância entre corpos, que Kepler reconhece ser nesse sentido semelhante à magnética. Ora, essa idéia de interação à distância entre corpos também está por trás do conceito de força motriz, introduzido por Kepler para estabelecer uma ligação de causalidade entre o Sol, centro do mundo, e os movimentos dos planetas que o orbitam. Além disso, a gravidade assim concebida é uma interação recíproca. Do mesmo modo como a Terra atrai a pedra, a pedra também atrai a Terra, mesmo que com intensidade menor. Kepler também reconhece que a Terra e a Lua são corpos de mesma natureza, sugerindo uma experiência de pensamento: se a Terra deixasse de atrair as águas para si, toda a água do mar seria erguida e escoaria para o corpo da Lua.¹⁸⁴

Simultaneamente, Kepler também refuta a distinção entre os corpos leves e pesados, essencial para a física aristotélica. A leveza não é absoluta mas apenas comparativa, sendo os corpos leves simplesmente menos pesados ou menos densos. “Nada que consiste de matéria corpórea é absolutamente leve...”¹⁸⁵ Em consequência, os corpos leves não são atraídos pela superfície esférica que circunda a região terrestre, mas simplesmente menos atraídos pela Terra do que os corpos mais pesados, sendo por eles deslocados.

¹⁸³ *Gravitas est affectio corporea, mutua inter cognata corpora ad unionem seu conjunctionem (quo rerum ordine est et facultas Magnetica) ut multo magis Terra trahat lapidem, quam lapis petit Terram. Astronomia nova*, p. 23; KEPLER, 1992-b, p. 55.

¹⁸⁴ Cf. *Astronomia nova*, p. 25-26; KEPLER, 1992-b, p.56.

¹⁸⁵ *Leve vero nihil est absolute, quod corporea materia constat... Astronomia nova*, p. 27; KEPLER, 1992-b, p.57.

Outra objeção clássica ao movimento da Terra a ser refutada logo na introdução da *Astronomia nova* é aquela concernente ao movimento de projéteis: Se a Terra girasse diariamente de oeste para leste, um corpo lançado verticalmente para cima cairia, devido ao movimento rotacional da Terra, a oeste do ponto de lançamento. Pelo mesmo motivo, um corpo lançado para o leste alcançaria uma distância muito maior do que um corpo lançado para oeste. Esses efeitos não são observados na natureza: os corpos lançados verticalmente para cima voltam a cair no lugar de onde foram lançados, e projéteis lançados horizontalmente com uma mesma força alcançam a mesma distância em qualquer direção.¹⁸⁶

Kepler responde que os projéteis e mesmo as nuvens não se afastam o suficiente da superfície da Terra para escaparem de seu alcance, sendo carregados com ela em seu movimento de rotação.¹⁸⁷ As nuvens e os corpos lançados se movem junto com a Terra exatamente do mesmo modo como se movem os corpos que estão em contato com sua superfície. Para que essa resposta seja válida, faz-se necessária uma explicação da ligação entre a Terra e esses corpos que não estão em contato com ela. De acordo com Kepler, Copérnico teria estabelecido essa ligação através de uma alma motriz, que seria responsável pela rotação da Terra e de todos os corpos próximos a ela, enquanto ele propõe uma explicação puramente física, através da gravidade ou da faculdade magnética.¹⁸⁸

A explicação kepleriana das marés também é apresentada, em linhas gerais, na introdução da *Astronomia nova*. Segundo Kepler, a esfera de influência da força atrativa da Lua se estende até a Terra, atraindo as águas conforme ela passa sobre elas em seu curso. O efeito é imperceptível nos mares fechados, mas é marcante nos oceanos, onde os leitos são amplos o bastante para comportar o movimento da água.

¹⁸⁶ Essa objeção também é atacada por Galileu na segunda jornada do *Diálogo* (GALILEU, 2001).

¹⁸⁷ Cf. *Astronomia nova*, p. 27; KEPLER, 1992-b, p. 58.

¹⁸⁸ Cf. *Astronomia nova*, p. 28; KEPLER, 1992-b, p. 58-59. Diferentemente do que diz Kepler a explicação que encontramos no *De Revolutionibus* não nos parece animista, mas puramente física: “E isto passa-se assim, quer porque o ar circundante revista a mesma natureza da Terra, por estar misturado com a matéria terrestre e aquosa, quer porque o movimento do ar é adquirido, pois partilha com a Terra da sua rotação incessante, devido à contiguidade e à ausência de resistência. (...) Impõe-se assim dizer que o movimento dos corpos que caem e dos que sobem no Universo é um movimento duplo e em todos os casos rigorosamente composto de movimentos retilíneo e circular.” (COPÉRNICO, 1984, p. 41)

Essa teoria das marés é baseada em uma interação física entre a Lua e as águas dos oceanos.¹⁸⁹ Kepler a usa indiretamente como argumento a favor do movimento da Terra, pois se a atração exercida pela Lua se estende até a Terra com intensidade suficiente para puxar em sua direção as águas dos oceanos, então é natural que a força atrativa da Terra, muito mais forte, se estenda para muito além da Lua, de modo que toda a matéria terrestre, em contato ou não com o globo, está sujeita a essa força atrativa e não pode dela escapar.¹⁹⁰ Por esse expediente Kepler consegue relacionar a explicação física das marés por ele proposta ao fato observacional de que o lançamento de projéteis não apresenta nenhuma anisotropia que possa indicar que a Terra está em movimento.

Outro ponto freqüentemente citado pelos opositores do sistema copernicano é a imensa distância da esfera das estrelas fixas, exigida pela ausência de paralaxe em suas posições devido ao movimento da Terra (vide glossário). Kepler afirma ter demonstrado, nos capítulos 15 e 16 do *De Stella Nova*¹⁹¹, que essa distância é natural e bem proporcionada, enquanto a velocidade de rotação da esfera das estrelas fixas no sistema geocêntrico é que é anti-natural e desproporcionada. Ora, como já foi mencionado, os períodos de revolução dos planetas aumentam com suas distâncias ao Sol, e foi a constatação deste fato que sugeriu a Kepler, em primeiro lugar, a possibilidade de explicar os movimentos dos corpos celestes a partir de uma causalidade física. Enquanto o período da Terra é de um ano, o de Marte é de quase dois, o de Júpiter é de doze e o de Saturno é de trinta anos. Como explicar então que as estrelas, situadas a uma distância muitíssimo superior à da órbita de Saturno, possam girar com um período de apenas 24 horas?

¹⁸⁹ Galileu rejeitou a teoria kepleriana das marés por considerar que a ação dos corpos celestes sobre os corpos terrestres pertence à esfera da astrologia, e não se presta à elaboração de explicações científicas: “Mas dentre todos os grandes homens que filosofaram acerca deste fenômeno notável, Kepler me espanta mais do que qualquer outro. A despeito de sua mente aberta e aguda, e embora ele disponha nas pontas dos dedos dos movimentos atribuídos à Terra, ele não obstante emprestou seu ouvido e seu assentimento ao domínio da Lua sobre as águas, a propriedades ocultas e a outras infantilidades.” GALILEU, *Apud*. COHEN, I. B., 1985. O comentário revela o quão ousado era então o projeto de fundação de uma astronomia física. A teoria de Kepler sairia vencedora: hoje explicamos as marés pela atração gravitacional exercida pela Lua (e, em menor escala, pelo Sol) sobre as águas dos oceanos.

¹⁹⁰ Cf. *Astronomia nova*, p. 26-27; KEPLER, 1992-b, p. 56-57.

¹⁹¹ O *De Stella nova* foi publicado em 1606 e trata da estrela nova de 1604 (vide glossário).

A rigor este argumento apresenta uma falha: enquanto os planetas não estão presos a nenhum orbe sólido e devam ter seus movimentos explicados a partir de uma causa física, as estrelas fixas continuam ligadas a uma esfera cristalina, e o movimento desta esfera não precisa necessariamente ser de mesma natureza que os movimentos dos planetas. Entretanto, tomado de um ponto de vista mais geral o argumento permanece válido: a esfera das estrelas fixas está situada a uma grande distância do centro do Universo, e não parece razoável para Kepler que ela deva girar em um período tão curto como 24 horas, pois isso envolveria uma enorme velocidade tangencial.

Por fim, Kepler responde àqueles que acusam o copernicanismo de ser contrário às escrituras. Vimos como no *Mistério cosmográfico* ele havia operado uma síntese entre o cristianismo e o copernicanismo, fazendo do heliocentrismo o reflexo no mundo criado do dogma da trindade. Na *Astronomia nova* Kepler vai mais longe, e assume o risco de reinterpretar passagens bíblicas que sugerem a centralidade e repouso da Terra, sugerindo uma via conciliatória entre o copernicanismo e as escrituras. Ele começa a discussão com um verso de Virgílio que resume o teor de sua interpretação: “Somos levados do porto, e a terra e as cidades se afastam.”¹⁹²

A Bíblia não teria sido escrita com a finalidade de ensinar astronomia aos homens, mas com o propósito muito mais nobre de transmitir uma mensagem moral. Para que essa mensagem fosse compreendida por todos os homens, as passagens referentes à natureza seguem a linguagem usual, mantendo-se próximas ao que mostram os sentidos. É por isso que, no que se refere à astronomia, as passagens bíblicas permanecem fiéis ao sentido da visão.¹⁹³

As incongruências apontadas pelos defensores do sistema geocêntrico resultariam de sua incompreensão quanto ao propósito da Bíblia, e não de uma incompatibilidade fundamental entre as escrituras e o copernicanismo. Essas passagens são na verdade prova de que a Bíblia segue a linguagem sugerida pela percepção sensorial imediata. Kepler cita exemplos em que

¹⁹² *Provehimur portu, Terraeque urbesque recedunt.* (Virgílio, *Eneida*, III, 72) *Astronomia nova*, p. 28; KEPLER, 1992-b, p. 59.

¹⁹³ Cf. *Astronomia nova*, p. 29; KEPLER, 1992-b, p. 60.

o vocabulário da astronomia tradicional entra, pelo mesmo motivo, em flagrante conflito com o próprio geocentrismo, como no emprego do termo *solstício*, quando esses astrônomos não acreditam que o Sol de fato interrompa o seu curso ao redor da Terra, ou na expressão *planetas estacionários*, que da mesma forma não se refere a um estado real de repouso desses corpos.¹⁹⁴ Mesmo que o geocentrismo forneça uma representação muito mais direta daquilo que é mostrado pela experiência bruta, ele em todo caso não gera modelos imediatamente correspondentes aos complicados movimentos observados, mas que se diferenciam desses movimentos justamente porque possibilitam a sua descrição e predição.

A primeira parte da *Astronomia nova* relaciona as diferentes hipóteses geométricas construídas com o objetivo de representar os movimentos observados nos céus. Trataremos da primeira parte no quinto capítulo do presente trabalho. Antes, porém, vejamos um pouco mais detalhadamente como Kepler concebe o mais importante princípio físico de sua astronomia: a força solar.

¹⁹⁴ Cf. *Astronomia nova*, p. 29; KEPLER, 1992-b, p. 60.

Capítulo 4 – A força solar

Vimos no primeiro capítulo deste trabalho que o decréscimo linear das velocidades translacionais dos planetas com o aumento da distância ao centro do mundo fora explicado no *Mistério cosmográfico* por uma alma motriz situada no Sol, responsável pelos movimentos de todos os planetas. As diferentes velocidades dos planetas haviam sido então creditadas à atenuação da alma motriz solar com o aumento da distância ao Sol. Para que a diminuição linear das velocidades translacionais dos planetas com o aumento da distância ao Sol fosse explicada, Kepler fizera a alma motriz se atenuar de maneira igualmente linear com a distância ao centro do mundo.¹⁹⁵ Vale lembrar que à época da redação do *Mistério cosmográfico* Kepler ainda não havia descoberto a lei de atenuação da luz com o quadrado da distância à fonte¹⁹⁶, e a atenuação linear da alma motriz podia ser diretamente corroborada pelo exemplo da luz, cuja intensidade Kepler acreditava diminuir linearmente com a distância até a fonte.¹⁹⁷

Na *Astronomia nova* Kepler desenvolve a idéia de força (*vis*) ou potência (*virtus*) motriz como um conceito matematizado.¹⁹⁸ Embora ele conceba a gravitação como uma atração entre corpos semelhantes, em nenhum momento é estabelecida qualquer conexão entre a interação gravitacional e a força motriz solar. A natureza dessa força é em grande medida definida através da analogia com a luz. Luz e força motriz são definidas como *species*

¹⁹⁵ A explicação proposta por Kepler para os movimentos celestes se afasta da física aristotélica porque supõe a existência de uma alma motriz solar capaz de agir à distância sobre os planetas, sem que haja contato entre os corpos envolvidos. No entanto, Kepler se mantém ligado ao universo conceitual da Antigüidade ao imaginar que uma tal entidade seja responsável pela variação de posição dos corpos, isto é por suas velocidades, e não pela variação nas velocidades, a aceleração, como pensaria Isaac Newton algumas décadas mais tarde. Este é um excelente exemplo de como os dados da experiência encontram-se sempre ‘contaminados’ por alguma formulação de ordem teórica.

¹⁹⁶ Uma das grandes contribuições de Kepler para a óptica, a determinação da forma correta da atenuação da luz com a distância à fonte, é apresentada no *Suplemento a Vitelo*, publicado em 1604. No livro, Kepler define a luz como uma superfície esférica em expansão sem sofrer perdas, e deriva a sua intensidade a uma distância ‘r’ da fonte a partir da área da superfície esférica correspondente, dada por $4 \pi r^2$. Cf. *Suplemento*, p. 22; KEPLER, 1980, p. 112. Discutimos a exposição da natureza da luz presente no *Suplemento* no primeiro apêndice anexado a este trabalho.

¹⁹⁷ Cf. *Mistério cosmográfico*, p. 71; KEPLER, 1992-a, p. 194.

¹⁹⁸ O conceito de força motriz solar é apresentado nos capítulos 33-38 da *Astronomia nova: Astronomia nova*, p. 236 - 256; KEPLER, 1992-b, p. 376 – 406.

imateriais¹⁹⁹, aptas a transportar a influência de um corpo até um outro corpo espacialmente distante. A propagação da força motriz e sua ação sobre os corpos dos planetas são avaliadas segundo o exemplo constituído pela luz. Kepler observa mais uma vez que a força solar não pode no entanto ser identificada com a luz, ou os planetas se moveriam mais lentamente quando parte dessa luz fosse obstruída por outro corpo celeste, o que não é observado.²⁰⁰ Ele considera plausível que a força solar seja magnética ou quase-magnética, visto que ela age à distância e que fora recentemente demonstrada a natureza magnética da Terra.²⁰¹

Kepler apresenta uma dedução da idéia de força motriz solar partindo da relação de proporcionalidade observada entre as distâncias dos planetas ao Sol e seus períodos de revolução anual.²⁰² Segundo ele, essa relação poderia a princípio ser interpretada de três maneiras. Ou o afastamento do centro do mundo causa um decréscimo na velocidade do planeta, ou o decréscimo na velocidade do planeta causa o seu afastamento com relação ao centro do mundo, ou o afastamento e a diminuição da velocidade têm uma causa em comum. A terceira hipótese é imediatamente descartada, já que não existe no cosmos um terceiro elemento capaz de causar o afastamento do planeta em relação ao Sol e sua correspondente diminuição de velocidade. Kepler observa então que a distância ao centro é anterior à velocidade do planeta, tanto na razão como na natureza. Com efeito, o movimento depende do espaço no qual ele se dá, mas o espaço não é dependente do movimento. Assim, a primeira hipótese é escolhida. A variação da distância entre o planeta e o Sol é a causa da variação na intensidade do movimento, isto é, na velocidade.

A distância é uma relação dependente dos pontos extremos, neste caso o Sol e os planetas, o que significa que essa relação de causalidade só pode ter origem nos próprios planetas ou no corpo do Sol. No caso dos planetas, Kepler descarta uma variação de massa relativa à aproximação ou afastamento do Sol, e considera que sem os orbes sólidos seria difícil explicar como as almas motrizes deslocariam os planetas através do espaço. Os seres

¹⁹⁹ Cf. *Astronomia nova*, p. 240; KEPLER, 1992-b, p. 382.

²⁰⁰ C.f. K.G.W. III, p. 240; KEPLER, 1992-b, p. 380.

²⁰¹ Tanto no *Suplemento a Vitelo* quanto na *Astronomia nova* Kepler faz menção da descoberta do magnetismo terrestre, anunciada em 1600 por William Gilbert no seu *De magnete*. Cf. *Astronomia nova*, p. 246; KEPLER, 1992-b, p. 390-391; *Suplemento a Vitelo*, p. 198; KEPLER, 2000, p. 237.

²⁰² Cf. *Astronomia nova*, p. 236-238; KEPLER, 1992-b, p. 376-379.

animados são providos de órgãos de locomoção, capazes de efetuar o movimento imposto pela alma. Se os planetas estivessem presos a orbes sólidos, suas almas motrizes poderiam fazer girar esses orbes. Contudo, estando os planetas soltos no espaço, mesmo que eles fossem providos de almas inteligentes não teriam os meios físicos para perfazer suas órbitas.²⁰³ Assim, para explicar as variações de velocidade observadas, Kepler opta pelo Sol, o centro do mundo de onde doravante deverão ser medidas as distâncias de todos os planetas.

Após sua chegada a Praga, Kepler entra em contato com o magnetismo de William Gilbert. No *De magnete*, publicado em 1600, Gilbert defende que a Terra seja um grande magneto, e essa idéia leva Kepler a considerar que muito provavelmente a força motriz também seja de natureza magnética. O movimento mensal da Lua em torno da Terra é explicado por Kepler através do magnetismo terrestre, que transmite à Lua o movimento de rotação diária do planeta. Por analogia, a força motriz solar age transmitindo aos planetas o movimento de rotação do Sol em torno de seu eixo. Kepler não tinha, a esta altura, nenhuma evidência empírica da rotação do corpo solar, idéia que lhe é sugerida pelas constatações de que todos os movimentos planetários têm a mesma direção e de que períodos de revolução crescem com o aumento da distância ao Sol. No ano seguinte à publicação da *Astronomia nova*, Kepler tomaria conhecimento da confirmação da rotação solar pelas observações telescópicas de Galileu.²⁰⁴

A força motriz percorre necessariamente o mesmo caminho que os planetas, analogamente ao que acontece em catapultas e outros movimentos violentos.²⁰⁵ Assim, a força é definida como uma *species* dotada de movimento circular em torno do Sol, causado por um movimento rotacional do próprio Sol em torno do seu eixo. É esse movimento simples e

²⁰³ Kepler compara os orbes sólidos à bengala que mostra ao cego a estrada. Cf. *Astronomia nova*, p. 69; KEPLER, 1992-b, p. 126.

²⁰⁴ Cf. KEPLER-GALILEU, 1984.

²⁰⁵ Esse tipo de analogia entre sistemas mecânicos como balanças e alavancas e os movimentos astronômicos é típico da física celeste kepleriana. Cf. TOSSATO, 2003, p. 48-49.

circular que é transmitido aos planetas.²⁰⁶ O período de rotação do Sol é estimado através de uma comparação entre o movimento da Lua e o movimento de Mercúrio:

Assim a *species* é transportada em um círculo, de modo que este movimento cause os movimentos dos planetas; o corpo do Sol, ou a fonte, deve necessariamente se mover ao mesmo tempo, não certamente de uma posição para outra no mundo (visto que eu disse depositar, com Copérnico, o corpo do Sol no centro do mundo) mas sobre o seu centro ou eixo, ambos imóveis, suas partes passando de um lugar a outro ainda que o corpo todo permaneça no mesmo lugar.²⁰⁷

O movimento rotacional transmitido à força motriz se dá com velocidade finita, uma vez que ele resulta da rotação do Sol, um corpo material. Por outro lado, a imaterialidade da força motriz garante que ela, como a luz, não seja dissipada ou sofra qualquer perda em seu trajeto em direção aos planetas, ao contrário do que acontece com as emissões materiais, como os odores. Ela também garante também que, assim como acontece com a luz, a sua propagação no espaço se dê com velocidade infinita. Distinguem-se então duas velocidades na força motriz: a velocidade infinita de propagação entre o Sol e os planetas, e a velocidade de rotação impressa pelo movimento rotacional do Sol, finita porque resultante da rotação de um corpo material.

Da diminuição nas velocidades dos planetas em suas órbitas conforme eles se afastam do Sol, Kepler conclui que a velocidade angular de todos os planetas, inclusive Mercúrio, é menor do que aquela do Sol em torno de seu próprio eixo. Como a força motriz é imaterial, sua velocidade de rotação é a mesma em todo o espaço interplanetário, e visto que todos os planetas são corpos materiais e portanto tendem naturalmente ao repouso²⁰⁸, aqueles

²⁰⁶ O movimento impresso pelo Sol nos planetas é circular. A forma elíptica das órbitas é explicada pela interação da força solar com o magnetismo de cada planeta, que produz uma variação contínua na distância entre os dois astros e, composta com o movimento circular, resulta na órbita elíptica. A explicação da forma elíptica das órbitas em termos do magnetismo dos planetas é discutida no sétimo capítulo deste trabalho.

²⁰⁷ *Specie ergo mota in gyrum, ut eo motu motum Planetis inferat, corpus Solis, seu fontem, una moveri necesse est; non quidem de spacio in spacium mundi: dixi enim me id corpus Solis cum COPERNICO in centro mundi relinquere: sed super suo centro, seu axe, immobilibus; partibus ejus de loco in locum (in eodem tamen spacio, toto corpore manente) transeuntibus. Astronomia nova*, p. 243; KEPLER, 1992-b, p. 386.

²⁰⁸ Cf. *Astronomia nova*, p. KEPLER, 1992-b, p. 388.

situados mais externamente, onde a força motriz é mais rarefeita, oferecem maior resistência ao movimento e descrevem seus percursos em períodos mais longos.

No capítulo 32 da *Astronomia nova* Kepler trata da diminuição da velocidade de um planeta²⁰⁹ quando ele se afasta do Sol em sua órbita excêntrica (e ainda circular). A força motriz é definida em um capítulo onde os detalhes dos movimentos dos planetas ainda não estão bem estabelecidos, e vai exercer uma grande influência na derivação das duas primeiras leis, como veremos nos capítulos seguintes. É certo que, na investigação das órbitas planetárias, Kepler lança mão de hipóteses geométricas introduzidas *a priori*, o círculo, a oval, a elipse. Entretanto, como aponta Irving Bernard Cohen²¹⁰, as hipóteses geométricas particulares não são necessárias, mas apenas possíveis. A comprovação cabe à experiência, pois somente ela é capaz de revelar qual, dentre os ordenamentos geométricos possíveis, foi aquele escolhido pelo Criador. Nesse processo de construção da nova astronomia, a força solar também opera como critério, pois Kepler seleciona como fisicamente viáveis apenas os modelos geométricos onde o Sol serve como ponto de referência, ao mesmo tempo em que recusa aqueles definidos em termos de pontos vazios de corpo, sem significado físico, como por exemplo o centro da órbita da Terra.²¹¹

4.1 O problema da atenuação da força solar

A força ou potência motriz é, como a luz, definida por Kepler como uma *species* imaterial.²¹² Sua ação sobre os corpos dos planetas transportando-os ao redor do Sol é comparada ao aquecimento de um corpo exposto à luz solar, já que os planetas por ela movidos são corpos materiais, que devem sofrer o seu efeito de maneira semelhante ao aquecimento de um corpo material exposto à luz. Neste caso, se assim como a luz a força motriz tem a estrutura geométrica de uma superfície esférica, seria de se esperar que a sua atenuação se desse com o quadrado da distância à fonte.

²⁰⁹ Aqui, como em outros lugares onde faz considerações de ordem mais geral, Kepler trata dos planetas, e não de Marte especificamente.

²¹⁰ Cf. COHEN, 1985, p. 130.

²¹¹ A importância do conceito de força na derivação das leis é discutida por STEPHENSON, 1987.

²¹² Cf. *Astronomia nova*, p. 240; KEPLER, 1992-b, p. 382.

Em 1602, como atesta carta datada de 1º de outubro ao astrônomo frísio David Fabricius²¹³, Kepler já havia descoberto a lei de atenuação da luz com o quadrado da distância à fonte. A princípio, Kepler imagina que a força motriz deva, como a luz, se atenuar com o quadrado da distância à fonte. Por outro lado, a luz ilumina as superfícies dos corpos enquanto a força motriz movimenta os corpos tridimensionais dos planetas, de modo que talvez fosse de se esperar uma atenuação com o cubo da distância ao Sol.²¹⁴

No entanto, uma força que se atenuasse com o quadrado ou com o cubo da distância causaria velocidades planetárias diferentes daquelas que são observadas. No *Mistério* a atenuação linear da alma motriz solar havia sido deduzida dos períodos dos planetas, e na *Astronomia nova* ela é confirmada pela variação observada na velocidade de um planeta em sua órbita conforme ele se aproxima ou se afasta do Sol.²¹⁵

Vimos que a própria idéia de explicar os movimentos planetários através de uma força central, lançada do Sol junto com a luz, havia sido sugerida a Kepler por um fato experimental, as velocidades translacionais médias dos planetas tabuladas por Copérnico, que são maiores para os planetas mais distantes do Sol. Uma força que se atenuasse de maneira diferente da linear não serviria para explicar a tabela, assim como não concluiria a análise que precede a introdução do conceito de força solar. Ela também não explicaria as variações de velocidade observadas ao longo do percurso de um planeta, tradicionalmente expressas pelo ponto equante da astronomia ptolomaica. Em outras palavras, embora a derivação das propriedades da força a partir de sua estrutura geométrica seja importante para

²¹³ David Fabricius (1564-1617) foi o principal correspondente de Kepler entre 1602 e 1609, período que compreende os anos de composição da *Astronomia nova*. Em agosto de 1596 Fabricius descobriu a primeira estrela variável, Mira Ceti, mas ele é mais conhecido por sua extensa correspondência com Kepler. Foi numa carta a Fabricius que Kepler afirmou pela primeira vez que a órbita de Marte era elíptica. (carta 358, K.G.W. XV, p. 240-280)

²¹⁴ Cf. *Astronomia nova*, p. 240-241; KEPLER, 1992-b, p. 381-382.

²¹⁵ A investigação da variação de velocidade dos planetas em suas órbitas excêntricas constitui um dos temas mais importantes da *Astronomia nova*, e tem como resultado a lei das áreas, de acordo com a qual a linha que liga um determinado planeta ao Sol varre áreas iguais em tempos iguais. A lei, que Kepler finalmente decobre ser exata, é introduzida como uma aproximação da chamada lei das distâncias, que estabelece que a velocidade de um planeta em um determinado trecho de sua órbita é proporcional a sua distância ao Sol nesse trecho. Cf. *Astronomia nova*, p. 233-234, 248; KEPLER, 1992-b, p. 373, 394.

os propósitos científicos de Kepler, ela deixa de interessá-lo quando entra em conflito com a experiência. Neste caso, a experiência diz que a força motriz se atenua linearmente, e cabe à física celeste encontrar os motivos para essa aparente discrepância com relação ao comportamento da luz.

A interpretação tradicional dessa diferença entre as propagações da luz e da força motriz propõe que, diferentemente do que acontece com a luz, a força motriz kepleriana não se expande como uma superfície esférica em torno do corpo solar mas como um disco, que se propaga somente no plano da eclíptica, sobre o qual estão situados os percursos dos planetas. Esse plano de força, no qual se movem os planetas, estaria situado sobre o equador solar, o que explicaria a atenuação com o inverso da distância, corroborada pela experiência.²¹⁶ Dessa forma se explicaria também o fato de que todos os planetas descrevem seus percursos aproximadamente sobre um mesmo plano, ao mesmo tempo em que seria conservada a formulação do *Mistério* para a atenuação da força motriz. Esse tipo de leitura é sugerido por uma passagem freqüentemente citada da *Astronomia nova*, onde se lê:

Por outro lado a luz escoar esfericamente por linhas retas, enquanto a força motriz, embora escoar por linhas retas, o faz circularmente; isto é, ela só faz esforço em uma região do mundo, de oeste para leste, e não o oposto, nem em direção aos pólos, etc.²¹⁷

A primeira parte dessa passagem pode de fato levar à conclusão de que a força motriz solar se difunde somente no plano da eclíptica. Essa interpretação é motivada pela explicação direta que ela fornece para a diferença de atenuação entre a luz e a força motriz, a partir da própria estrutura geométrica cada propagação imaterial. Além disso, se a força solar só existe no plano da eclíptica, fica explicado o fato observacional de que todas as órbitas planetárias se situam aproximadamente sobre este plano.

²¹⁶ Westman, Aiton e Gingerich, por exemplo, são dessa opinião. Cf. WESTMAN, 1975, p. 716; AITON, 1969, p. 78; GINGERICH, 1993, p. 316.

²¹⁷ *Rursum lux rectis effluit orbiculariter, virtus movens rectis quidem sed circulariter; hoc est in unam tantum plagam mundi ab occasu in ortum nititur, non contra, non ad polos etc.* K.G.W.III, p. 240; KEPLER, 1992-b, p. 380-381. Donahue cometeu um pequeno deslize, e em sua tradução aparece ‘de leste para oeste’. Seguimos a opção de Cathérine Chevalley e traduzimos *effluo* pelo verbo escoar (*écouler*). Cf. CHEVALLEY, In: KEPLER, 1980, p. 78.

No entanto, essa leitura possui a desvantagem de enfraquecer a fundamentação teórica da astronomia física de Kepler. Toda a análise das propagações imateriais encontrada no primeiro capítulo do *Suplemento a Vitelo* depende da forma esférica dessas propagações e de sua coincidência com a forma esférica do mundo, e quando Kepler, na *Astronomia nova*, invoca a semelhança entre a luz e a força motriz, ele o faz porque a luz constitui um paradigma, previamente estudado, em analogia com o qual ele pode compreender a natureza da força que move os planetas.

Bruce Stephenson²¹⁸ foi perspicaz ao perceber que essa solução não é admissível. É certo que a atenuação da força motriz se dá linearmente com o inverso da distância, mas isso não pode resultar do fato de que ela só se espalhe no círculo situado sobre o equador solar. Ele cita uma passagem do capítulo 36 da *Astronomia nova*, onde Kepler escreve claramente que força solar não se confina à eclíptica:

Pois ainda que os filamentos magnéticos do corpo solar sejam ordenados conforme o comprimento do zodíaco; e embora somente apenas o singular círculo máximo do corpo do Sol se situe sob o zodíaco ou a eclíptica, e aproximadamente sob a órbita do planeta. Finalmente, ainda que os outros círculos menores (diminuídos até a pequenez de um ponto sobre os pólos) sejam arranjados sob seus círculos correspondentes na esfera [que contém a órbita] do planeta: ainda assim os raios escoam a partir de todos os filamentos do corpo solar (que se encontram em um hemisfério do corpo solar) e convergem não apenas em todos os pontos do caminho de algum planeta, mas nos próprios pólos sobre os pólos do corpo do Sol. E o corpo do planeta é arrastado proporcionalmente à densidade dessa *species* inteira, composta a partir de todos os filamentos.²¹⁹

²¹⁸ STEPHENSON, 1987, p. 68-75.

²¹⁹ *Nam etsi filamenta corporis Solaris magnetica ordinantur secundum longitudinem zodiaci: etsi etiam unicus tantummodo circulus maximus corporis Solis subest zodiaco sive eclipticae, et quam proxime orbitae Planetae: denique etsi alteri circelli minores (tandem sub polis in puncti angustiam attenuati) subordinantur respondentibus suis circulis in sphaera Planetae: tamen ab omnibus Solaris corporis filamentis (ab uno hemisphaerio corporis stantibus) radii defluunt et confluunt tam ad puncta singula itineris alicujus Planetae, quam ad ipsos polos polis corporis Solis imminentes; et Planetae corpus vehitur ad modulum densitatis, hujus integrae speciei, ex filamentis omnibus compositae. Astronomia nova, p. 251; KEPLER, 1992-b, p. 398. A passagem é reproduzida em STEPHENSON, 1987, p. 72-73.*

Essa passagem mostra indubitavelmente que a força motriz concebida por Kepler se espalha por todo o espaço esférico em torno do Sol. Kepler considera que a força solar seja de natureza magnética, e que existam no Sol filamentos paralelos ao equador solar. A força se distribui por toda a região esférica onde se movem os planetas, inclusive sobre os pólos do Sol.

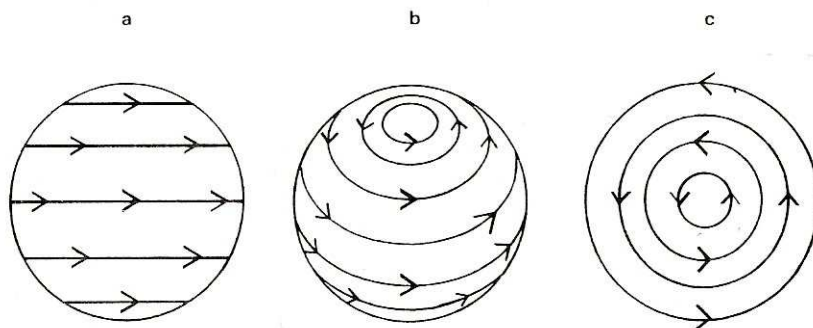


Figura 4.1 O Sol em rotação move os planetas no plano situado acima de seu equador. A força solar é no entanto emitida por todo o corpo do Sol, e preenche todo o espaço ao seu redor. *Apud*. STEPHENSON, 1987, p. 73.

Visto a partir da eclíptica, que na construção de Kepler está situada acima do equador solar, o Sol exhibe todos os seus filamentos em rotação conjunta numa mesma direção. As rotações dos filamentos se somam, e o resultado líquido para um planeta situado na eclíptica é um movimento de rotação no mesmo sentido que o movimento do Sol, isto é, um movimento circular em longitude. Conforme o planeta se afasta da eclíptica a componente de força motriz no sentido contrário aumenta, até que no limite um planeta situado sobre o pólo do Sol permaneceria em repouso, pois as componentes opostas da força motriz seriam iguais.

Contudo, se a distribuição espacial da força motriz é esférica, resta explicar porque a sua intensidade decresce linearmente com a distância. Stephenson explica a atenuação linear da força motriz optando por traduzir o termo latino *species* empregado por Kepler no sentido clássico, como imagem ou aparência.²²⁰ A passagem (citada anteriormente) que indicaria a

²²⁰ Cf. STEPHENSON, 1987, p. 74. James Voelkel segue a interpretação de Stephenson e traduz '*species*' como 'aparência'. Cf. VOELKEL, 2001, p. 180. Donahue opta por conservar o termo *species* em latim. Cf. KEPLER 1992-b, p. 23-24 e p. 382, n. 5.

forma plana da propagação da força motriz, na qual se lê que *a luz escoo esfericamente por linhas retas, enquanto a força motriz, embora escoo por linhas retas, o faz circularmente*, recebe desse modo uma interpretação em termos da imagem do corpo solar em rotação.

Interpretando a força motriz como imagem do Sol em rotação, Stephenson entende que “circularmente” se refere à imagem das fibras solares paralelas ao equador solar em rotação, enquanto esfericamente se refere à imagem esférica do Sol. A imagem do Sol é constituída por um conjunto de filamentos circulares, e em um ponto qualquer do espaço a força motriz será uma imagem circular, proporcional à soma de todos os semi-círculos dali visíveis. Se a força é uma imagem do Sol em rotação, o movimento dessa imagem perde eficácia em proporção ao aumento da circunferência do círculo solar aparente, e portanto em proporção simples com a distância ao Sol.²²¹

Essa interpretação nos causa desconforto, pois ela não parece levar em conta a grande influência da Escola de Oxford sobre o pensamento de Kepler.²²² Se no latim clássico o termo *species* é de fato associado à visão e pode significar vista, olhar, imagem, aspecto, forma ou aparência externa, entre outros sentidos, com Roberto Grosseteste (c. 1175 – 1253) e seus seguidores o campo semântico do termo se expande e ultrapassa o domínio da percepção. Grosseteste explica toda causalidade e todo movimento natural através de *species* que correspondem a uma potência (*virtutem*) que se propaga segundo leis geométricas, através da qual um ser age sobre outro espacialmente distante. O efeito da *species* depende da natureza do ser que a recebe; se este for um sujeito sensível, então neste caso a *species* produzirá uma sensação.²²³ Rogério Bacon (c. 1220 – 1292) define *species* no primeiro capítulo do seu tratado *De multiplicatione specierum* como *o primeiro efeito de qualquer agente*.²²⁴

²²¹ Cf. STEPHENSON, 1987, p. 74, 75.

²²² O próprio título do *Suplemento* já indica essa influência. Vitelo é o autor de um livro de óptica amplamente difundido no Ocidente e fora profundamente influenciado por Grosseteste e Bacon. C.f. CROMBIE, 1971, p. 213-214.

²²³ Cf. CROMBIE, 1971, p. 109-116.

²²⁴ Essa discussão se encontra em CROMBIE, 1971, p. 104-116, 144-147, em NASCIMENTO, 1995, p. 96-104 e na introdução de Lindberg à tradução para o inglês do *De Multiplicatione* em LINDBERG, 1983, p. liii – lxxi.

Aplicada à concepção de força solar presente na *Astronomia nova*, a tradução de *species* como imagem ou aparência tem a desvantagem de tornar a física celeste kepleriana demasiado arcaica, pois ela impõe algum tipo de percepção dessa aparência por parte do planeta, fator que Kepler certamente não pretendia associar de maneira necessária a sua interpretação física do heliocentrismo. Além disso, ela é claramente incompatível com a concepção kepleriana da natureza, emissão, propagação e ação da força solar sobre os planetas. Os verbos *effluxus* e *eiaculatio* dificilmente poderiam caracterizar a emissão de uma imagem, e o trecho citado acima, onde se lê que as potências emanadas dos corpos são “desprovidas de matéria corpórea mas constituídas de uma certa matéria própria que admite as dimensões geométricas”, tornaria-se de difícil compreensão.

Finalmente, a tradução é inadequada do ponto de vista de uma das mais reconhecidas contribuições científicas de Kepler, a sua teoria da visão, na qual o olho é tratado como um mecanismo óptico onde, após ser refratada no humor aquoso e no cristalino, a luz forma uma imagem invertida sobre a superfície da retina. Na teoria Kepler distingue claramente a luz, entendida como uma propagação matematizada, da imagem formada na retina, que será posteriormente transmitida à sede das sensações na alma do sujeito. A imagem (*idolum*)²²⁵, pintura (*pictura*)²²⁶, simulacro (*simulachrorum*)²²⁷ ou aparência (*figura*)²²⁸ é formada na retina por um processo análogo ao funcionamento da câmera escura, instrumento amplamente empregado no século XVI na observação de eclipses solares. A imagem formada na retina é transmitida até a sede das sensações por um processo que já não é óptico e de cuja natureza Kepler não trata, mas no qual a imagem invertida formada na retina é de alguma maneira reorientada de maneira a coincidir orientação real dos objetos vistos.²²⁹ O termo *species* é preferido quando o que está em jogo é a propagação da luz ou

²²⁵ Cf. *Suplemento*, p. 151; KEPLER, 1980, p. 317.

²²⁶ Cf. *Suplemento*, p. 151, 153; KEPLER, 1980, p. 317, 319.

²²⁷ Cf. *Suplemento*, p. 186; KEPLER, 1980, p. 371.

²²⁸ Cf. *Suplemento*, p. 157; KEPLER, 1980, p. .

²²⁹ O problema deixado em aberto pela nova teoria da visão, que implica em uma descontinuidade entre as imagens tal como as percebemos e os objetos tomados em si mesmos seria explorado por filósofos posteriores a Kepler, especialmente por Descartes nas *Meditações metafísicas* e no *Discurso do método*. C.f. CROMBIE, 1994, p. 1125-1135; HAMOU, 2002.

sua passagem de um meio para outro (ou o trânsito da imagem formada na retina até a faculdade visual da alma, que já não é óptico mas em cuja descrição Kepler emprega a expressão). Em todo caso, na óptica de Kepler a imagem percebida deixa de ser identificada com a luz que a provoca no sujeito.

Pela complicada interação entre a óptica e a astronomia de Kepler, consideramos mais seguro conservar o termo *species* em latim, pois não parece haver tradução livre de problemas, como já havia concluído Donahue na sua tradução da *Astronomia nova*.²³⁰

4.2 A emissão e a propagação da força solar

Acreditamos que Kepler tenha encontrado uma solução para o problema da atenuação da força motriz, mas que esta passou despercebida graças à redação obscura da passagem chave para a sua compreensão, que não por acaso é aquela citada algumas páginas acima, onde Kepler diz:

Por outro lado a luz escoar esfericamente por linhas retas, enquanto a força motriz, embora escoar por linhas retas, o faz circularmente; isto é, ela só faz esforço em uma região do mundo, de oeste para leste, e não o oposto, nem em direção aos pólos, etc.²³¹

A despeito da forma semelhante das palavras, o termo ‘circularmente’ nessa passagem não se opõe a ‘esfericamente’ como forma da propagação espacial da força solar, mas refere-se ao esforço executado por essa força, como indica a segunda oração introduzida por *hoc est*. O movimento dos planetas é causado pelo movimento da força, que Kepler compara a uma rápida torrente (*rapidus quidam torrens*)²³² ou à correnteza de um rio (*torrente fluminis*)²³³ que transmite aos planetas a rotação do Sol em torno do seu próprio eixo.

²³⁰ Cf. KEPLER, 1992-b, p. 23.

²³¹ *Rursum lux rectis effluit orbiculariter, virtus movens rectis quidem sed circulariter; hoc est in unam tantum plagam mundi ab occasu in ortum nititur, non contra, non ad polos etc.* K.G.W.III, p. 240; KEPLER, 1992-b, p. 380-381. Donahue cometeu um pequeno deslize, e em sua tradução aparece ‘de leste para oeste’. Seguimos a opção de Cathérine Chevalley e traduzimos *effluo* pelo verbo escoar (*écouler*). Cf. CHEVALLEY, In: KEPLER, 1980, p. 78.

²³² Cf. *Astronomia nova*, p. 255; KEPLER, 1992-b, p. 405.

A força solar é dotada de um movimento de rotação, e é esse movimento de rotação que ela transmite aos planetas. Através de todo o espaço a força solar conserva a mesma velocidade de rotação; as diferentes velocidades dos planetas são explicadas pela densidade da força solar em cada região correspondente. A força solar age sobre um planeta como uma força circular, resultante da composição dos infinitos círculos que compõem a porção da superfície esférica do Sol voltada para o planeta. Essa força simples necessariamente imprime nos planetas um movimento igualmente simples e circular.

A solução que acreditamos corresponder melhor àquilo que Kepler pretendia significar é, portanto, tratar a superfície esférica do Sol como uma composição de anéis circulares e compor, na região onde se encontra cada planeta, uma resultante que também ela é circular, e por isso mostra a atenuação linear compatível com os dados da experiência. Em outras regiões do mundo, afastadas da eclíptica, a resultante também é circular, mas porque é composta de movimentos contrários ela em parte se anula, e é sempre inferior à força na região da eclíptica sobre o equador solar. Nos pontos exatamente acima dos pólos do Sol a força motriz se anula completamente.

A força motriz é concebida a partir da consideração de outras *species* imateriais. Enquanto a ação da luz sobre a matéria dos corpos serve de modelo na investigação das propriedades da força motriz, o magnetismo constitui o mais provável candidato para a real natureza dessa força. Todas as *species* imateriais são propagações esféricas pelas quais os corpos afetam suas vizinhanças. A principal fonte de luz no mundo é o Sol, e ele é também a fonte da força motriz. O magnetismo terrestre, por sua vez, é apontado como causa do movimento mensal da Lua em torno do nosso planeta, o que sugere que a força motriz solar também seja de natureza magnética.

²³³ Cf. *Astronomia nova*, p. 261; KEPLER, 1992-b, p. 413. No capítulo 57, onde Kepler desenvolve uma explicação física para a recém-descoberta forma elíptica da órbita de Marte, ele compara a força solar à correnteza de um rio circular (*flumen circulare*). Cf. *Astronomia nova*, p. 349; KEPLER, 1992-b, p. 549.

Ernst Cassirer discute a crítica de Pico della Mirandola à astrologia, formulada em torno da distinção entre causalidade matemática e causalidade astrológica.²³⁴ Enquanto o primeiro tipo de causalidade é derivado da experiência, o segundo baseia-se na suposição de qualidades ocultas. Vista sob este prisma, a força solar de Kepler pode nos parecer uma entidade mista, que não se enquadra perfeitamente em nenhum dos dois tipos de causalidade.

Porém, ainda que Kepler reconheça que toda hipótese física envolve a admissão de conjecturas que não podem ser demonstradas, a analogia com a luz evita que esta crítica específica incida sobre o conceito de força motriz solar. Para encontrarmos a diferença entre as qualidades ocultas da astrologia tradicional e a força solar não é necessário, como sugeriu Sheila Rabin em um artigo recente²³⁵, que interpretemos esta última como uma entidade constituída de algum tipo de matéria corpórea. Luz e força motriz são claramente imateriais na ciência kepleriana, e só existem em ato nas fontes que as emitem e nos corpos (ou, no caso da luz, nas superfícies) sobre os quais elas agem. No espaço intermediário, essas *species* imateriais encontram-se em um estado de vir a ser.²³⁶ Com efeito, a luz não é visível senão nos corpos iluminados, e da mesma maneira a força motriz somente é observável através dos movimentos por ela provocados nos planetas. Se a luz não é uma qualidade oculta, então a força motriz também não o é. Os períodos orbitais dos planetas, que Kepler já abordara no *Mistério cosmográfico*, fornecem uma espécie de comprovação empírica da ação da força solar. Na *Astronomia nova*, a verificação de que o ponto equante de Ptolomeu funciona *grosso modo* não apenas para representar as velocidades de Marte, mas também na descrição das velocidades da Terra em seu percurso ao redor do Sol, servirá como comprovação adicional do heliocentrismo dinâmico de Kepler. Veremos, nos capítulos seguintes, como se dá o embate entre a hipótese física da força solar e as observações, ao final do qual será estabelecida a forma do trajeto percorrido por Marte no céu.

²³⁴ CASSIRER, 2001, p. 190-196.

²³⁵ RABIN, 2005.

²³⁶ C.f. *Astronomia nova*, p. 240; KEPLER, 1992-b, p. 382.

Capítulo 5 – Da equivalência entre hipóteses na primeira parte da *Astronomia nova*

A primeira parte da *Astronomia nova* é intitulada “Da comparação entre hipóteses”.²³⁷ Nela Kepler considera uma série de expedientes empregados pelos astrônomos para reproduzir os movimentos dos astros, desde a primeira decomposição dos movimentos aparentes em uma série de movimentos circulares até chegar à equivalência geométrica entre os três grandes sistemas de mundo. Paralelamente, Kepler considera cada construção geométrica do ponto de vista físico, além de avaliar quais as consequências geométricas da substituição do sol médio pelo sol aparente em cada uma.

No presente trabalho defendemos que a *Astronomia nova* encerra a exposição do método que Kepler considera adequado para o desenvolvimento da astronomia. Essa interpretação conduz a uma reavaliação do objetivo da primeira parte, que deve corresponder a algum aspecto desse método. Pretendemos mostrar que a demonstração da equivalência geométrica entre os sistemas de fato constitui uma etapa fundamental, que ocupa os primeiros capítulos da *Astronomia nova* por uma razão bem determinada.

O primeiro capítulo trata dos movimentos observados nos céus e da primeira tarefa do astrônomo, a separação dos emaranhados ou novelos em que consistem os dados observacionais brutos em combinações de círculos, descritos periodicamente. Os capítulos 2-5 tratam da primeira variação (diferença ou desigualdade, vide glossário) dos movimentos dos planetas, que no copernicanismo é explicada pelos trajetos próprios dos planetas em torno do Sol. O sexto e último capítulo trata da segunda variação, interpretada por Copérnico como o reflexo do movimento da Terra nos movimentos aparentes dos planetas.²³⁸

²³⁷ *De comparatione hypothesium.*

²³⁸ Neste capítulo faremos constantes referências a Copérnico, Ptolomeu e a outros astrônomos que precederam Kepler. O leitor deve atentar para o fato de que pretendemos expor as concepções de Kepler sobre o progresso da astronomia, e não as nossas próprias. Em todo caso, quando for necessário recorrer à interpretação oferecida por algum outro autor, a fonte será indicada.

A demonstração da equivalência geométrica quase perfeita entre os três grandes sistemas de mundo possibilita a compreensão do sucesso obtido tanto por Ptolomeu e seus predecessores da astronomia geocêntrica tradicional como por Tycho e sua equipe, sem que seja necessário abrir mão do heliocentrismo como estrutura verdadeira do mundo criado. Da equivalência entre os sistemas segue que o sucesso dos astrônomos não-copernicanos, isto é, daqueles que reproduzem os movimentos celestes aparentes através de estruturas geométricas que não correspondem à real estrutura do mundo, não decorre da realidade dos sistemas por eles propostos nem tampouco da derivação das aparências corretas a partir de premissas falsas, mas ocorre porque esses sistemas trazem em si, ainda que de forma indireta, a configuração geométrica do heliocentrismo na medida em que representam adequadamente os movimentos relativos dos corpos celestes.

Ao mesmo tempo em que demonstra a equivalência geométrica entre os diversos sistemas de mundo, nessa primeira parte Kepler também examina um tema previamente avançado no *Mistério*, a troca do sol médio pelo sol aparente. Porém, se o estabelecimento do sol aparente como o centro de movimentos é relativamente bem-discutido pela crítica²³⁹, a importância da demonstração da equivalência geométrica dos sistemas ptolomaico, tychônico e copernicano na argumentação da *Astronomia nova* parece ter sido negligenciada até aqui. Até onde sabemos, os estudiosos da *Astronomia nova* creditam a persistência de Kepler na apresentação de provas sucessivas nos três sistemas à promessa feita a Tycho Brahe em seu leito de morte, mesmo que esse argumento não explique a apresentação paralela do sistema ptolomaico.²⁴⁰

À luz da *Defesa de Tycho*, torna-se possível perceber uma nova dimensão na primeira parte da *Astronomia nova*. Mais do que uma exposição preliminar cuja forma teria sido determinada por motivos pessoais, contingentes e exteriores ao tema do livro, essa

²³⁹ Cf. GINGERICH, 1993, p. 333-334; STEPHENSON, 1987, p. 23-39; KOYRÉ, 1961, p. 168-173;

²⁴⁰ Essa explicação não é suficiente, como Koyré admite ser possível, sem no entanto propor nenhuma alternativa. Cf. KOYRÉ, 1961, p. 165. Stephenson parece ser o único a reconhecer, em um breve parágrafo introdutório, a importância da demonstração da equivalência da descrição dos dois modelos designados a representar a segunda variação do movimento de Marte, atribuída por Copérnico à translação da Terra. Ele no entanto não entra em maiores detalhes e nem menciona a primeira variação, concluindo o parágrafo com uma menção à promessa feita por Kepler a Brahe. Cf. STEPHENSON, 1987, p. 23.

primeira parte consiste na primeira etapa do argumento de Kepler, que trataremos agora de examinar.

5.1 Uma pequena história da astronomia

O primeiro capítulo da *Astronomia nova* pode ser lido como uma pequena história da astronomia. Kepler começa sua investigação pela gênese dessa ciência. Desde que o homem começou a observar os céus ele percebeu que os movimentos dos planetas não são circulares e uniformes, e foi justamente dessa constatação e da tentativa de explicá-la que teria nascido a astronomia:

É sempre atestado que os movimentos dos planetas são orbiculares. E a razão, a partir dessa experiência recebida, presume imediatamente que os seus circuitos são círculos perfeitos. Pois dentre as figuras são os círculos, e dentre os corpos são os céus, que são considerados os mais perfeitos. Contudo, quando a experiência aparece mostrando algo diferente para aqueles que prestam cuidadosa atenção, a saber, que os planetas se desviam do caminho perfeitamente circular, surge um grande espanto, que por fim instiga os homens a procurar pelas causas.

Assim nasceu entre os homens a astronomia, cujo escopo é tentar descobrir as causas pelas quais os movimentos das estrelas [errantes] parecem irregulares [vistos] da Terra embora sejam ordenadíssimos no céu, e investigar por quais círculos as estrelas são movidas, para que suas posições e aparências em qualquer tempo possam ser preditas.²⁴¹

²⁴¹ *Planetarum motus orbiculares esse perennitas testatur. Id ab experientia mutuata ratio statim praesumit gyros ipsorum perfectos esse circulos. Nam ex figuris circulus, ex corporibus coelum, censentur perfectissima. Vbi vero diligenter attendentes experientia diversum docere videtur; quod Planetae a circuli simplici semita exorbitent; plurima existit admiratio, quae tandem in causas inquirendas homines impulit. Hinc adeo nata est inter homines Astronomia, cujus scopus esse putatur docere causas, cur stellarum motus irregulares in terris appareant cum sint ordinatissimi in coelo, et investigare, quibusnam circulis stellae cieantur, ut horum beneficio loca et apparitiones illarum ad quaevis tempora praedici possint. Astronomia nova, p. 61; KEPLER, 1992-b, p. 115. As causas aqui não são causas físicas, já que a discussão versa sobre as irregularidades aparentes. Kepler está se referindo aos artefatos geométricos da astronomia preditiva tradicional (sistemas de epiciclos, círculos equantes).*

Este início é relevante porque já deixa entrever, logo de saída, um importante princípio operante no método astronômico de Kepler. Desde o *Mistério* o astrônomo defende a existência de uma realidade simples subjacente à complexidade das aparências e identifica a tarefa do astrônomo com a descoberta dessa realidade. Agora esse princípio será desdobrado de maneira a alocar a nova astronomia física de Kepler, e com ela o copernicanismo, na mesma linha evolutiva em que a astronomia geocêntrica tradicional. Na *Dissertação com o mensageiro das estrelas*, Kepler compara o desenvolvimento da astronomia ao longo da história com o amadurecimento de uma criança: “O Deus criador conduz a totalidade dos homens progressivamente de um conhecimento a outro sucessivo, do mesmo modo como cresce e amadurece paulatinamente uma criança.”²⁴² O objetivo de Kepler aqui é duplo: ao mesmo tempo em que pretende rebater as possíveis críticas decorrentes da grande novidade de seu método, ele precisa estabelecer claramente o que entende pela relação entre os movimentos observados, os modelos geométricos destinados a descrevê-los e os verdadeiros movimentos descritos pelos astros no céu.

De acordo com este primeiro capítulo da *Astronomia nova*, a astronomia teria nascido da observação das posições dos astros, e teria permanecido uma ciência puramente observacional até que a reunião de um grande número de dados em um longo período de tempo permitisse a elaboração das primeiras teorias. A experiência direta mostra que os planetas descrevem trajetórias espirais no céu, que se sobrepõem com o tempo sobre as estrelas fixas da mesma maneira como a lã enrolada em um novelo. Nesse estágio pré-teórico o astrônomo se limitaria a reportar as aparências observadas, visto que os movimentos aparentes são demasiado complicados para serem reproduzidos matematicamente.²⁴³

O primeiro grande progresso da história da astronomia foi a decomposição do movimento aparente de cada astro em duas componentes, o primeiro e o segundo movimentos.²⁴⁴

²⁴² *Deus conditor, universitatem hominum veluti quendam succrescentem, et paulatim maturescentem puerulum, successivè ab aliis ad alia cognoscenda ducit. Dissertação com o mensageiro das estrelas*, p. 306; KEPLER-GALILEU, 1984, p. 141.

²⁴³ Cf. *Astronomia nova*, p. 62; KEPLER, 1992-b, p. 117.

²⁴⁴ Cf. *Astronomia nova*, p. 62-63; KEPLER, 1992-b, p. 117.

Esses dois movimentos, quando combinados, correspondem às aparências observadas, mas tomados isoladamente constituem elementos mais simples, círculos descritos periodicamente e passíveis de manipulação matemática. O *primeiro movimento* é comum a todos os astros, que cruzam o céu no sentido Leste-Oeste em um período de 24 horas. Esse movimento é explicado pela tradição geocêntrica através do movimento diário de rotação da esfera das estrelas fixas nesse período.²⁴⁵

O *segundo movimento* é diferente para cada astro e se dá na direção oposta. Do ponto de vista observacional, ele corresponde à variação nas posições de um astro diariamente registradas em um horário pré-determinado. As estrelas fixas são assim chamadas porque suas posições relativas nunca se alteram, de modo que elas de fato se comportam como se pertencessem a uma única esfera, dotada apenas do primeiro movimento – além da precessão dos equinócios, muito lenta. Já os planetas, o Sol e a Lua descrevem movimentos mais complicados no céu ao longo do ano. A decomposição dos movimentos aparentes dos astros em dois movimentos é uma etapa importante na evolução da astronomia porque ela implica em uma simplificação.²⁴⁶ O desacoplamento dos movimentos individuais dos astros, previamente emaranhados com a rotação diária do céu, possibilita as primeiras tentativas de reprodução desses movimentos por modelos matemáticos. O primeiro movimento é facilmente representável. Qualquer que seja o sistema de mundo adotado, ele consiste na rotação de uma esfera em torno de um eixo fixo. Já o segundo movimento é mais complicado, especialmente para os planetas.

Os planetas são chamados estrelas errantes porque desde a remota Antigüidade se observou que os seus movimentos não são círculos perfeitos como são os movimentos das estrelas. Ao contrário, os movimentos aparentes dos planetas são bastante complexos, envolvendo variações de distância e velocidade, deslocamentos transversais, paradas e

²⁴⁵ No sistema de Copérnico o primeiro movimento resulta da rotação diária da Terra em torno do seu eixo no sentido Oeste-Leste (vide glossário).

²⁴⁶ Neste primeiro capítulo da *Astronomia nova* Kepler volta a dirigir sua artilharia contra Francesco Patrizi (vide o segundo capítulo deste trabalho), que ele agora acusa literalmente de pisar em dois mil anos de trabalho, cuidado, erudição e conhecimento ao defender uma astronomia livre de modelos e inteiramente voltada às aparências. Cf. *Astronomia nova*, p. 62; KEPLER 1992-b, p. 117.

retrogradações. Além disso observou-se uma correlação entre certas variações e as posições relativas entre os planetas e o Sol. Os planetas externos, Marte, Júpiter e Saturno, exibem suas máximas velocidades quando se aproximam do Sol, enquanto nas oposições a esse astro movem-se no sentido oposto ao usual, apresentando movimentos retrógrados ou retrogradações (vide glossário). O diâmetro aparente desses planetas também varia de acordo com a situação relativa do Sol, sendo máximo próximo às conjunções e mínimo nas oposições. Observa-se finalmente que as retrogradações não ocorrem sempre no mesmo lugar, mas caminham de Oeste para Leste no zodíaco. Esse tipo de fenômeno, dependente da posição relativa entre o astro e o Sol, é denominado sinódico. O segundo movimento dos planetas tal como ele é observado da Terra aparece como uma espiral, conforme a figura abaixo:

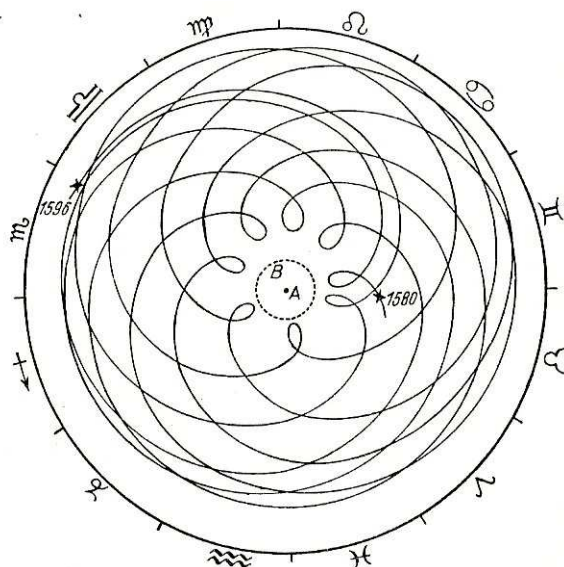


Figura 5.1 Depois de descontado o movimento diário de rotação dos céus, o movimento de Marte visto da Terra ainda aparece como um espiral complicada. Essa figura, retirada do primeiro capítulo da *Astronomia nova*, representa as posições sucessivamente ocupadas pelo planeta entre os anos de 1580 e 1596. *Apud Astronomia nova*, p. 64.

Por outro lado, continua Kepler, observou-se também que fenômenos sinódicos tais como a variação de brilho e o trajeto descrito nas retrogradações dependem do local onde

o planeta se encontra no zodíaco.²⁴⁷ Com efeito, os planetas, o Sol e a Lua apresentam irregularidades em seus movimentos que dependem da variação de posição desses astros em relação às estrelas fixas, ou seja, de seus cursos através do zodíaco²⁴⁸. Esse desvio do movimento circular uniforme com relação ao fundo de estrelas fixas é tradicionalmente denominado *primeira variação ou primeira anomalia*. A variação de posição em relação ao Sol é a *segunda variação ou segunda anomalia* (vide glossário). A primeira variação no movimento de um planeta pode ser observada isoladamente nos momentos de oposição ao Sol, quando planeta, Sol e Terra encontram-se alinhados.²⁴⁹ As observações dos planetas em oposição ao Sol, denominadas acrônicas, permitem o desacoplamento da primeira variação da segunda, pois nessas situações a segunda variação se anula. Por esse expediente os astrônomos do geocentrismo tradicionalmente já tratavam separadamente das duas variações.

O primeiro capítulo é concluído com uma contribuição do próprio Kepler, da época do *Mistério cosmográfico*: a troca do sol médio pelo sol aparente na determinação das oposições. Essa substituição é indispensável para o desenvolvimento de uma astronomia de precisão fundamentada na ação física do Sol sobre os planetas, e será discutida em detalhe ainda neste capítulo.

Essa pequena história da astronomia constitui um documento interessante. Kepler apresenta aqui alguns conceitos básicos de que irá se servir ao longo do livro, o que por si só justificaria a presença da discussão no primeiro capítulo, não fosse o fato de que o público para o qual a *Astronomia nova* foi cuidadosamente composta era constituído por astrônomos treinados, familiarizados com esses conceitos. Uma investigação sobre a

²⁴⁷ Cf. *Astronomia nova*, p. 64-65; KEPLER, 1992-b, p. 120.

²⁴⁸ A Lua, o Sol e os planetas são sempre vistos aproximadamente sobre uma mesma linha circular da abóbada celeste, que cruza o céu de Leste a Oeste. As estrelas fixas localizadas nessa linha formam as constelações zodiacais.

²⁴⁹ Nas conjunções o alinhamento também ocorre, mas o planeta então não é observável em virtude da luz solar.

maneira como Kepler apresenta o progresso da astronomia se revelará interessante na elucidação do método astronômico empregado no estudo do movimento de Marte.

O ponto de partida, a observação dos movimentos aparentes dos astros, e o ponto de chegada, a troca do sol médio pelo sol aparente, são significativos, pois estabelecem uma direção evolutiva na qual o heliocentrismo irá suceder ao geocentrismo. O fato de que Kepler já comece a construir seu argumento mostrando que o progresso da astronomia se dá no sentido do afastamento dos dados, ou, mais precisamente, no sentido da descoberta de estruturas subjacentes a esses dados – das quais o heliocentrismo será o maior expoente – mostra que ele reconhecia bem a força da evidência empírica na defesa da tese da centralidade e do repouso da Terra. Segundo as observações brutas o céu gira em torno da Terra, ao mesmo tempo em que nós não experimentamos nenhum efeito físico desse movimento.²⁵⁰

A identificação das simples aparências com o estágio mais primitivo da astronomia determina um ponto de partida onde a mente humana ainda não percebeu nenhuma simplicidade por trás da complexidade dos movimentos e não pode, por isso, descrevê-los matematicamente. A etapa seguinte, a decomposição dos movimentos espirais no primeiro e segundo movimentos, como a primeira condição fundamental para o estabelecimento de uma astronomia teórica capaz de prever fenômenos futuros, mostra que a simplicidade dos movimentos é uma condição necessária para que eles sejam tratáveis matematicamente. A distinção entre a primeira e a segunda variações no movimentos planetários representa um marco na história da astronomia, pois é a partir dela que os movimentos planetários passam a ser matematicamente tratáveis na medida em que se tornam composições de movimentos circulares. Por fim, a substituição do sol médio pelo sol aparente assinala o nascimento da nova astronomia física, na qual os

²⁵⁰ As palavras de Jean-Jacques Szczeciniarz sobre o movimento da Terra são esclarecedoras: “Essencialmente, um movimento que não podemos perceber. É um movimento que se toma por um repouso, porque ele tem as características do repouso. Se descrevermos aquilo que vemos, é preciso então que seja o repouso da Terra e o movimento do céu. Mas, completado o trabalho teórico, o movimento dos céus e o repouso da Terra se tornam cada um signo do seu contrário.” SZCZECINIARZ, 1998, p. 97.

modelos geométricos serão tratados como representações dos movimentos reais que ocorrem no céu e cuja descoberta é o objetivo último da astronomia.

5.2 Movimentos observados e modelos para descrevê-los

O segundo capítulo da *Astronomia nova* começa por uma exposição do teorema de Apolônio (vide glossário). Esse teorema demonstra a equivalência entre dois modelos simples destinados a descrever o movimento do Sol em torno da Terra, que em uma primeira aproximação podem representar a primeira variação de um planeta como Marte. Como vimos no segundo capítulo do presente trabalho, a possibilidade de que um único fenômeno observacional possa receber mais de uma representação geométrica é fundamental na argumentação realista de Kepler. Apenas uma teoria correspondente à real estrutura do mundo pode gerar as aparências observadas, e portanto é preciso explicar o sucesso simultâneo dos três grandes sistemas de mundo na descrição dos movimentos planetários. O teorema de Apolônio consiste em um primeiro precedente histórico a favor dessa possibilidade.

Os dois modelos são perfeitamente equivalentes do ponto de vista geométrico, mas quando considerados como realmente existentes nos céus eles correspondem a duas ocorrências físicas distintas, na primeira das quais um corpo descreve um percurso circular em torno de um centro próximo do observador, enquanto na segunda o corpo descreve um movimento circular uniforme em torno de um centro que também gira com velocidade uniforme, em torno de um ponto central que coincide com o observador.

Kepler pode analisar os modelos tradicionalmente empregados pelos astrônomos antigos do ponto de vista físico porque ele toma como expoente do geocentrismo a síntese entre a astronomia calculatória de Ptolomeu e os orbes sólidos de Eudoxo, Calipo e Aristóteles, efetuada pelos astrônomos árabes da Idade Média e exposta em livros como o *Nova teoria dos planetas* (*Theoricae novae planetarum*) de Georg Peurbach (1423-1461). e

amplamente difundido nos séculos XV e XVI.²⁵¹ Assim, ele evita revindicar para si a dissolução da tensão entre astronomia de posição e cosmologia, preferindo se inserir em uma tradição previamente existente, recorrendo a um autor mais antigo para avaliar a síntese entre as tradições física e geométrica:

Ptolomeu descreveu para nós estes simples círculos, tais como mostra a geometria aplicada às observações. Peurbach estabeleceu uma medida [para o Universo] tal que [os círculos ptolomaicos] fossem percorridos de acordo com Aristóteles, que por sua vez abordou as suposições geométricas que Eudoxo e Calipo haviam empregado em sua astronomia.²⁵²

O argumento de Kepler é simples: se existissem orbes sólidos, a astronomia geocêntrica constituiria uma teoria física dos céus coerente.²⁵³ Contudo, tendo sido demonstrado pela experiência que os orbes não existem, é preciso encontrar uma alternativa para o compromisso aristotélico-ptolomaico. A profundidade da síntese medieval não está em causa aqui, e sim a situação insustentável do ponto de vista físico à qual são remetidos os modelos ptolomaicos em um mundo desprovido de orbes.

Como vimos, no *Mistério* Kepler já rejeitava enfaticamente a possibilidade de existência de estruturas sólidas no céu, e essa posição é mantida na *Astronomia nova* como o será posteriormente na *Harmonia do mundo*. Na *Defesa de Tycho* Kepler afirmara que foi

²⁵¹ Nas poucas universidades que ofereciam uma formação avançada em astronomia no início da Idade Moderna, a *Nova teoria dos planetas* de Peurbach vinha complementar a astronomia esférica básica exposta por Sacrobosco (John of Hollwwood) no seu *De sphaera*. Cf. JARDINE, 1998, p. 49-50.

²⁵² *PTOLEMAEVS nudos nobis hosce circulos descripsit, quales Geometria observatis applicata indicat. PVRBACHIVS modum constituit, quo decurrerentur, secutus ARISTOTELEM, qui hoc idem in EVDOXI et CALIPPI Geometricas suppositiones, quibus Astronomiam tradiderant, attentavit. Astronomia nova*, p. 67. KEPLER, 192-b, p. 124. Na astronomia exposta na *Nova teoria dos planetas* os orbes sólidos de Aristóteles são expandidos afim de acomodar os círculos ptolomaicos – daí à alusão de Kepler à nova medida do universo estabelecida por Peurbach. A explicação dos modelos físicos de Peurbach para o excêntrico e o epiciclo com deferente está em *Astronomia nova*, p. 68; KEPLER, 1992-b, p. 126.

²⁵³ Afirmar que a *Astronomia nova* representa um progresso porque ali Kepler introduz explicações causais no domínio dos fenômenos celestes é errado, como mostra mesmo uma leitura superficial do *De caelo* de Aristóteles. É justo dizer, entretanto, que a importância central das explicações causais na astronomia de Kepler não tem precedentes, pois mesmo os tratados como a *Nova teoria dos planetas* de Peurbach, se logram assimilar os modelos ptolomaicos a uma estrutura explicativa realista, *não os derivam a partir dela*, como faz Kepler. Cf. TOSSATO, 2003, p. 170-199.

através da observação de cometas (e da determinação de suas órbitas alongadas) que Tycho eliminou os orbes sólidos, tornando viável o seu sistema de mundo, no qual os percursos de Marte e do Sol se cruzam²⁵⁴:

Mas como a solidez dos orbes, falsamente suposta, tinha impedido o caminho para a sua própria hipótese, os cometas intervieram oportunamente. Com sua passagem essas nuvens dos orbes sólidos foram dissipadas e os empecilhos às hipóteses tichônicas foram removidos.²⁵⁵

Aqui, Kepler se contenta em dizer que Tycho demonstrou a inexistência dos orbes, e a autoridade de Tycho é suficiente para que Kepler não discuta mais longamente os motivos que o levaram a duvidar da existência dessas estruturas:

Mas Tycho Brahe, por argumentos muito seguros, destruiu a solidez dos orbes, que qual um cajado era até então capaz de manter aquelas almas motrizes (em verdade cegas) no seu caminho devido. E por conseguinte os planetas executam seus cursos no puro éter, do mesmo modo como as aves no ar, e portanto nós devemos filosofar de outra maneira acerca destes modelos [os excêntricos e epiciclos].²⁵⁶

A exposição das explicações físicas subjacentes ao geocentrismo, se nos mostra que Kepler conhecia bem a força de seus adversários, também é muito interessante do ponto de vista do argumento astronômico. A discussão acerca dos orbes no sistema geocêntrico é formulada de maneira a indicar quais são os aspectos que devem ser explicados, onde residia a força da explicação e o que deve ser aproveitado na nova astronomia. Ou, em outras palavras, Kepler explicita os aspectos dos movimentos celestes que eram

²⁵⁴ Se os planetas estão presos a orbes sólidos, essas esferas não podem se cruzar, pois isso é fisicamente impossível a não ser que as esferas se quebrem.

²⁵⁵ *Ac cum ipsi viam ad suam hypothesin intersepsisset orbium falso subiectata soliditas, commodum intervenere Cometae, qui transcurso suo illas solidorum orbium nebulas discuterent et impedimenta Tychoniana hypothesis tollerent.* KEPLER, In: JARDINE, 1988, p. 133.

²⁵⁶ *At quia TYCHO BRAHE certissimis argumentis soliditatem orbium destruxit, quae hactenus animabus illis motricibus (caecis etiam) pro baculo servire poterat ad viam debitam inveniendam; et proinde Planetae in puro aethere, perinde atque aves in aëre, cursus suos conficiunt, aliter nobis igitur de his schematibus erit philosophandum.* *Astronomia nova*, p. 69; KEPLER, 1992-b, p. 126.

adequadamente explicados pela teoria dos orbes sólidos, e essa exposição vai influenciar na delimitação dos problemas que o seu novo método deve ser capaz de resolver.

Kepler chama a atenção do seu leitor para o fato de que, no sistema de Aristóteles, a existência real de orbes cristalinos preenchendo o céu está estreitamente ligada ao conceito de lugar como *limite imóvel mais interno do recipiente*.²⁵⁷ O céu constituído de éter e dividido em camadas concêntricas faz parte de um sistema que tem a Terra como centro e a esfera das estrelas fixas como limite. A cada orbe sólido é associado um motor, e o lugar de cada orbe é o orbe contíguo mais externo. Os motores dos orbes possuem uma série de características enumeradas por Kepler:

E como aquele filósofo [Aristóteles] havia admitido que o movimento era eterno, ele do mesmo modo estabeleceu motores eternos. E como ele sabia que na realidade nada material pode comportar a infinitude, e que os motores movem [os planetas] por um tempo infinito, ele também os quis imateriais e princípios separados [dos orbes sólidos], e conseqüentemente imóveis.²⁵⁸

Assim, no sistema de Aristóteles os orbes sólidos delimitam a região no espaço onde cada planeta pode se movimentar, e a cada orbe está associado um motor imaterial e imóvel, responsável pela sua rotação com velocidade uniforme em torno de um eixo fixo.

Kepler segue explicando que Aristóteles atribuiu a esses motores, ou almas motrizes, mentes capazes de administrar perpetuamente os movimentos dos corpos celestes. As almas motrizes são mais estreitamente ligadas aos orbes materiais do que as mentes; elas são fixadas aos orbes (*inhæreo*), e têm a finalidade de neles imprimir os movimentos de rotação determinados pelas mentes. Kepler distingue assim, nos orbes Aristotélicos,

²⁵⁷ Cf. *Astronomia nova*, p. 67; KEPLER, 1992-b, p. 124. A definição de lugar encontra-se no quarto livro da *Física*, em ARISTÓTELES, 1998, p. 376, 212^a20.

²⁵⁸ *Ac cum placuisset illi Philosopho, motum aeternum esse, motores quoque aeternos statuit: qui cum infinito tempore moveant, infinitatis vero nullum materiaturum capax esse sciret, immateriatos quoque, et principia separata, quare immobilia esse voluit. Astronomia nova*, p. 67; KEPLER, 1992-b, p. 124.

1. A força motriz, suficiente para o orbe redondo, de cuja robustez e intensidade constante provém o tempo de revolução. 2. O caminho a ser percorrido. A primeira é mais propriamente atribuída à faculdade animal, e o segundo à natureza que conhece ou que se lembra.²⁵⁹

As mentes e as almas dos planetas têm portanto funções distintas. Kepler esclarece que, porque os orbes sólidos já determinam a região espacial a ser percorrida pelo planeta, só cabe às mentes lançar os planetas nos seus caminhos particulares, e os movimentos serão mantidos pelas almas. Assim, ele conclui, se for levada em conta a criação do mundo revelada nas escrituras e ignorada por Aristóteles, as mentes, que são como deuses, perdem sua função.

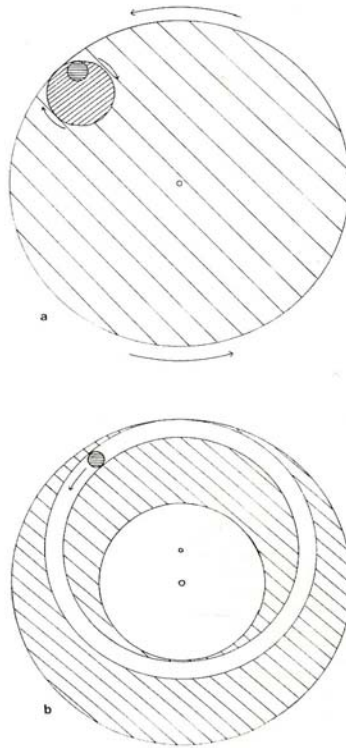


Figura 5.2 Kepler discute a síntese entre a astronomia antiga de posição e a metafísica celeste baseada na existência dos orbes sólidos. Os epiciclos e excêntricos de Ptolomeu podem ser compatibilizados com os orbes sólidos desde que estes sejam suficientemente espessos para contê-los. *Apud*. STEPHENSON, 1984, p.25.

²⁵⁹ I. *Vis motrix, orbi rotundo sufficiens, ex cujus vigore et constanti fortitudine tempus revolutorium oritur:*
II. *Et plaga, in quam eundum: quarum illa animali facultati rectius transcribitur, haec vero naturae intelligenti aut memori.* *Astronomia nova*, p. 68; KEPLER, 1992-b, p. 125.

No mundo criado, as direções dos movimentos dos planetas são determinadas por Deus, e os orbes sólidos necessitam apenas das almas motrizes para girar. Na física celeste de Peurbach os excêntricos correspondem a orbes sólidos e os sistemas de epiciclos e deferentes correspondem a sistemas sólidos nos quais é sacrificada a concentricidade dos orbes descritos por Eudoxo, Calipo e Aristóteles. No caso do sistema de epiciclo e deferente é preciso que haja duas almas aptas a imprimir a mesma velocidade constante aos dois movimentos, em sentidos contrários. No caso do excêntrico, uma alma deve imprimir ao planeta a sua velocidade no círculo excêntrico. Tanto no caso do epiciclo como naquele do excêntrico, o planeta não tem como observar o centro de sua órbita, visto que este é, em ambos os casos, um ponto vazio. Mas em um mundo onde os corpos celestes estão ligados a esferas sólidas isso não representa um problema; se existem orbes sólidos, as posições dos percursos planetários não precisam ser explicadas porque a contigüidade dos orbes determina os círculos percorridos pelos astros, e só resta às almas a tarefa de manutenção da velocidade constante, o que independe da percepção do centro do mundo da parte do astro em movimento.

Se os orbes não existem, então as explicações físicas dos modelos da astronomia ptolomaica devem ser reconsideradas. Cada movimento circular deve estar associado a alguma alma motriz que, como ocorre na astronomia de orbes sólidos, deve ser capaz de manter a velocidade de translação em cada círculo constante. A essa alma motriz deve agora ser superposta uma faculdade diretiva, apta a reconhecer o percurso circular em um éter homogêneo, que já não está dividido em regiões esféricas. A faculdade diretiva deve ser associada a alguma mente, pois a tarefa de estabelecer o percurso a ser percorrido é trabalho de uma mente (*mens*), e não de uma alma simples e grosseira (*simplex et bruta anima*).²⁶⁰ Mas para que essa mente possa definir o círculo a ser percorrido ela deve necessariamente reconhecer o centro desse círculo:

Com efeito, o círculo é ao mesmo tempo definido e obtido pela igualdade das distâncias ao centro, e qualquer que seja o número em que estas faculdades motrizes sejam construídas, o círculo seguramente, mesmo para Deus, não é outra coisa senão

²⁶⁰ Cf. *Astronomia nova*, p. 69; KEPLER, 1992-b, p. 126-127.

o que já foi dito. É certo que, dados três pontos em uma circunferência, os geômetras mostram como formar um círculo contínuo. Mas isto pressupõe que alguma parte da circunferência (aquela que passa pelos três pontos) já esteja concluída.²⁶¹

Pela sua própria definição um círculo não pode ser traçado sem que, a cada ponto, se observe o seu centro. Para que um planeta descreva um percurso circular sem nenhum auxílio externo, ele deve ser de alguma maneira capaz de perceber o centro do percurso, de maneira a regular a sua velocidade e manter-se sempre à mesma distância dele. A conclusão é que em um mundo sem orbes os dois modelos de que trata o teorema de Apolônio se tornam inviáveis do ponto de vista físico.

No caso do excêntrico, a alma motriz do planeta deveria ser capaz de reconhecer o centro vazio ou de calcular a cada ponto, conhecendo a excentricidade da órbita, a posição do centro do círculo com relação ao corpo central, possibilidade que Kepler considera demasiado complexa.²⁶² O sistema de epiciclo e deferente é ainda mais insatisfatório quando analisado fisicamente, pois o movimento do planeta sobre o epiciclo se dá necessariamente em torno de um ponto vazio, que além disso é ele próprio dotado de movimento circular. Como é o centro, ou melhor, a distância constante de todos os pontos até o centro que define o círculo, então nos dois modelos é difícil explicar a forma circular dos percursos, independentemente de quantas almas e mentes sejam admitidas.

O ponto de partida do argumento do capítulo é a constatação de que as hipóteses astronômicas do geocentrismo, resultantes da combinação do sistema cosmológico das esferas sólidas com a astronomia de posição ptolomaica, não resistiu ao teste da experiência, uma vez que as observações de Tycho Brahe comprovam que não podem existir orbes sólidos. A inexistência dos orbes exige a formulação de uma nova explicação causal para a circularidade dos movimentos, e essa explicação, mesmo tomada

²⁶¹ *Circulus enim iisdem et definitur et perficitur, aequalitate scilicet distantiae a medio. et quantumcunque motrices hasce facultates extollas, circulus tamen ne DEO quidem aliud est quam quod jam dictum. Docent quidem Geometrae, datis tribus in circumferentia punctis continuare circulum: sed hoc ipso praesupponitur aliqua pars circumferentiae (utpote per trina puncta iens) jam confecta. Astronomia nova*, p. 69-70, KEPLER, 1992-b, p. 127-128.

²⁶² Cf. *Astronomia nova*, p. 70; KEPLER, 1992-b, p. 128.

de uma maneira muito geral, demonstra a impossibilidade de que a causa dos movimentos dos planetas esteja situada nos próprios planetas.²⁶³

Kepler fecha o segundo capítulo indicando uma mudança de perspectiva com relação ao objetivo da astronomia de posição antiga, que encarava a equivalência entre as duas hipóteses geométricas como a habilidade compartilhada por ambas em *salvar as aparências* – no caso, as posições ocupadas pelo Sol ao longo do tempo.²⁶⁴ Seria mais justo dizer que a equivalência entre as hipóteses deriva do fato de que ambas reproduzem os mesmos movimentos realmente descritos no céu pelos astros:

Pois a equivalência entre essas hipóteses não repousa tanto na igualdade dos ângulos aparentes em A e α , mas em verdade ela repousa na identidade dos reais caminhos dos planetas através do céu etéreo. Pois o tamanho e o tipo de arco executado pelo planeta de C até E pelo ângulo CAE é igual ao tamanho e ao tipo de arco de γ até ϵ pelo ângulo igual $\gamma\alpha\epsilon$.²⁶⁵

5.3 A troca do sol médio pelo sol aparente

O terceiro capítulo aprofunda a análise sobre a relação entre os movimentos reais dos astros no céu e as aparências resultantes para um observador na Terra. O problema agora considerado é como a equivalência entre o excêntrico e o sistema de epiciclo e deferente se comporta caso seja alterada a posição do observador. O que Kepler tem em mente aqui é a troca do sol médio pelo sol aparente, uma modificação geométrica indispensável para a instauração de sua astronomia física.

No sol aparente está a fonte da força imaterial que move os planetas, e os pontos de afélio e periélio devem ser determinados em relação a ele. O sol médio, por outro lado, é para

²⁶³ Cf. *Astronomia nova*, p. 70; KEPLER, 1992-b, p. 128.

²⁶⁴ Cf. *Astronomia nova*, p. 66; KEPLER, 1992-b, p. 122.

²⁶⁵ *In hac igitur hypothesium aequipollentia, non tantum apparentes anguli ad A , α , sed ipsa etiam verissima Planetarum itinera per auram aetheriam, manent eadem utrinque. Qualem enim et quantum arcum Planeta conficit ex C in E circa angulum CAE , talem et tantum conficit etiam ex γ in ϵ circa aequalem $\gamma\alpha\epsilon$ angulum.* *Astronomia nova*, p. 71; KEPLER, 1992-b, p. 129.

Kepler um ponto vazio de corpo, sem significado físico ou qualquer marca que o possa distinguir de qualquer outro ponto. Kepler considera inadmissível do ponto de vista físico que um planeta se deslocando livremente no éter reconheça um ponto assim definido e possa a partir dele orientar sua trajetória. A linha dos apsides deve passar pelo centro do corpo solar, pois essa linha divide duas regiões de igual vigor, ou seja, em pontos do círculo situados a uma mesma altura com relação à linha dos apsides o planeta assume velocidades iguais, como se um lado fosse o reflexo especular do outro. A identificação do Sol como causa eficiente dos movimentos planetários se reflete geometricamente na substituição do sol médio pelo sol aparente. Porém, na *Astronomia nova* não basta que uma hipótese física seja razoável, e Kepler promete decidir através das observações isso que ele acaba de deduzir *a priori*.²⁶⁶

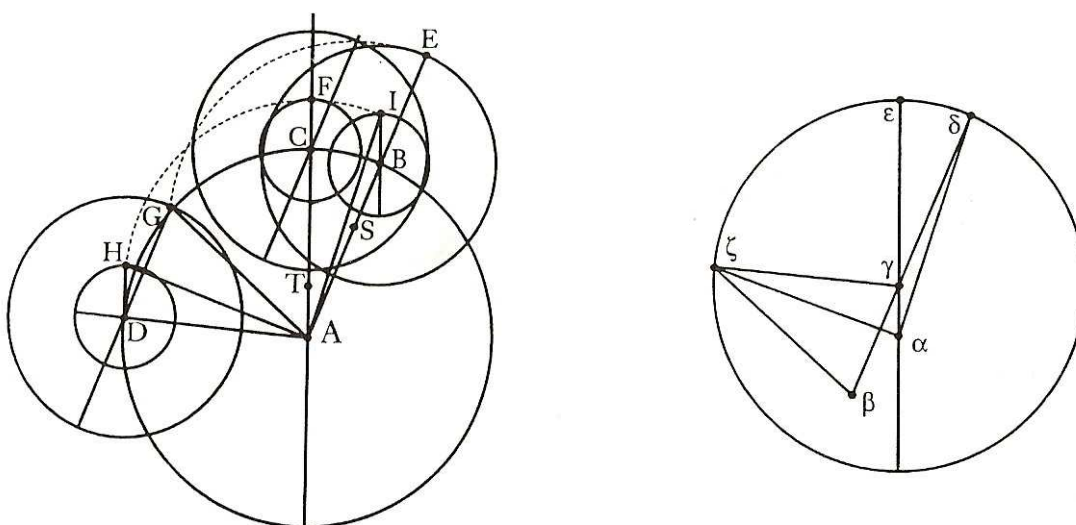


Figura 5.3 O movimento excêntrico $\delta \epsilon \zeta$ visto por um observador situado em α equivale ao movimento epicíclico IH, enquanto o mesmo movimento $\delta \epsilon \zeta$ visto de β equivale ao epiciclo maior EG. Note que o percurso do planeta, representado pela linha pontilhada, é apenas deslocado e não tem a sua forma alterada. *Apud*. KEPLER, 1992-b, p. 131.

²⁶⁶ Cf. *Astronomia nova*, p. 96; KEPLER, 1992-b, p. 167.

Em uma configuração geocêntrica, Kepler demonstra que um mesmo movimento circular produz aparências diferentes para observadores situados em pontos distintos da região próxima ao centro do círculo. A demonstração é feita nos dois esquemas geométricos, o círculo excêntrico e o sistema de epiciclo e deferente. Em ambos os casos o deslocamento do observador implica em um igual deslocamento do percurso observado, no sentido oposto. Como em ambos os casos a velocidade do planeta é constante, o deslocamento no percurso observado em nada altera a descrição física do movimento.

No copernicanismo, esse deslocamento corresponde à substituição do sol médio pelo sol aparente. O efeito aparente da substituição é, do mesmo modo, um deslocamento do percurso observado do planeta com relação ao Sol, ao qual não está associada nenhuma mudança qualitativa porque a velocidade do planeta é considerada constante. Entretanto, o deslocamento no percurso resultante da escolha do sol aparente implica em posições acrônicas (vide glossário) diferentes daquelas relativas ao sol médio, o que altera de maneira significativa a análise da primeira variação. Por outro lado, o deslocamento também altera a posição da linha dos apsides. Kepler conclui que esses efeitos são pequenos, uma consequência direta da pequena excentricidade da órbita da Terra. Esse resultado será útil mais tarde: quando for estabelecida a forma elíptica da órbita de Marte, Kepler excluirá a possibilidade de que a aparente não-circularidade seja resultante da adoção do sol aparente como centro dos movimentos planetários.

O quarto capítulo inclui um refinamento da astronomia ptolomaica. Na teoria da primeira variação exposta no décimo livro do *Almagesto* a velocidade angular do planeta não é constante nem com relação ao centro do círculo nem com relação à Terra, mas ao ponto equante, situado sobre a linha dos apsides a uma distância do centro igual à distância do Sol, em sentido oposto. O ponto equante é assim definido como o ponto a partir do qual o movimento do astro parece uniforme. Um resultado semelhante pode ser obtido com a adição de um segundo epiciclo, construído de maneira apropriada.

Se os planetas descrevem seus movimentos levados por orbes sólidos, a adoção do ponto equante tem o inconveniente físico de implicar em esferas girando com velocidade

Veremos mais adiante que para Kepler o ponto equante aparece como uma representação matemática da variação de velocidade do planeta em função de sua distância ao Sol. “E assim o ponto equante C nada mais é além de um atalho geométrico para se calcular as equações [vide glossário] a partir de uma hipótese que é claramente física.”²⁷¹ Neste caso deve haver duas potências motrizes para que o movimento com velocidade variável em função da distância ao Sol seja explicado. A primeira delas está situada no Sol e é responsável pela velocidade variável do planeta em seu movimento circular, enquanto a segunda encontra-se no próprio planeta e é encarregada da variação de distância do planeta com relação ao Sol – isto é, da manutenção da excentricidade. Se o planeta descreve um círculo, então essas potências motrizes são necessariamente de naturezas diversas. A força solar é uma propagação esférica, que assim como a luz possui uma estrutura geométrica simples. Ela é portanto um conceito matematicamente tratável. Além disso, a força motriz solar dispensa a ação de mentes capazes de interpretá-la, se ela funciona como a correnteza de um rio. Já a força inerente ao planeta não se enquadra tão bem em um esquema mecanicista, exigindo do planeta alguma faculdade capaz de perceber a distância que o separa do Sol, para a partir dela calcular a correspondente distância ao Sol no momento seguinte de maneira a descrever um trajeto circular. Veremos também que a descoberta da não-circularidade da órbita tornará mais simples a tarefa atribuída à força inerente ao planeta.

O quinto capítulo da *Astronomia nova* está para o terceiro assim como o segundo está para o quarto. Enquanto o terceiro capítulo trata da substituição do sol médio pelo sol aparente nos sistemas equivalentes do excêntrico simples e do epiciclo com deferente, aqui são examinadas as consequências da substituição do sol médio pelo sol aparente no modelo planetário mais elaborado que ocupa o quarto capítulo. Novamente, a troca do sol médio pelo sol aparente desloca a linha dos apsides. Porém, no modelo mais refinado de Ptolomeu o planeta não descreve o círculo excêntrico correspondente à primeira variação com velocidade constante medida a partir do centro do círculo, mas com velocidade constante em relação ao ponto equante, situado sobre a linha dos apsides. Neste modelo,

²⁷¹ *Itaque punctum C aequantis nihil aliud est quam compendium Geometricum computandi aequationes ex hypothesi plane Physica. Astronomia nova*, p. 74; KEPLER, 1992-b, p. 135.

a reta que une o ponto equante ao centro da circunferência é privilegiada, e o deslocamento do Sol para uma posição fora desta linha tem consequências físicas, que devem ser consideradas.

Consideremos inicialmente que o planeta descreva um círculo excêntrico com velocidade constante vista a partir do centro, como no círculo excêntrico simples discutido no segundo capítulo da *Astronomia nova*. Se o observador estiver situado a um ponto afastado do centro de uma distância ‘e’, igual à excentricidade da órbita, a velocidade do planeta não lhe parecerá constante, ainda que ela o seja na realidade: quando a distância do planeta ao observador for menor do que o raio, o ângulo correspondente a um determinado segmento da órbita parecerá maior, e quando essa distância for maior que o raio, o mesmo ângulo parecerá menor. Assim, a velocidade do planeta vai parecer mínima quando o planeta estiver mais longe do observador, no afélio, e máxima quando o planeta passar pelo periélio, o ponto mais próximo ao observador. Essa aparente variação na velocidade do planeta, resultante da excentricidade da órbita, é representada pela equação óptica de centro (vide glossário), que tem esse nome porque se refere a uma variação aparente, e não a uma variação real.

Este modelo é no entanto demasiado simples para reproduzir a primeira variação dos movimentos dos planetas, que não perfazem seus trajetos no céu com velocidade constante. O modelo provido de um ponto equante representa a variação real na velocidade do planeta, que deve ser adicionada à variação aparente, resultante da excentricidade. Se o ponto equante for colocado sobre a linha dos apsides, o planeta vai se deslocar mais rapidamente quando estiver no periélio e mais lentamente quando estiver no afélio, assumindo velocidades intermediárias nas posições intermediárias do círculo. A variação real na velocidade do planeta é representada pela equação física de centro (vide glossário).

Neste caso, se o observador (ou o Sol, se for levado em conta um modelo heliocêntrico) for deslocado para fora da linha dos apsides, como havia sido feito no terceiro capítulo, ocorrerá uma mudança efetiva no percurso do planeta. Enquanto a variação real na

velocidade do planeta é sempre a mesma, independentemente da posição do observador, a variação aparente depende da posição deste. Se o observador está situado sobre a linha os apsides, os pontos de máxima e mínima velocidade real e aparente coincidem, mas se o observador é deslocado para um ponto fora dessa linha ele vai perceber uma variação aparente na velocidade em torno de máximos e mínimos diferentes daqueles que caracterizam a variação real. A conclusão é que, para um planeta em movimento em torno do Sol com velocidade variável, a troca do sol médio pelo sol aparente implica em uma alteração significativa do percurso observado. Isto acontece porque o ponto equante reproduz uma variação real de velocidade. É preciso que seja construída uma nova linha dos apsides, que passe pelo antigo ponto equante e pela nova posição do observador. Essa nova linha determina um novo centro, e um novo círculo excêntrico nos céus. Kepler demonstra com dados relativos ao movimento de Marte que a diferença é pequena, inferior a 5' de arco.²⁷²

A troca do sol médio pelo sol aparente também pode ser expressa geometricamente por um deslocamento do ponto equante, mantendo-se o observador no mesmo lugar. A manutenção do observador no mesmo lugar e a correspondente mudança de posição do ponto equante também implica em um novo excêntrico, que passa pelo antigo observador e pelo novo ponto equante, estabelecendo uma nova linha dos apsides. Mais uma vez, a diferença numérica não excede os 5'.²⁷³ Kepler não mobiliza dados experimentais para encontrar a diferença resultante do deslocamento do observador no sistema de duplo epiciclo adotado por Copérnico e Tycho Brahe, se limitando a explicar brevemente, através de uma figura, que o resultado da substituição seria da mesma ordem.

O sexto capítulo fecha a primeira parte da *Astronomia nova* com uma discussão acerca da equivalência, nos três sistemas de mundo, dos modelos empregados para representar a segunda variação dos movimentos planetários. Em Marte, como nos demais planetas superiores, a segunda variação é expressa por Ptolomeu através de um epiciclo ligado ao círculo que representa a primeira variação, denominado epiciclo maior. Ela é interpretada

²⁷² Cf. *Astronomia nova*, p. 81-84; KEPLER, 1992-b, p. 146-149.

²⁷³ Cf. *Astronomia nova*, p. 82-86; KEPLER, 1992-b, p. 148-152.

por Copérnico (e pelos antigos pitagóricos e Aristarco de Samos)²⁷⁴ como o reflexo do movimento orbital da Terra nos movimentos observados dos planetas.

A segunda variação representa fenômenos sinódicos, dependentes da posição relativa entre o Sol e o planeta, como o aumento do diâmetro aparente durante as conjunções e a diminuição desse diâmetro por ocasião das oposições; o movimento veloz em sentido direto nas conjunções e o movimento retrógrado nas oposições. Kepler critica a solução ptolomaica porque embora seja elaborada de maneira a reproduzir adequadamente as aparências, ela não explica o motivo pelo qual o movimento do epiciclo é regulado pelas conjunções e oposições do centro do epiciclo com relação ao Sol. Nas palavras de Kepler:

Assim, Ptolomeu ajustou seu parecer aos cálculos e à geometria, e não produziu [em nós] admiração. Pois ainda resta a questão sobre qual é a causa que conecta todos os epiciclos dos planetas ao Sol, de maneira que eles sempre completem os seus períodos quando seus centros estiverem em conjunção com o Sol.²⁷⁵

Certos autores latinos, nos diz Kepler, explicavam a correlação entre esses fenômenos e a posição relativa do Sol através de aspectos e raios do Sol (*Solis aspectibus et radiis*). Contudo, ele continua, essa tese não era astronômica e nem era passível de verificação numérica.²⁷⁶ A ligação entre o Sol e os planetas deve ter a forma de uma causalidade físico-matemática, e uma tal relação só pode ser descoberta através da análise diligente dos movimentos planetários.²⁷⁷

²⁷⁴ Cf. *Astronomia nova*, p. 88; KEPLER, 1992-b, p. 156. Sobre as teorias precursoras do heliocentrismo na Antigüidade ver ÉVORA, 1993, p. 45-55.

²⁷⁵ *Ita PTOLEMAEVS sententiam suam numeris et Geometriae accomodavit, admirationem non sustulit. Adhuc enim caussa quaeritur, quae omnes Planetarum epicyclos Soli connectat, ut ii semper in congressu centri sui cum Sole periodum suam absolvant.* *Astronomia nova*, p. 88; KEPLER, 1992-b, p. 156.

²⁷⁶ Cf. *Astronomia nova*, p. 87; KEPLER, 1992-b, p. 155.

²⁷⁷ O que está em jogo aqui é a distinção entre as causalidades normalmente empregadas na astrologia, baseadas em ‘qualidades ocultas’, e relações de causalidade matematizadas que podem ser experimentalmente verificadas, típicas da ciência kepleriana. Cf. CASSIRER, 2001, p. 193-194.

Desde os tempos do *Mistério* Kepler já havia notado que o tratamento dado por Copérnico à segunda variação permite que os fenômenos sinódicos, observados nos movimentos de todos os planetas e tratados separadamente na astronomia geocêntrica, sejam explicados em conjunto pelo movimento anual da Terra.²⁷⁸ Mesmo em um estágio anterior à formulação de uma astronomia física baseada na ação de forças, o copernicanismo é mais adequado a uma astronomia realista, que pretende revelar os reais movimentos celestes subjacentes aos fenômenos observados. Na introdução da *Astronomia nova* o movimento da Terra é apontado como uma única causa que explica vários efeitos, a saber, o segundo movimento de todos os planetas. Ou, como escreve Kepler:

A primeira [escola ptolomaica] trata separadamente de cada um dos planetas, e atribui causas situadas nos respectivos orbes aos movimentos de cada um, enquanto a segunda [escola mais recente] relaciona os planetas entre si, e deduz de uma única causa comum aquilo que é comum a seus movimentos. E esta última escola também se subdivide. Copérnico e o antiquíssimo Aristarco deduzem as estações e retrogradações dos planetas a partir da translação da Terra onde vivemos, ao que eu subscrevo. Tycho Brahe porém atribui a causa ao Sol, em cuja vizinhança ele disse existir como que uma espécie de nó (não físico, certamente, mas apenas quantitativo) onde estão conectados os círculos excêntricos de todos os cinco planetas. E além disso é como se esse nó, juntamente com o corpo solar, girasse em torno da Terra imóvel.²⁷⁹

As causas a que ele se refere aqui podem ser nomeadas ‘causas geométricas’ desde que se entenda que o que está em jogo é algo muito diferente do que Kepler descreve como

²⁷⁸ É muito esclarecedora a discussão de Otto Neugebauer sobre a relação entre os movimentos dos planetas em torno do Sol e os movimentos vistos da Terra. NEUGEBAUER, 1969, p. 122-124.

²⁷⁹ *quarum illa Errantium stellarum singulas separatim tractat, causasque motuum singulis in suis ipsarum orbibus assignat; haec Planetas inter se comparat, quaeque in eorum motibus deprehenduntur communia, ex eadem communi causa deducit. Atque haec secta rursum subdividitur; Causam enim, quae Planetas efficit videri stationarios retrogradosque, COPERNICVS cum antiquissimo ARISTARCHO transcribit translationi Telluris domicilii nostri; quibus et ego subscribo: TYCHO vero BRAHEVS causam illam transcribit Soli, in cujus vicinia ait connexos esse, ceu nodo quodam (non sane corporeo, sed quantitativo tamen) omnium quinque Planetarum Eccentricos circulos; atque hunc veluti nodum, una cum Solari corpore, circa Terram immobilem circumire. Astronomia nova, p. 19; KEPLER, 1992-b, p. 47.*

causas arquetípicas ou geométricas no *Mistério cosmográfico* ou das formas arquetípico-geométricas impressas pela alma da Terra nos minerais e discutidas no opúsculo *Da neve sexangular*.²⁸⁰ Aqui, as ‘causas’ em jogo são simplesmente as diferentes hipóteses geométricas.

Do ponto de vista observacional, os três sistemas são a princípio equivalentes, já que eles são igualmente capazes de reproduzir os movimentos vistos da Terra. Do ponto de vista explicativo, entretanto, os sistemas de Copérnico e de Tycho são superiores porque permitem a explicação dos mesmos movimentos empregando um menor número de causas. No segundo capítulo deste trabalho, vimos que de acordo com a *Defesa de Tycho* uma das características distintivas das hipóteses verdadeiras é a capacidade de explicar simultaneamente vários fenômenos correlatos. É exatamente isso que se verifica quando a segunda variação é avaliada em uma construção geométrica heliocêntrica. Se no sistema ptolomaico as retrogradações dos planetas (que são fenômenos sinódicos) são explicadas através de epiciclos construídos individualmente para cada planeta particular, nos sistemas de Copérnico ou de Tycho as retrogradações dos cinco planetas são explicadas por um único movimento circular, da Terra em volta do Sol ou do Sol em volta da Terra, respectivamente.

Kepler traça um paralelo entre a atribuição da segunda variação ao movimento da Terra em torno do Sol imóvel e a separação, efetuada nos primórdios da ciência astronômica, entre o movimento diário de rotação dos céus em vinte e quatro horas e o movimento próprio de cada astro.²⁸¹ O movimento diário, ou primeiro movimento, nos diz Kepler, não era propriamente atribuído aos planetas pelos astrônomos antigos, mas neles introduzido (*infero*) de modo que os planetas compartilhassem da rotação diária do céu de estrelas fixas. Copérnico não atribui a segunda variação a um movimento próprio dos planetas ou neles introduzido, mas o explica como o resultado de uma ilusão visual (*fallacia visus*) decorrente do fato de que o observador não se encontra em repouso, mas

²⁸⁰ Discutimos brevemente a explicação de Kepler para a forma hexagonal dos flocos de neve no primeiro capítulo deste trabalho.

²⁸¹ Cf. *Astronomia nova*, p. 88; KEPLER, 1992-b, p. 156.

sobre um planeta em movimento. Do mesmo modo, também o primeiro movimento dos astros é uma ilusão no sistema copernicano, já que ele na realidade nada mais é além da aparência no céu do movimento de rotação da Terra em torno de seu eixo em um período de 24 horas.

A demonstração da equivalência geométrica dos três sistemas de mundo tem como suporte a investigação, em cada um deles, das consequências da troca do sol médio pelo sol aparente nos modelos que reproduzem a segunda variação. Do ponto de vista da astronomia de posição, a diferença mais profunda entre os grandes sistemas de mundo está situada na maneira como a segunda variação dos movimentos planetários é representada, pois é ela que Copérnico explica como o reflexo do movimento da Terra. Essa forma de exposição possibilita que as consequências físicas particulares de cada modelo sejam avaliadas ao mesmo tempo em que é demonstrada a equivalência geométrica. Nos três casos, a substituição do sol médio pelo sol aparente implicará em uma diferença considerável na segunda variação. Também nos três casos, Kepler mostra que a adoção do sol aparente é mais razoável do ponto de vista físico, desde que se admita que não existem orbes sólidos.

Kepler começa criticando Copérnico por ter adotado o sol médio como ponto de referência na determinação das posições acrônicas, que como vimos acima correspondem aos pontos onde a segunda variação se anula. Do ponto de vista físico, a oposição dotada de significado é aquela relativa ao corpo do Sol, e a linha dos apsides deve passar pelo sol aparente.²⁸² Também no modelo ptolomaico, as oposições devem ser tomadas em relação ao sol aparente, pois não é razoável que o movimento no epiciclo seja regulado pela posição relativa de um ponto vazio.²⁸³ Ainda que o planeta se mova graças a uma potência interna, ele deve de alguma maneira se referir ao corpo do Sol para definir o seu percurso. Por fim, no sistema de Tycho Brahe é mais razoável que o centro dos

²⁸² Cf. *Astronomia nova*, p. 89-91; KEPLER, 1992-b, p. 158-160.

²⁸³ Cf. *Astronomia nova*, p. 97; KEPLER, 1992-b, p. 169.

movimentos dos planetas seja o sol aparente, e é em relação a ele que as oposições devem ser tomadas.²⁸⁴

Uma análise geométrica do problema mostra que as posições acrônicas determinadas a partir do sol médio são diferentes daquelas relativas ao sol aparente, a não ser que a oposição (ou a conjunção) se dê sobre a linha dos apsides, sobre a qual encontram-se tanto o sol médio quanto o sol aparente. Neste último caso pode-se indiferentemente adotar um ou outro, mas nas longitudes intermediárias aparece uma diferença pequena, porém apreciável. Entretanto, a segunda variação descreve fenômenos sinódicos, dependentes da posição relativa entre o planeta e o Sol, e como seria de se esperar o erro decorrente da adoção do sol médio agora é maior, chegando a ultrapassar o valor de 1 grau. As demonstrações são repetidas nos três sistemas, e produzem os mesmos resultados semelhantes.

Assim, Kepler conclui que as hipóteses geométricas desenvolvidas para reproduzir a segunda variação nos três sistemas de mundo são perfeitamente equivalentes. Os três modelos reproduzem adequadamente as mesmas aparências porque eles são representações geométricas distintas, e igualmente válidas, dos mesmos movimentos reais. A determinação daquele que corresponde à real configuração dos astros depende portanto de outros fatores além do acordo com as observações.

A comparação entre os modelos geométricos para a segunda variação mostra que o movimento da Terra, admitido nos sistemas de Copérnico e Tycho, explica a segunda variação do movimento de todos os planetas. Essa unidade explicativa, que não é compartilhada pelo modelo ptolomaico, indica a realidade do movimento da Terra, ainda que os três modelos da segunda variação sejam equivalentes do ponto de vista da representação dos movimentos. A decisão sobre qual a verdadeira configuração do universo dependerá da análise das particularidades físicas de cada sistema. Kepler adianta

²⁸⁴ Cf. *Astronomia nova*, p. 103-104; KEPLER, 1992-b, p. 177.

que, em um mundo sem orbes, o modelo de Copérnico é superior.²⁸⁵ A prova definitiva virá nas quatro partes seguintes do livro, quando a nova física celeste heliocêntrica for empregada na determinação do caminho exato percorrido por Marte no céu.

²⁸⁵ Cf. *Astronomia nova*, p. 97; KEPLER, 1992-b, p. 169.

Capítulo 6 – O novo método astronômico exposto através de dois problemas: o equante ptolomaico e o movimento da Lua

Investiguemos inicialmente a aplicação do método descrito na *Defesa de Tycho* a dois problemas bem delimitados de que Kepler trata na *Astronomia nova*: a construção de uma teoria física para o equante de Ptolomeu (vide glossário) e o estudo do movimento da Lua. Nesses dois exemplos é possível identificar claramente todos os elementos constituintes do método astronômico de Kepler.

Os dois problemas representam etapas importantes no processo de fundação da nova astronomia física. O círculo equante é o artifício por meio do qual Ptolomeu reproduzira a variação de velocidade dos planetas exteriores em suas órbitas excêntricas, e na argumentação da *Astronomia nova* ele corresponde à primeira tentativa de explicar a variação de velocidade do planeta Marte por meio da força motriz solar. O equante é interpretado por Kepler como uma representação geométrica da ação do Sol sobre o planeta.

Quanto ao movimento da Lua, Kepler tem motivos importantes para procurar explicá-lo adequadamente segundo seus preceitos físicos, o que justifica a inclusão de um capítulo dedicado ao tema em um livro consagrado ao movimento de Marte.²⁸⁶ Com efeito, observa-se que a Lua indubitavelmente descreve o seu curso ao redor da Terra, e não ao redor do Sol como se pode propor no caso dos planetas. Além disso, vimos que o principal argumento de Kepler contra o sistema de misto de Tycho Brahe aparece quando esse sistema é interpretado do ponto de vista da nova física celeste, que explica os movimentos dos astros por forças que agem à distância: em um mundo sem orbes sólidos, e considerando-se que o Sol cause o movimento dos cinco planetas, como explicar que a Terra possa mover o Sol, tantas vezes maior que ela (*tot vicibus se majorem*), e com ele

²⁸⁶ O capítulo 37 da *Astronomia nova* trata do movimento da Lua. *Astronomia nova*, p. 252-254; KEPLER, 1992-b, p. 400-403.

os cinco planetas?²⁸⁷ Contudo, podia-se objetar que no sistema de Copérnico o Sol também não é o centro de todos os movimentos celestes, já que a Lua descreve seu percurso ao redor da Terra.

A explicação física do movimento da Lua a partir do magnetismo terrestre enfraquece essa objeção porque estabelece um mecanismo físico em que a Terra causa o movimento da Lua de uma maneira similar àquela como o Sol causa os movimentos dos planetas. O magnetismo terrestre havia sido discutido por William Gilbert e amplamente corroborado pelo funcionamento das bússolas. Desse modo, a explicação física do movimento da Lua já surge dentro de um contexto onde forças capazes de agir à distância são tradicionalmente aceitas, e transforma uma antiga objeção ao sistema de Copérnico em mais um argumento favorável à nova interpretação física do heliocentrismo.²⁸⁸ Isso é corroborado pela inclusão do capítulo logo após o núcleo da exposição do conceito de força solar na *Astronomia nova*, que ocupa os capítulos 32-36 e onde, como vimos, a analogia com o magnetismo terrestre constitui uma das principais pistas para a decifração da natureza da força solar.²⁸⁹

6.1 Uma explicação física para o *punctum aequans* de Ptolomeu

Vimos que a idéia de que a variação de velocidade de um planeta em seu percurso em torno do Sol se deve à ação de alguma causa localizada no próprio Sol já aparece no *Mistério cosmográfico*. Na *Astronomia nova* essa idéia é progressivamente elaborada até

²⁸⁷ Cf. *Astronomia nova*, p. 24; KEPLER, 1992-b, p. 53. Esse argumento contra o sistema de Tycho Brahe, levantado na introdução da *Astronomia nova*, já foi discutido no terceiro capítulo do presente trabalho.

²⁸⁸ Anos mais tarde, Kepler observará que a descoberta galileana das luas de Júpiter contribui para afastar a objeção ao copernicanismo representada pelo movimento da Lua em torno da Terra: “Em verdade (como tu, Galileu, bem inferes), se há quatro corpos que rodeiam Júpiter, enquanto este segue um curso de doze anos, que absurdo disse Copérnico da Terra [ao afirmar] que, durante o seu movimento anual, uma Lua está a ela ligada e gira com ela na mesma marcha?” *Nimirum (ut tu GALILAE pulchrè infers) si Iovem curriculo duodecim annorum occupatum, quatuor circulatores antepone cingunt; quid absurdi dixit COPERNICVS, Telluri, dum annuo motu redit, unam Lunam eadem ratione adhaerescere. Dissertação com o mensageiro das estrelas*, p. 307; KEPLER-GALILEU, 1984, p. 144.

²⁸⁹ Os capítulos 38-39; 56-58 da *Astronomia nova* tratam da interação da força solar com a força inerente ao planeta, da qual resulta uma órbita excêntrica ou, na formulação final de Kepler, elíptica. Examinaremos essa questão no próximo capítulo.

a instituição da lei das áreas, conhecida como a segunda lei de Kepler. A primeira etapa desse processo é a construção de uma explicação física para o equante de Ptolomeu.

O tema ocupa a segunda parte da *Astronomia nova*, onde Kepler demonstra a impossibilidade de se reproduzir o movimento exato de Marte em torno do Sol segundo as técnicas da astronomia tradicional, isto é, através de um círculo munido de ponto equante. O equante havia sido empregado por Ptolomeu, nos diz Kepler, para explicar a primeira variação do movimento de Marte.

Observa-se que o planeta percorre diferentes porções do círculo zodiacal com velocidades diferentes, ao contrário do que seria de se esperar caso o movimento do planeta obedecesse a alguma lei de uniformidade (*lex aequalitatis*).²⁹⁰ Ptolomeu reproduzira esse dado observacional fazendo a velocidade do centro do epiciclo sobre o qual se desloca o planeta constante não em relação ao centro do excêntrico, nem em relação à Terra, mas em relação a um terceiro ponto, o ponto equante, situado à mesma distância do centro do excêntrico do que a Terra, na direção oposta sobre a linha das apsides. O ponto equante é o centro do círculo equante, de raio igual ao raio do excêntrico porém deslocado em direção ao afélio. Em outras palavras, o centro do círculo excêntrico está situado a meia distância entre a Terra e o centro do círculo equante. Na teoria de Ptolomeu o planeta descreve arcos iguais em tempos iguais sobre esse círculo imaginário. As posições correspondentes no excêntrico são determinadas pelas projeções, em direção ao centro do equante, dos pontos que delimitam os arcos iguais sobre o círculo equante. Dessa maneira o movimento uniforme sobre o círculo equante corresponde a uma medida de tempo, observa Kepler, desde que se faça o círculo equante inteiro denotar o período do planeta.²⁹¹

Observa-se que movimento translacional de Marte (a primeira variação, no sistema ptolomaico) é descrito com velocidade variável, e que os pontos de máxima e mínima velocidade são diametralmente opostos, e coincidem com as apsides. Nos pontos

²⁹⁰ Cf. *Astronomia nova*, p. 151; KEPLER 1992-b, p. 249.

²⁹¹ Cf. *Astronomia nova*, p. 234; KEPLER 1992-b, p. 373.

intermediários a velocidade aumenta e decresce gradualmente, e o círculo excêntrico é assim dividido em duas regiões simétricas, percorridas em tempos iguais. Esta é uma hipótese astronômica, expressa geometricamente por Ptolomeu através do círculo equante. Kepler explica fisicamente a velocidade variável do planeta em torno do Sol pela força motriz solar, e o equante é por ele interpretado como uma representação geométrica da ação dessa força solar.

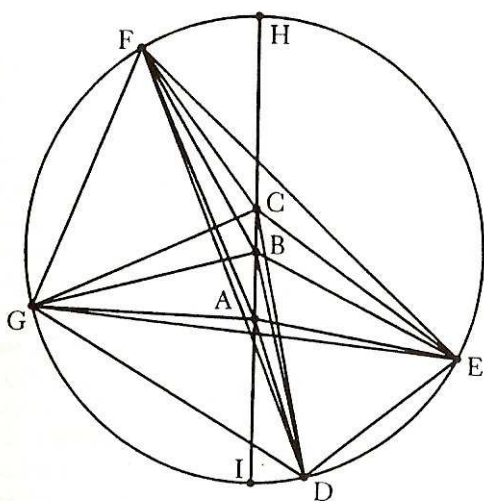


Figura 6.1 - A teoria ptolomaica para os planetas superiores é descrita por Kepler no capítulo 16 da *Astronomia nova*. De acordo com Kepler, Ptolomeu reproduz a primeira variação por meio de um círculo excêntrico, e a segunda variação por meio de um epiciclo (que não é representado na figura). O centro do epiciclo se desloca sobre o círculo excêntrico DEFG com movimento não-uniforme visto da Terra A ou do centro do excêntrico B, mas com movimento uniforme em relação ao centro do círculo equante C. Arcos iguais do círculo equante são percorridos em tempos iguais. Os arcos correspondentes sobre o círculo deferente têm comprimentos diferentes, e são maiores nas vizinhanças do perigeu do que próximo ao apogeu. *Apud*. KEPLER, 1992-b, p. 252.

Entretanto, Kepler vê um problema no equante de Ptolomeu. Sua posição sobre a linha das apsides em um ponto diametralmente oposto àquele ocupado pela Terra lhe parece

arbitrária.²⁹² É preciso que a posição do centro do círculo equante seja determinada experimentalmente, a partir dos dados de Tycho. A investigação inicial de Kepler é geométrica e construída a partir de um conjunto de quatro observações acrônicas, nas quais a segunda variação, originária do movimento da Terra, é eliminada em virtude do alinhamento Marte – Terra – Sol.

Removida a segunda variação, Kepler também corrige os dados eliminando a precessão dos equinócios (vide glossário), para que a linha das apsides permaneça sempre na mesma direção. Dessa maneira resta apenas, como objeto de investigação, o movimento de Marte em torno do Sol. Essa é uma etapa crucial no processo de determinação da órbita de Marte.²⁹³ Os métodos geométricos e a terminologia ainda são aqueles da astronomia antiga, mas a identificação do equante com a representação geométrica de uma força operante no espaço interplanetário já deixa transparecer o método próprio da nova astronomia física.

Em primeiro lugar, Kepler constrói um círculo capaz de comportar as quatro observações acrônicas feitas por Tycho Brahe entre os anos de 1587 e 1595. Em seguida, ele supõe que o ponto equante permaneça fixo sobre a linha das apsides, mas não define a sua distância até o centro. Por um processo iterativo, que Kepler confessa ter-lhe consumido ao menos setenta tentativas, são determinados a direção da linha das apsides e as excentricidades do excêntrico e do círculo equante. A excentricidade obtida para o Sol é de 0,11332 do raio, enquanto a excentricidade do círculo equante é de 0,07232.²⁹⁴ Ao contrário do que fora admitido por Ptolomeu, os dois valores encontrados aqui não são iguais. A seguir, no capítulo 18, Kepler compara o modelo resultante com outras seis

²⁹² Cf. *Astronomia nova*, p. 152; KEPLER, 1992-b, p. 251. Kepler já havia criticado a arbitrariedade com que Ptolomeu estabelece a posição do ponto equante no *Mistério cosmográfico*, capítulo 22, propondo uma explicação qualitativa em termos da menor concentração da força motriz solar nas regiões próximas ao apogeu do que naquelas próximas ao perigeu. Cf. *Mistério cosmográfico*, p. 77; KEPLER, 1992-a, p. 210.

²⁹³ Na terceira parte da *Astronomia nova* Kepler procede, de maneira análoga, à determinação da órbita da Terra através da segunda variação do movimento aparente de Marte.

²⁹⁴ Cf. *Astronomia nova*, p. 156-168; KEPLER 1992-b, p. 257-269. O procedimento de Kepler é explicado por STEPHENSON, 1987, p. 42-44.

observações de Tycho e com duas observações feitas por ele próprio, em 1602 e 1604²⁹⁵; a predição das posições em longitude é obtida com uma precisão da ordem de dois minutos, comparável ao tamanho do planeta quando das oposições.²⁹⁶

O sucesso da teoria no cálculo das seis longitudes tabeladas indica que ela representa adequadamente o movimento em longitude do planeta. Porém, Kepler distingue o real trajeto percorrido pelo planeta no céu dos diversos modelos por meio dos quais esse movimento pode ser reproduzido, e a sua astronomia visa a descoberta deste movimento real, ao mesmo tempo subjacente às aparências e às teorias geométricas capazes de reproduzi-las. Se na astronomia antiga a teoria das longitudes funcionava independentemente da teoria das latitudes (vide glossário), Kepler tem o objetivo de descobrir a órbita descrita por Marte em torno do Sol, para a partir dessa órbita (juntamente com a órbita da Terra, determinada na terceira parte da *Astronomia nova*) derivar os movimentos observados, seja em latitude, seja em longitude.

Assim, tendo sido obtido sucesso na teoria da longitude, a análise do movimento em latitude constitui um problema correlato que funciona como um teste para a hipótese do equante. Se esta hipótese expressar o movimento real de Marte em torno do Sol, a teoria das latitudes dela derivada deve ser correta. Veremos que a análise das latitudes relativas a observações acrônicas revelará que a hipótese geométrica do círculo excêntrico dotado de um ponto equante não corresponde à órbita de Marte.²⁹⁷

²⁹⁵ Todas as dozes observações empregadas por Kepler encontram-se em uma tabela anexada ao final do capítulo 15: *Astronomia nova*, p. 150; KEPLER 1992-b, p. 248. Esta é uma rara menção à atuação de Kepler como astrônomo experimental.

²⁹⁶ Cf. *Astronomia nova*, p.171; KEPLER 1992-b, p. 276. O diâmetro aparente de Marte é bastante variável, e depende da sua posição com relação à Terra. Como observa William Donahue (KEPLER, 1992-a, p. 276, n. 2), Kepler aqui superestima esse diâmetro; nas oposições, quando está mais perto da Terra, Marte ocupa no céu um ângulo de cerca de 18”.

²⁹⁷ Essa análise, feita no capítulo 18 da *Astronomia nova*, considera as distâncias através do movimento em latitude da Terra e de Marte tomados em conjunto, isto é, através de uma avaliação da latitude geocêntrica de Marte. Mais adiante, no capítulo 20, as distâncias serão novamente avaliadas através de um estudo das longitudes geocêntricas ou seja, de medidas de longitude correspondentes a observações não-acrônicas.

Kepler supõe que os planos das órbitas permanecem fixos e se cruzam no corpo do Sol, o centro do mundo.²⁹⁸ Desse modo, a teoria da latitude se transforma em uma investigação sobre a inclinação relativa entre as órbitas de Marte e da Terra.²⁹⁹ O tema foi abordado no capítulo 13 da *Astronomia nova*, onde por diversos procedimentos Kepler concluiu que a distância angular máxima entre as órbitas é de $1,5^\circ$.

É possível obter, a partir de duas medidas acrônicas da latitude geocêntrica de Marte, as distâncias do Sol até o afélio e o periélio da órbita do planeta e, conseqüentemente, a excentricidade da órbita circular. A adoção do Sol aparente implica em uma excentricidade variável, igual à soma vetorial das excentricidades das órbitas da Terra e de Marte.³⁰⁰ Nessa nova análise Kepler chega a uma excentricidade do Sol entre 0,08000 e 0,09943 do raio, cujo valor médio, igual a 0,089715, difere bastante daquele anteriormente obtido para a excentricidade, de 0,11332 do raio.

Por outro lado, a excentricidade encontrada nesta última análise é aproximadamente igual à excentricidade do círculo equante, como havia sido previsto por Ptolomeu. Em compensação, as posições em longitude calculadas com a nova excentricidade não concordam tão bem com a experiência, atingindo erros de $8'$ em certas regiões do excêntrico, nos octantes e nas vizinhanças das apsides. Esse erro, nos diz Kepler, seria compatível com as observações disponíveis à época de Ptolomeu, nas quais o erro era da ordem de $10'$. O erro das observações de Tycho não ultrapassam os $2'$. É preciso construir uma teoria mais acurada:

²⁹⁸ Owen Gingerich considera que essa idéia, por sua importância, deveria figurar como a 'lei zero' da astronomia kepleriana. Cf. GINGERICH, 1993, p. 337-339. Ao contrário do que fizera Copérnico, que ao definir o centro da órbita terrestre como o centro do mundo posicionara o Sol *próximo* a este ponto, Kepler estabelece como um princípio fundamental que o centro do mundo é ocupado pelo corpo solar, cujo centro coincide com o centro da esfera das estrelas fixas. Em consequência disso a órbita da Terra é excêntrica, como as órbitas dos demais planetas. Essa transformação que à primeira vista pode parecer sutil, dada a pequena excentricidade da órbita da Terra, é o fundamento de uma astronomia verdadeiramente heliocêntrica. Além do importante agrupamento da Terra e dos demais planetas em uma mesma teoria planetária, essa transformação implica em conseqüências astronômicas consideráveis, como pode-se perceber no presente exemplo.

²⁹⁹ Stephenson observa que a teoria copernicana da latitude mantém periodicidades ligadas ao movimento orbital da Terra, decorrentes do emprego do sol médio. Cf. STEPHENSON, 1987, p. 40-42.

³⁰⁰ Cf. *Astronomia nova*, p. 176; KEPLER, 1992-b, p. 284.

Já que a bondade divina nos concedeu Tycho Brahe, observador diligentíssimo, a partir de cujas observações é acusado este erro de 8 minutos nos cálculos ptolomaicos, é justo que, com a mente grata, reconheçamos e aperfeiçoemos esta graça de Deus. Assim, apliquemo-nos nisso com empenho, e indaguemos enfim pela verdadeira forma dos movimentos celestes, apoiados por estes argumentos que flagram a falácia das suposições [acima]. No que segue, caminho à frente e conduzo os outros, na medida do meu caminhar, por esta estrada. Pois, se eu tivesse julgado desprezíveis oito minutos em longitude, com a biseção da excentricidade eu já teria corrigido suficientemente a hipótese imaginada no capítulo 16. Agora, porque não puderam ser desprezados, esses 8 minutos sozinhos têm orientado a reforma de toda a astronomia, e constituído a matéria de grande parte da presente obra.³⁰¹

A importância concedida por Kepler ao papel da experiência na formulação de hipóteses astronômicas assume, na *Astronomia nova*, sua máxima expressão. Como vemos no presente exemplo, a precisão experimental obtida por Tycho Brahe determina o máximo erro aceitável na comparação das teorias de Kepler com a experiência. Qualquer erro maior do que dois minutos é demasiado grande. A nova física celeste deve descobrir os verdadeiros movimentos dos planetas em torno do Sol, e a representação matemática desses movimentos deve gerar dados compatíveis com as observações extremamente precisas de Tycho. Além disso, os dados de Tycho orientam o processo de formulação de hipóteses físicas e geométricas, que são sucessivamente testadas pela aplicação a novos conjuntos de dados.

Ainda no capítulo 19, Kepler reflete sobre a falsidade da análise feita precedentemente no capítulo 16 a partir de quatro observações acrônicas. Se a conclusão é falsa, algum dos princípios assumidos também deve necessariamente sê-lo. Mas os princípios admitidos

³⁰¹ *Nobis cum divina benignitas TYCHONEM BRAHE observatorem diligentissimum concesserit, cujus ex observatis error hujus calculi Ptolemaici VIII minutorum in Marte arguitur; aequum est, ut grata mente hoc DEI beneficium et agnoscamus et excolamus. In id nempe elaboremus, ut genuinam formam motuum coelestium (his argumentis fallacium suppositionum deprehensarum suffulti) tandem indagemus. Quam viam in sequentibus ipse pro meo modulo aliis praeibo. Nam si contemnenda censuissem 8 minuta longitudinis, jam satis correxissem (bisecta scilicet eccentricitate) hypothesin cap. XVI inventam. Nunc quia contemni non potuerunt, sola igitur haec octo minuta viam praeiverunt ad totam Astronomiam reformandam, suntque materia magnae parti hujus operis facta. Astronomia nova, p. 178; KEPLER, 1992-b, p. 286.*

foram poucos (daí a laboriosidade da demonstração): além das observações, a circularidade da órbita e a suposição de que o ponto equante permanece fixo sobre a linha das apsides. Como as observações usadas não são falsas³⁰², alguma das duas outras suposições deve sê-lo. Essa discussão é fundamental para a compreensão deste e dos próximos capítulos da *Astronomia nova*. A teoria do capítulo 16 é uma teoria elaborada nos moldes da astronomia tradicional, da maneira mais sistemática possível. A partir de um pequeno número de suposições (entre as quais figura a forma circular do percurso planetário), o modelo geométrico é construído em estrito acordo com as observações. A seguir, nos capítulos 19 e 20 esse modelo é refutado por outras observações. Dessa maneira, porque o modelo do capítulo 16 é o mais geral possível, o seu fracasso representa o fracasso dos métodos tradicionais quando aplicados ao problema de descrever o percurso de Marte em torno do Sol.

O vigésimo capítulo traz uma segunda refutação da teoria planetária elaborada no capítulo 16. Kepler seleciona observações não-acrônicas de Marte próximo às apsides, nas quais se reflete o movimento da Terra em torno do Sol, isto é, onde a segunda variação é percebida. A excentricidade obtida fica entre 0,08377 e 0,1016, novamente de acordo com Ptolomeu e em contradição com o capítulo 16.³⁰³

No capítulo 19 Kepler havia mostrado que a teoria exposta no capítulo 16 é inadequada para representar as latitudes geocêntricas de Marte porque ela não reproduz adequadamente as distâncias do planeta ao Sol. A verificação das longitudes geocêntricas no capítulo 20 implica, em última instância, em uma nova verificação da representação das distâncias de Marte ao Sol previstas pelo modelo do capítulo 16. Com efeito, as longitudes geocêntricas dependem das distâncias de Marte e da Terra ao centro do sistema (o Sol) e das longitudes heliocêntricas dos dois planetas.

A conclusão de Kepler é que uma das duas suposições do capítulo 16 deve ser falsa. A permanência do ponto equante em uma posição fixa sobre a linha das apsides é necessária

³⁰² *Nam observationes usurpatae falsae non sunt. Astronomia nova*, p. 176; KEPLER, 1992-b, p. 284.

³⁰³ Cf. *Astronomia nova*, p. 180; KEPLER, 1992-b, p. 290.

do ponto de vista da física celeste, pois seria difícil explicar o movimento do ponto equante sobre a linha das apsides. Resta a circularidade do movimento de Marte que, Kepler adianta, será colocada em causa.³⁰⁴ O problema revela que as representações geométricas das observações são testadas tanto através do confronto com outras observações como do exame da possibilidade de se adequarem à elaboração de explicações físicas. No caso do ponto equante, Kepler observa que o fracasso em reproduzir adequadamente o movimento em latitude o obriga a abandonar uma das duas suposições feitas no capítulo 16, e ele decide abandonar a circularidade porque não lhe parece possível explicar fisicamente um ponto equante em movimento sobre a linha das apsides. Dessa maneira, a avaliação da possibilidade de se construir uma explicação física funciona como critério de seleção entre duas hipóteses geométricas. Um movimento não-circular pode a princípio ser explicado por alguma causa física, mas um ponto equante em movimento exigiria uma fonte variável de força motriz, o que não parece razoável do ponto de vista físico.

Apesar de fracassar na determinação de variáveis astronômicas dependentes das distâncias de Marte ao Sol, a *hipótese vicária*, como Kepler se refere posteriormente à teoria planetária do capítulo 16, é muito bem-sucedida na determinação das longitudes heliocêntricas de Marte. Kepler fará uso dela como hipótese auxiliar no cálculo de longitudes, em capítulos posteriores da *Astronomia nova*.³⁰⁵

6.2 A explicação física do movimento da Lua

A investigação dos mecanismos físicos responsáveis pelo movimento da Lua é estrategicamente posicionada entre os capítulos nos quais Kepler desenvolve o conceito de força motriz solar e os capítulos onde ele procura estabelecer uma explicação física para a excentricidade da órbita (ainda circular) do planeta Marte, ao final da terceira

³⁰⁴ Cf. *Astronomia nova*, p. 182; KEPLER, 1992-b, p. 293.

³⁰⁵ O recurso à hipótese vicária na determinação das longitudes, claramente compatível com a noção kepleriana de hipótese geométrica, não foi compreendido pelo astrônomo frísio David Fabricius (1564-1617), com quem Kepler se correspondia regularmente durante os anos de composição da *Astronomia nova*. Para ele, caso a hipótese física de Kepler fosse verdadeira em todos os sentidos, uma tal hipótese auxiliar não seria necessária. Cf. VOELKEL, 2002, p. 181-182.

parte. Na discussão sobre o movimento da Lua, Kepler considera o magnetismo terrestre como uma força capaz de agir à distância sobre um corpo celeste, causando o seu movimento. Nas considerações físicas precedentes Kepler tratara da força motriz esférica emanada do Sol, servindo-se da luz como modelo de *species* imaterial. Com o movimento da Lua a idéia de que também os planetas são dotados de potências capazes de agir sobre outros corpos distantes no espaço é introduzida no universo conceitual da física celeste. Logo adiante, será por meio dessa mesma força magnética que Kepler procurará explicar a excentricidade da órbita de Marte, por fim, a sua forma elíptica. A combinação das duas forças em uma mesma teoria dos movimentos excêntricos é originalmente concebida para a explicação do movimento da Lua em torno da Terra.

Do ponto de vista do método astronômico de Kepler, o estudo do movimento da Lua fornece um exemplo claro e sucinto da maneira como as hipóteses físicas são construídas a partir de um pequeno número de princípios e da análise das observações. Em primeiro lugar o astrônomo isola o problema a ser tratado. O objeto da investigação é uma nova variação no movimento da Lua, recém-descoberta por Tycho Brahe. Tycho havia observado que, mesmo se removidas as duas variações conhecidas por Ptolomeu, o movimento da Lua é mais veloz próximo às sizígias, isto é, nas luas novas e cheias, quando o satélite da Terra se encontra em conjunção ou oposição com o Sol, e mais lento próximo às quadraturas.

Na nova física celeste essa variação de velocidade deve receber alguma explicação física, e Kepler vai procurar construí-la a partir do magnetismo terrestre. Na análise as outras variações³⁰⁶ são mentalmente excluídas dos movimentos, e Kepler considera que a Lua descreve um percurso circular simples e concêntrico com a Terra.

A primeira possibilidade considerada por Kepler é que essa variação de velocidade resulte do acordo ou do desacordo entre a direção do movimento da Lua em torno da Terra e a direção dos movimentos planetários em torno do Sol, ou seja, entre o

³⁰⁶ A variação epicíclica e a evecção.

movimento da Lua e a circunvolução da força motriz solar. Essa possibilidade é descartada porque ela implica em uma velocidade máxima em C e mínima em O, o que não é observado. Uma segunda possibilidade é que essa variação resulte da variação da distância da Lua ao Sol. Ela também é descartada por não resistir ao teste com a experiência – os pontos L e F, nos quais o movimento da Lua é mais lento, estão localizadas a distâncias intermediárias do Sol com relação a C e O.

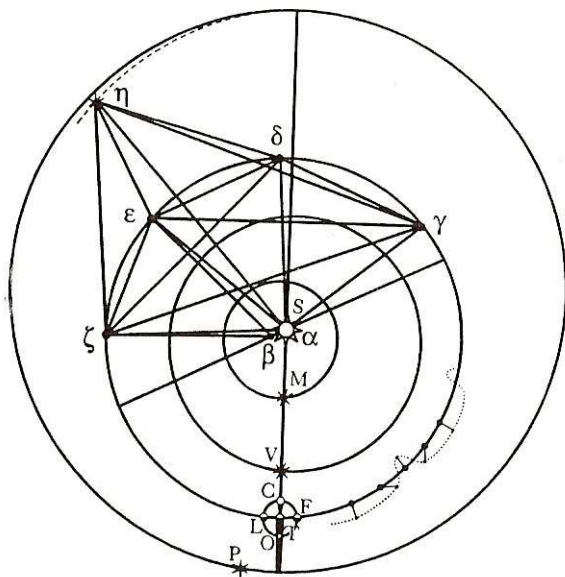


Figura 6.2 Tycho observou que, removidas as duas anomalias descritas por Ptolomeu, o movimento da Lua apresenta uma terceira variação. A Lua descreve seu percurso em torno da Terra com maior velocidade próximo à conjunção C e oposição O com o Sol em α , e com menor velocidade nas vizinhanças das quadraturas L, F. *Apud*. KEPLER, 1992-a, p. 342.

Neste ponto as duas hipóteses são aproximadas porque ambas são baseadas na interação entre a Lua e a força solar. No primeiro caso, o que Kepler considera implicitamente é que as duas forças circulares, o magnetismo terrestre e a força motriz solar, se somem ou se enfraqueçam mutuamente, de acordo com suas orientações relativas em cada ponto da órbita da Lua. No segundo, Kepler imagina que a Lua sofra uma ação direta da força motriz solar, exibindo, como os planetas, velocidades inversamente proporcionais à distância ao centro do universo. Como essas hipóteses não reproduzem os dados experimentais, o passo seguinte é a formulação de uma explicação física para este

fracasso. Kepler conclui que o Sol não exerce uma ação direta sobre a Lua e que esta, viajando junto com a Terra, compartilha do seu movimento em torno do Sol:

Assim, não é correto que a Lua, livre da Terra, seja confiada ao Sol. Com efeito, ela por fim se afastaria da Terra como os apogeus se afastam de seus lugares. É preferível atribuir à Terra uma força que retém a Lua, como por meio de alguma corrente, a qual estaria lá ainda que a Lua não circundasse a Terra. Com base nessa suposição, a Lua é levada como se [estivesse] no mesmo barco que a Terra, isto é, sob a mesma força solar, e agora, como se estivesse livre deste movimento vindo do Sol, ela é rotacionada separadamente pela Terra.³⁰⁷

A ação do Sol sobre a Lua tem como único efeito o de fazê-la acompanhar a Terra em seu curso anual. Todas as variações do seu movimento devem ser explicadas unicamente pela força magnética terrestre. Contudo, as observações mostram que a variação de Tycho depende da posição relativa dos três astros, Sol, Terra e Lua. É preciso explicar essa correlação, mas a interação direta entre a Lua e o Sol não é capaz de fornecer uma explicação compatível com a geometria do problema, isto é, a ação da força motriz solar sobre a Lua não pode explicar porque a sua velocidade é maior nos pontos C, O do que nos pontos F, L.

A solução do problema exige a construção de uma teoria física mais sofisticada. Kepler supõe então que a Terra seja responsável por todas as variações do movimento da Lua, mas que a força pela qual a Terra move a Lua seja originalmente produzida no Sol, e dele transmitida para a Terra, que então move a Lua. Desse modo, o movimento da Lua é imediatamente causado pela Terra, mas a força através da qual a Terra o causa lhe é comunicada pelo Sol. Por esse motivo ela é mais intensa ao longo da linha AT que une a Terra ao Sol, isto é, nos pontos de conjunção e oposição C e O, como é observado. A linha que une o Sol e a Terra, as duas fontes de movimento, é denominada por Kepler

³⁰⁷ *Nempe non recte fit, ut Lunam Soli permittamus a terra liberam. Aberraret enim denique a terra, ut apogaea a locis suis aberrant. Quin potius tribuenda telluri vis retentiva Lunae, ceu catena quaedam; quae esset, etsi Luna terram plane non circumiret; et qua posita, Luna cum terra quasi in eadem navi fertur, nempe in eadem virtute solis, jamque, quasi hoc motu ex sole, libera esset, privatim a terra rotatur. Astronomia nova, p. 253. KEPLER, 1992-b, p. 402.*

diâmetro de força (*diameter virtuosa*).³⁰⁸ A idéia de que exista um tal diâmetro virtuoso se movendo junto com a Terra em torno do Sol, ao longo do qual a força pela qual a Terra move a Lua é mais intensa, possibilita a explicação física da variação observada. Próximo aos pontos de conjunção e oposição a velocidade da Lua é maior porque ali a força motriz impressa pela Terra é fortalecida.

Vedes portanto que estas especulações físicas são assim preparadas de maneira a poder fornecer os fenômenos da Lua. A Lua não é primariamente movida pelo Sol em seu circuito em torno da Terra, mas por alguma força oculta na própria Terra; dali a *species* imaterial é lançada até o corpo da Lua, ainda que mais fortemente ao longo da linha que conecta os centros do Sol (a fonte primária) e da Terra.³⁰⁹

Kepler considera difícil explicar claramente como esse diâmetro se torna forte.³¹⁰ As rotações do Sol e da Lua em torno de seus próprios eixos se dão com velocidades uniformes, e portanto a força motriz, seja ela solar ou terrestre, também tem velocidade uniforme. Se a força motriz não pode ser mais rápida ao longo do diâmetro de força, resta a possibilidade de que essa força seja mais robusta (*robustior*) ao longo desse diâmetro TS.

Essa solução é testada por Kepler, que a aplica à variação mensal do movimento da Lua descoberta por Ptolomeu, a evecção³¹¹. Como a variação de Tycho, a evecção é claramente um fenômeno sinódico, isto é, ela depende da posição relativa do Sol. Se a explicação desenvolvida para a variação de Tycho for correta, ela deve ser capaz de explicar também a variação ptolomaica, um problema correlato.

³⁰⁸ Cf. *Astronomia nova*, p. 253; KEPLER, 1992-b, p. 402.

³⁰⁹ *Vides igitur speculationes hasce Physicas ita comparatas esse, ut etiam Lunae phaenomenis sufficere possint; neque incitari Lunam a Sole primario, ut terram circumveniat, sed a virtute aliqua in terra ipsa delitescente, indeque speciem sui immateriatam ad lunae corpus ejaculante, fortiore tamen in linea quae centra Solis (primarii fontis) et terrae connectit. Astronomia nova*, p. 254; KEPLER, 1992-b, p. 402.

³¹⁰ *Quomodo vero diameter ista virtuosior evadat, difficile est explicare clarius. Astronomia nova*, p. 254; KEPLER, 1992-b, p. 402.

³¹¹ O termo evecção (*evectio*) foi cunhado no séc. XVII pelo astrônomo francês I. Boulliau. Ptolomeu denominava essa variação ‘balanceamento do epiciclo’, Tycho Brahe mudança da excentricidade ou variação lunar. Cf. MOURÃO, 1995, p.290. Kepler se refere a ela no capítulo 37 da *Astronomia nova* como variação ou anomalia mensal (*inaequalitas menstrua; anomalia menstrua*).

A eveção é uma mudança periódica observada na variação epicíclica, esta última representada pelo epíciclo da Lua na astronomia antiga. Observa-se que quando a linha das apsides da Lua tem a mesma direção que a linha que liga a Terra ao Sol, a variação epicíclica é maior do que quando as apsides estão em quadratura pelo Sol.³¹²

A explicação para o fenômeno parte novamente da suposição física de que a força pela qual a Terra move a Lua é mais forte nas conjunções e oposições com o Sol C, O do que nas quadraturas F, L. Desse modo, a velocidade da Lua no apogeu de sua órbita depende da posição relativa entre o apogeu e o ‘diâmetro de força’ que liga o Sol aos pontos C, O. Se a linha das apsides estiver alinhada com o diâmetro de força, a diminuição de velocidade relativa ao apogeu atuará sobre a máxima velocidade da Lua em seu percurso, e a diminuição resultante será maior do que se o apogeu estivesse situado sobre os pontos intermediários F, L, pois neste caso a atenuação relativa ao apogeu não agiria sobre o acréscimo de velocidade resultante da passagem da Lua sobre o diâmetro de força. Daí decorre que as equações (correções na variação epicíclica) em F, L resultantes de um movimento iniciado próximo a um apogeu em C, O, serão maiores do que as equações em C, O computadas a partir de um apogeu em F, L.³¹³

A explicação é sucinta e obscura.³¹⁴ Kepler não explica mais detalhadamente como as diferentes reduções de velocidade correspondentes às possíveis posições do apogeu da Lua com relação ao Sol implicam nos diferentes valores das variações medidas nas quadraturas. Em todo caso, a explicação é qualitativamente compatível com as observações, e o sucesso na explicação de duas variações, descobertas em épocas diferentes por astrônomos diferentes, a partir de uma mesma suposição física indica que

³¹² A eveção é explicada pela forma elíptica da órbita lunar na formulação final de Kepler, encontrada nos livros 4 e 6 da *Epitome astronomiae copernicanae*. A pequena discussão sobre a Lua que ocupa o capítulo 37 da *Astronomia nova* apresenta diferenças importantes com respeito à explicação definitiva. Em particular, como a variação e a eveção dependem da posição relativa do Sol mas não do movimento rotacional da força motriz solar, Kepler vai acabar por atribuí-las a uma ação da luz.

³¹³ Cf. *Astronomia nova*, p. 253; KEPLER, 1992-b, p. 402.

³¹⁴ Sobre essas variações sinódicas do movimento da Lua Kepler escreveria na *Epitome* que ‘nenhuma parte da física celeste é mais difícil de se explicar’. Cf. STEPHENSON, 1997, p. 178.

essa suposição deve ser próxima da verdade. Kepler demonstra, através da análise dessas duas variações da Lua, a maneira como devem ser construídas as hipóteses físicas.

Uma última confirmação é oferecida pelo fato de que a Lua se move sobre a eclíptica, e não sobre o equador celeste como seria de se esperar. Se a força magnética terrestre operasse exatamente da mesma maneira como opera a força motriz solar, a Lua se moveria sobre o equador celeste, assim como todos os planetas se movem aproximadamente sobre o plano da eclíptica, que cruza a esfera das estrelas fixas no círculo das constelações zodiacais e corta o corpo do Sol no círculo do equador solar.³¹⁵ Mas não é isso que se observa. A Lua, como o Sol, se move através das constelações zodiacais³¹⁶, isto é, ao longo do círculo percorrido pela Terra em seu movimento anual, e não sobre o equador determinada pela rotação diária da Terra, como seria de se esperar. Isso significa que, embora a Terra cause o movimento da Lua através da rotação diária de sua força magnética, rotação esta resultante da rotação diária da Terra no sentido Oeste-Leste, ela o faz através de uma força que lhe é transmitida pelo Sol e que mantém na forma de sua operação uma relação com o Sol – mesmo que a experiência tenha demonstrado que a ação dessa força sobre a Lua deva necessariamente ser mediada pela Terra.

Assim como ocorrera no exemplo precedente do ponto equante, o exame das causas físicas das variações observadas no movimento da Lua é posterior à descrição geométrica do fenômeno. O primeiro passo é o isolamento da variação em questão com relação às demais variações que compõem o movimento da Lua. Em seguida, é preciso construir uma representação geométrica precisa da variação. A Lua viaja com maior velocidade nas sizígias, quando os três corpos, Sol, Lua e Terra encontram-se alinhados. A primeira explicação proposta é baseada em dois princípios físicos obtidos precedentemente: o fato de que do Sol emana uma força motriz e a circunvolução dessa força motriz em torno do Sol, movimento de uma entidade imaterial análoga à luz através do qual o movimento do

³¹⁵ A ação da força solar sobre os planetas é discutida no quarto capítulo deste trabalho.

³¹⁶ Stephenson observa que as luas de outros planetas de fato tendem a se mover sobre seus equadores. Cf. STEPHENSON, 1987, p. 177.

Sol em torno de seu eixo é transmitido aos planetas. Essa explicação prevê uma variação diferente daquela observada, e Kepler formula um segundo mecanismo, substituindo a circunvolução da força motriz por um outro princípio físico obtido anteriormente, a atenuação linear da força solar com o aumento da distância ao Sol. A segunda explicação também não reproduz a variação observada.

Kepler então agrupa os dois fracassos em um mesmo conjunto de hipóteses físicas, aquelas baseadas na interação imediata entre o Sol e a Lua. A explicação da variação descoberta por Tycho deve necessariamente incluir algum tipo de ação solar, já que a representação geométrica do fenômeno depende da posição relativa entre a Lua e o Sol. Entretanto, a análise do fenômeno à luz das duas primeiras explicações mostra que o Sol não é diretamente responsável pela variação, ou as observações revelariam velocidades diferentes das que de fato revelam.

Kepler formula uma nova possibilidade, a de que o Sol transmita à Terra a força pela qual ela move a Lua, supondo que essa força encontra-se fortalecida ao longo da direção que liga a Terra ao Sol. Essa possibilidade é mais adequada à geometria do problema, visto que a variação depende das posições relativas entre a Lua, a Terra e o Sol ou, mais precisamente, entre a Lua e a reta que liga a Terra ao Sol. Essa possibilidade, sugerida unicamente pela construção geométrica derivada das observações, deveria ser desenvolvida do ponto de vista físico, mas Kepler reconhece que não sabe explicar como a força se torna mais forte nessa direção. Entretanto, como a explicação é a única compatível com a geometria do problema ele segue adiante, e procura demonstrar a sua veracidade através do confronto com um segundo fenômeno, procurando construir a partir dela uma explicação física para a evecção, descoberta por Ptolomeu.

6.3 Por que motivo e até que ponto pode uma falsa hipótese produzir a verdade?³¹⁷

A utilização de hipóteses físicas no desenvolvimento de uma astronomia explicativa é um dos aspectos metodológicos mais importantes da *Astronomia nova*. No próximo capítulo, a operatividade e o processo de formulação de hipóteses físicas serão discutidos mais detalhadamente, com a análise da forma elíptica da órbita de Marte. Entretanto, antes de passarmos a este tema, uma última questão deve ser discutida. Como explicar o sucesso da hipótese vicária no cálculo das longitudes, se as latitudes mostram que essa hipótese geométrica não corresponde ao percurso descrito por Marte em torno do Sol?

A explicação depende da distinção entre hipóteses geométricas e astronômicas. Uma determinada hipótese astronômica, verdadeira, pode ser expressa por diversas hipóteses geométricas, que não o são necessariamente. Caso uma determinada hipótese geométrica seja falsa mas ainda assim expresse a hipótese astronômica em questão, sua falsidade poderá ser revelada pela análise do problema do ponto de vista da física celeste ou pela aplicação a outros problemas correlatos. Este último é o caso da hipótese vicária, que quando aplicada à determinação das latitudes revela-se falsa. Na discussão que ocupa o capítulo 21 da *Astronomia nova*, Kepler mostra como as hipóteses geométricas são construídas a partir de um número limitado de observações, e posteriormente refinadas através da consideração sucessiva de outros pontos, até que seja atingido o limite da precisão experimental.

Consideremos o movimento de Marte em torno do Sol, e adotemos inicialmente como hipótese astronômica o fato de que a linha das apsides MP divide o percurso do planeta em duas regiões simétricas, percorridas em tempos iguais. O ponto A representa o Sol, o centro do mundo. Qualquer círculo construído em torno do Sol satisfaz a condição imposta por esta hipótese astronômica, desde que ele seja dividido em duas partes iguais pela linha MP e percorrido pelo planeta com uma velocidade uniforme medida a partir de

³¹⁷ Este é o título do vigésimo primeiro capítulo, com o qual Kepler fecha a segunda parte da *Astronomia nova*: *Causa, cvr falsa hypothesis verum prodat et quatenus? Astronomia nova*, p. 183-187; KEPLER, 1992-b, p. 294-301.

algum ponto dessa linha. Assim, um movimento sobre o círculo OVPX, uniforme com relação ao Sol, o ponto A, é uma hipótese geométrica adequada.

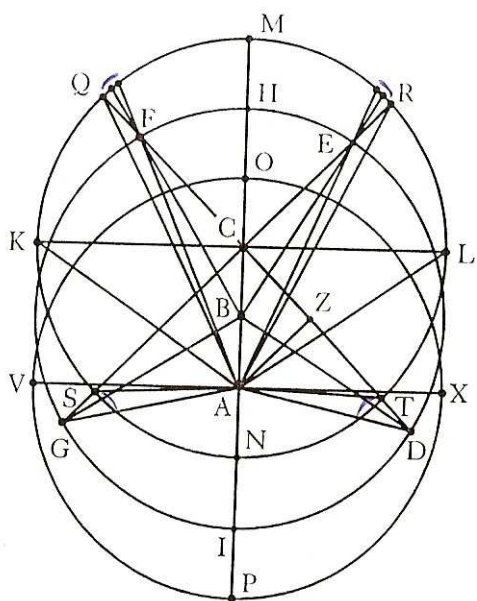


Figura 6.3 Uma mesma hipótese astronômica pode receber diferentes representações geométricas. *Apud.* KEPLER, 1992-b, p. 295.

Entretanto, se o movimento do planeta for considerado com relação a outros pontos da órbita, a hipótese astronômica acima se revela demasiado simples. Próximo às quadraturas, o planeta apresenta desvios consideráveis com relação à predição fornecida pelo círculo OVPX do parágrafo acima. Ao contrário do que seria de se esperar o planeta não é observado sobre as linhas AV, AX, mas sobre as linhas AK AL. A diferença resulta da velocidade variável do planeta em sua órbita, máxima próximo ao periélio e mínima próximo ao afélio, que acarreta o atraso com relação a V e um adiantamento com relação a X. O erro é máximo nas quadraturas, e se anula sobre as apsides. No caso de Marte, o erro nas quadraturas é de cerca de 10^0 .³¹⁸ Mais uma vez podem ser construídas inúmeras hipóteses geométricas capazes de representar este novo fato experimental, entre elas o círculo equante MKNL, que percorrido com velocidade uniforme em torno do centro C

³¹⁸ Cf. *Astronomia nova*, p. 184; KEPLER, 1992-b, p. 296.

determina os intervalos percorridos pelo planeta em tempos iguais. Em qualquer caso, a nova hipótese geométrica deve explicar o fenômeno observado nas quadraturas e ao mesmo tempo incorporar a hipótese anterior, mantendo a situação da linha das apsides. Pode ser no entanto que essa nova hipótese também não corresponda à realidade, como revela a sua aplicação aos octantes, que produz um erro, ainda que este seja significativamente menor, da ordem de 9' para Marte.³¹⁹

Uma nova hipótese astronômica menos geral deve ser construída de maneira a reproduzir a situação nos octantes. Esta nova hipótese astronômica novamente pode ser reproduzida geometricamente de diferentes maneiras. Em particular, pode-se abrir mão da circularidade do percurso ou da manutenção do equante sobre um ponto fixo. Novamente, a nova hipótese astronômica incorpora as hipóteses astronômicas anteriores, mais gerais, e o erro, se ainda existir algum, será da ordem de segundos de grau, pequeno demais para ser detectado nas observações. A conclusão de Kepler é que o sucesso das hipóteses falsas se deve a aspectos mais gerais que são compartilhados por essas hipóteses e pelas hipóteses verdadeiras:

Assim, agora fica patente até que ponto e de que maneira a verdade pode seguir de princípios falsos: seguramente o que quer que seja falso nestas [hipóteses] é peculiar a elas e pode encontrar-se ausente, enquanto o que produz necessariamente a verdade é em geral verdadeiro em todos os aspectos, e nada mais.³²⁰

O sucesso da hipótese vicária na determinação das longitudes deriva portanto do fato de que essa hipótese representa aspectos gerais do movimento do planeta que são reais. As particularidades da hipótese que por fim serão demonstradas falsas não entram em jogo na demonstração, ou seria impossível obter as longitudes corretas. No cálculo das latitudes a distância ao Sol se torna um parâmetro relevante, e como este parâmetro é

³¹⁹ Cf. *Astronomia nova*, p. 185; KEPLER, 1992-b, p. 297.

³²⁰ *Ita vel jam patet, quatenus et quomodo verum sequatur ex falsis principiis: nempe id, quod in hisce falsum, speciale est et abesse potest; quod vero necessitatem affert veritati, sub generali ratione verum omnino et ipsum est. Astronomia nova*, p. 186; KEPLER, 1992-b, p. 298.

falsamente descrito pela hipótese vicária, que supõe uma órbita circular, os resultados obtidos não concordam com a experiência.

Capítulo 7 – A elipse e o método

O método astronômico de Kepler tem a sua exposição mais completa na quarta parte da *Astronomia nova*, onde o astrônomo apresenta uma reconstrução do processo de descoberta que o levou ao estabelecimento da forma elíptica da órbita de Marte.³²¹ Um exame detalhado desse processo revela que, também aqui, a combinação de hipóteses físicas com uma análise matemática detalhada dos dados empíricos coletados por Tycho Brahe e seus assistentes conduz o astrônomo à descoberta da real estrutura do mundo criado.

7.1 Da impossibilidade física de um movimento planetário circular e excêntrico

A quarta parte da *Astronomia nova* é precedida por uma discussão acerca das dificuldades envolvidas na interpretação física da excentricidade de uma órbita planetária circular. Essa discussão preliminar, que tem o propósito de preparar o leitor para a ruptura com a circularidade dos movimentos celestes, divide-se em duas etapas. Em um primeiro estágio, Kepler propõe no capítulo 38 uma explicação física para a excentricidade das órbitas circulares. A seguir, no capítulo 39 ele fecha a terceira parte do livro com a análise, em vista da teoria física do capítulo precedente, de diferentes hipóteses capazes de representar uma órbita circular e excêntrica. A conclusão é que a explicação física de uma órbita circular e excêntrica é necessariamente problemática, qualquer que seja a representação adotada.

³²¹ É evidente que Kepler retraça, em linhas gerais, as etapas que o levaram a romper com a circularidade dos movimentos celestes e a estabelecer as suas duas primeiras leis. No entanto é preciso ter em mente que, como mostrou William Donahue, a *Astronomia nova* não é uma simples reprodução dos cadernos de pesquisa de Kepler, mas uma exposição mais elaborada do processo de descoberta. Cf. DONAHUE, 1988. Como foi explicado no terceiro capítulo deste trabalho, acreditamos que o principal objetivo da narrativa em que consiste a *Astronomia nova* é a exposição do método de pesquisa que Kepler considera adequado para o progresso da astronomia. Construiremos a nossa argumentação de maneira a salientar os principais elementos deste método. Outros estudos sobre a descoberta das duas primeiras leis de Kepler na *Astronomia nova* estão disponíveis em TOSSATO, 1997; DONAHUE, 1996; STEPHENSON, 1987 e WILSON, 1958.

A refutação definitiva da forma circular da órbita de Marte será fornecida pela experiência, alguns capítulos mais adiante. Entretanto, a discussão em termos físicos que ocupa os dois capítulos finais da terceira parte já demonstra que os critérios de adequação teórica operantes na nova astronomia física são bem diferentes dos preceitos que tradicionalmente orientaram os geômetras na construção de modelos capazes de reproduzir os movimentos aparentes dos astros. Mais uma vez, a distinção entre hipóteses geométricas e hipóteses astronômicas, exposta na *Defesa de Tycho*, se revela fundamental para a construção do argumento de Kepler.

A astronomia física tem como objetivo a descoberta de hipóteses astronômicas verdadeiras, correspondentes aos movimentos reais dos astros no céu. A partir das hipóteses astronômicas podem ser derivadas as diferentes hipóteses geométricas capazes de representar os fenômenos observados. Uma hipótese propriamente astronômica deve, além de corresponder às observações e possibilitar a predição de fenômenos futuros, ser passível de receber uma interpretação física, como vimos nos capítulos precedentes. Na discussão de que trataremos agora, Kepler demonstra que o círculo excêntrico não constitui uma hipótese astronômica adequada para representar a primeira variação do movimento de Marte, visto que a excentricidade do percurso não pode ser causada por nenhum mecanismo físico que se possa conceber. Acompanhemos mais de perto o argumento de Kepler.

Na nova astronomia física, a força motriz solar é a causa eficiente dos movimentos translacionais dos planetas.³²² Além de explicar o fato de que os planetas descrevem circuitos em torno do Sol, a força motriz explica outros aspectos observacionais dos movimentos planetários, tais como os períodos mais longos dos planetas mais externos e o aumento na velocidade de um planeta conforme ele se aproxima do Sol em sua órbita excêntrica. As variações de velocidade dos planetas são explicadas através da variação de intensidade da força motriz solar. Essa força motriz se torna mais rarefeita conforme aumenta a distância ao Sol, e daí segue que um planeta, em sua órbita excêntrica, é mais

³²² A natureza da força motriz solar é discutida no quarto capítulo deste trabalho.

veloz quando próximo ao periélio do que quando próximo ao afélio.³²³ No entanto, a excentricidade da órbita não pode ser explicada pela força motriz solar, que é simples e causa um movimento igualmente simples e circular, concêntrico com o Sol. Se apenas a força solar agisse sobre o planeta, ele descreveria um percurso circular e concêntrico, com velocidade constante. Uma nova relação causal, que explique porque o centro do percurso planetário não coincide com o centro do Sol, deve portanto ser encontrada.

A natureza dessa relação causal vai ser buscada na analogia com outros fenômenos, observados no mundo terrestre. O primeiro exemplo invocado é o da água que se dirige ao centro da Terra sob a ação da gravidade. Por si mesma, a água tende simplesmente a se dirigir ao centro do mundo segundo uma linha reta. As corredeiras, cascatas, redemoinhos e outros fenômenos observados nos cursos d'água decorrem de causas accidentais e extrínsecas à água.³²⁴ Do mesmo modo, o movimento comunicado aos planetas pela força solar é simples e circular. A excentricidade das órbitas depende de uma causa extrínseca, que deve ser investigada.³²⁵

Outro exemplo é o dos barqueiros que, servindo-se da correnteza dos rios, logram atravessá-los de uma margem à outra. Esses barqueiros utilizam uma polia, ligada a um cabo amarrado às duas margens do rio, para restringir o movimento do barco à direção que liga uma margem à outra, perpendicular à correnteza.³²⁶ Através de um posicionamento adequado dos remos, é possível atravessar o rio sem tocar o fundo. Do ponto de vista geométrico, Kepler interpreta a excentricidade do percurso circular como o resultado de um movimento oscilatório de aproximação e afastamento do planeta com relação ao Sol. Este exemplo mais adiante será reformulado para explicar a forma elíptica das órbitas. Assim como a força do rio é aproveitada pelo arranjo desenvolvido pelo barqueiro para provocar um movimento perpendicular à correnteza, os planetas devem

³²³ A variação de velocidade de um planeta ao longo de sua órbita circular excêntrica é tradicionalmente representada pelo equante ptolomaico. Kepler inicialmente adota o equante e o interpreta em termos da força motriz solar, como vimos no capítulo precedente.

³²⁴ Cf. *Astronomia nova*, p. 255; KEPLER, 1992-b, p. 405.

³²⁵ Cf. *Astronomia nova*, p. 256; KEPLER, 1992-b, p. 406.

³²⁶ Cf. *Astronomia nova*, p. 255; KEPLER, 1992-b, p. 405.

ser dotados de alguma potência responsável pelas sucessivas aproximações e afastamentos com relação ao Sol, ou seja, pela excentricidade das órbitas.

Essa potência intrínseca planetária (*virtutes insitae*) não é no entanto capaz de mover o planeta sem o auxílio da força motriz solar – da mesma maneira como o barqueiro não consegue atravessar o rio a menos que haja correnteza. Com efeito, o planeta é uma esfera simples, e não possui membros próprios para a locomoção que o permitam entrar em movimento por si próprio no espaço celeste.³²⁷ A potência intrínseca age como o remo, redirecionando parte do movimento imposto pela força circular solar e provocando uma pequena oscilação do planeta no sentido radial, aproximando-se e afastando-se do Sol. Esse movimento oscilatório ou de libração tem um período igual ao tempo em que o planeta completa o seu percurso circular, de maneira que o resultado da composição dos dois movimentos é um círculo excêntrico, onde o afélio e o periélio correspondem aos pontos de máximo e mínimo afastamento.

No capítulo 39 da *Astronomia nova* Kepler empreende uma análise mais aprofundada do movimento de afastamento e aproximação do planeta com relação ao Sol. Este movimento oscilatório se dá na direção radial que liga o planeta ao Sol, e tem um período igual ao período de revolução do planeta em torno do Sol. Kepler denomina esse movimento de libração. Ele tem sua origem no acordo recíproco entre o Sol e o movimento do planeta (*in consensum mutuum corpori Solis et Planetae*)³²⁸. O planeta não pode mover-se por si só, e o corpo solar, esférico e simples, não pode causar sozinho um movimento que é ora de aproximação, ora de afastamento. O movimento de libração será mantido nos capítulos seguintes, para explicar a forma oval (e finalmente elíptica) da órbita de Marte. Kepler, como veremos, se reportará freqüentemente a este capítulo 39, onde são lançados os fundamentos de sua explicação física para a forma elíptica da órbita de Marte.

³²⁷ Cf. *Astronomia nova*, p. 237; KEPLER, 1992-b, p. 377.

³²⁸ *Astronomia nova*, p. 262; KEPLER, 1992-b, p. 416.

O capítulo começa com a exposição de seis axiomas físicos, apresentados na seguinte ordem: 1. o corpo de um planeta é naturalmente inclinado a permanecer em repouso em qualquer lugar onde ele seja colocado sozinho³²⁹; 2. ele é transportado de um lugar para outro, segundo a longitude do zodíaco, por aquela potência originada no Sol; 3. se a distância do planeta ao Sol não fosse alterada, o resultado desse transporte seria um caminho circular; 4. os tempos periódicos um mesmo planeta que sucessivamente permaneça durante uma volta completa a duas distâncias do Sol resultam em dupla proporção com as distâncias ou amplitudes dos círculos³³⁰; 5. simples e isolada, a potência que se encontra no corpo deste mesmo planeta não é suficiente para transportá-lo de um lugar a outro, visto que este carece de pés, asas e penas, com os quais poderia apoiar-se no ar etéreo; 6. e contudo, o afastamento e aproximação do planeta com relação ao Sol provém desta potência que é própria do planeta.³³¹

Estes axiomas resumem as hipóteses físicas admitidas na análise do movimento circular excêntrico. Ainda que enunciadas em termos gerais, essas considerações físicas evidenciam os parâmetros geométricos relevantes do problema e isolam duas componentes no movimento excêntrico do planeta. Do Sol provém a força motriz responsável pela componente circular, à qual se soma uma componente retilínea que responde pelo deslocamento do centro do percurso planetário com relação ao Sol, isto é

³²⁹ Como vimos no terceiro capítulo deste trabalho, Kepler interpreta a gravidade como uma atração recíproca entre corpos de mesma natureza, daí a especificação quanto à situação de isolamento do planeta, necessária para que ele permaneça indefinidamente em repouso.

³³⁰ Com o claro objetivo de evitar complicações matemáticas nessa exposição sumária do efeito da força solar sobre a velocidade de um planeta, Kepler propõe aqui uma situação hipotética. Ele considera que o planeta descreva sucessivamente duas órbitas circulares concêntricas de raios diferentes. O tempo periódico correspondente a cada uma delas depende do quadrado da distância ao Sol, ou seja, do quadrado do raio do círculo. Isso significa que a velocidade translacional de um planeta qualquer decresce linearmente com a sua distância ao Sol, uma vez que o comprimento de um percurso circular é dado pela expressão $2\pi r$, onde r é o raio do círculo.

³³¹ *Primum, quod Planetarum corpus natura inclinatam sit ad quietem in omni loco, in quo solitarium ponitur. Secundo, quod ea virtute, quae ex Sole, de loco in locum, secundum longitudinem zodiaci, transponatur. Tertio, si non mutaretur distantia Planetarum a Sole, futurum ex hac transpositione iter circulare. Quarto, ejusdem Planetarum in duabus per vices distantibus a Sole toto ambitu permanentis, tempora periodica futura in dupla proportionem distantiarum sive circulorum amplitudinibus. Quinto, virtutem nudam et solitariam in ipso Planetarum corpore residentem, non esse sufficientem transportando de loco in locum suo corpori, quod pedibus alis et pinnis caret, quibus in aura aetherea nitatur. Sexto, et tamen accessus Planetarum ad Solem et ab eo recessus oriri ex virtute, quae est propria Planetarum. Astronomia nova, p. 256; KEPLER, 1992-b, p. 407.*

por sua excentricidade. A componente retilínea do movimento do planeta deve ser explicada por algum mecanismo onde entrem em jogo a força motriz solar e alguma potência intrínseca ao planeta. Kepler demonstra a impossibilidade física de um tal mecanismo, e conseqüentemente de uma órbita excêntrica e circular.

A análise física da excentricidade da órbita começa pela consideração de dois modelos geométricos equivalentes segundo o teorema de Apolônio (vide glossário), um círculo excêntrico e um círculo concêntrico associado a um epiciclo. Reproduzimos aqui as duas figuras da maneira como elas aparecem na *Astronomia nova*, advertindo o leitor de que na figura 7.1 (a) o epiciclo de centro N desloca-se sobre um círculo concêntrico com o Sol A, que Kepler omite. A figura 7.1 (b) representa as distâncias ao Sol de acordo com o modelo epicíclico: $\gamma\alpha = CA$, $\delta\alpha = DA$, etc.

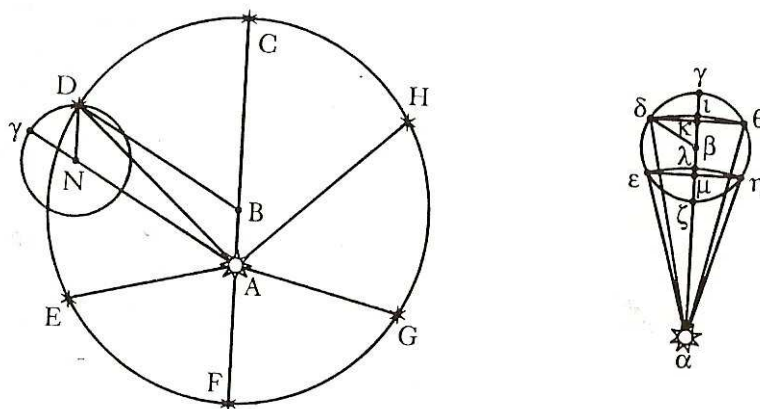


Figura 7.1 (a) O movimento excêntrico do planeta D em torno do Sol em A pode ser representado por duas hipóteses geométricas equivalentes: o círculo excêntrico de centro B e o círculo concêntrico (omitido na figura) associado ao epiciclo de centro N. (b) As distâncias do planeta ao Sol, de acordo com o modelo epicíclico ao lado, são dadas por $\gamma\alpha$, $\delta\alpha$, $\epsilon\alpha$, $\zeta\alpha$, $\eta\alpha$, $\theta\alpha$, $\gamma\alpha$. Novamente o círculo concêntrico, sobre o qual se move o centro β do epiciclo, é omitido por Kepler. *Apud*. KEPLER, 1992-a, p. 408.

Kepler começa a análise física pelo epiciclo. De acordo com o teorema de Apolônio, a velocidade angular do centro β do epiciclo neste esquema deve ter o sentido oposto e ser igual em módulo à velocidade angular do planeta no círculo excêntrico equivalente. Mas

a velocidade do planeta no excêntrico não é constante. Ela varia de acordo com a distância do planeta ao Sol, de modo que o trecho FG é percorrido em um tempo menor do que o trecho HC. Porém, no sistema de epiciclo e deferente o centro do epiciclo permanece a uma distância constante do Sol, igual a $\beta\alpha$, e a sua variação de velocidade é absurda do ponto de vista da física celeste kepleriana. Se não há variação de distância, a variação de velocidade implica em uma velocidade de rotação não-uniforme para a força motriz, o que entra em contradição com a simplicidade da força solar expressa no terceiro axioma. Ainda de acordo com o teorema de Apolônio, o planeta sobre o epiciclo deve se mover com uma velocidade angular igual àquela do centro do epiciclo sobre o círculo concêntrico. Deste modo, o planeta neste modelo se move em torno de β , um ponto vazio, com velocidade variável, ao mesmo tempo em que esse ponto vazio se desloca em torno do Sol com velocidade igualmente variável, embora permaneça a uma distância constante da fonte da força motriz.³³² Kepler conclui que o sistema de epiciclo e deferente dificilmente pode se empregado para explicar as órbitas circulares e excêntricas dos planetas se ele for considerado do ponto de vista da física:

Por meio deste procedimento certamente nos aproximaremos das suposições geométricas dos antigos. Porém, nos desviaremos muitíssimo das investigações físicas, como é mostrado no capítulo 2. Nem são suficientes as minhas reflexões a respeito desta técnica para desvendar como isso pode suceder naturalmente.³³³

O círculo excêntrico também é examinado do ponto de vista físico, e também apresenta problemas. O movimento em um círculo excêntrico pressupõe a identificação do centro desse círculo por parte do planeta, já que um círculo é definido pelo seu raio constante, isto é, pela igualdade das distâncias de cada um de seus pontos ao centro. Mas o centro é um ponto vazio de corpo e não há como conceber que o planeta possa perceber este ponto

³³² Cf. *Astronomia nova*, p. 257-258; KEPLER, 1992-b, p. 409-410.

Esse tipo de argumento já havia sido invocado por Kepler na primeira parte da *Astronomia nova*, como discutimos no quinto capítulo do presente trabalho.

³³³ *Quo pacto Geometricis quidem Veterum suppositionibus propiores fitemus, sed a Physicis speculationibus aberraremus quam longissime, ut ostensum cap. II. Neque sufficiunt cogitationes meae ad eruendum modum, quo ista contingere possent naturaliter. Astronomia nova*, p. 258; KEPLER, 1992-b, p. 410.

vazio, quaisquer que sejam as faculdades de que ele disponha para executar esta tarefa. Kepler considera que mesmo que o planeta reconheça o Sol e conheça a excentricidade (concedendo portanto que ele possua uma mente dotada de memória), ainda assim, ele precisa perceber o centro vazio do excêntrico para orientar a sua trajetória no espaço:

Não nego que um centro possa ser concebido e, em torno dele, um círculo. Mas eu digo isto, que se o centro consiste em puro pensamento, e em nenhum tempo, nenhum sinal externo, então não é possível ordenar ao seu redor, na realidade, o caminho perfeitamente circular de um corpo móvel.³³⁴

A excentricidade de uma órbita circular é problemática porque ela é definida pela distância entre o Sol e um ponto vazio, desprovido de qualquer significado físico ou geométrico. A localização desse ponto sobre a linha das apsides é um elemento arbitrário que impossibilita a determinação da órbita a partir dos corpos envolvidos. O movimento circular e excêntrico, como o sistema de concêntrico e epiciclo, não satisfaz as exigências da nova física celeste e portanto não pode ser adotado como hipótese astronômica.

Kepler considera uma terceira alternativa. Pode ser que, como sugere a análise física do capítulo 38, a órbita excêntrica resulte da composição de dois movimentos, o movimento circular imposto pelo Sol e a oscilação ou libração do planeta ao longo da linha que o liga ao centro do mundo. Pode ser que essas duas componentes se prestem à construção de uma explicação física, e possam ser adotadas como hipóteses astronômicas. É certo que o movimento circular imposto pelo Sol constitui uma hipótese astronômica adequada. Para que o movimento de libração também o seja, para que ele possa de fato ocorrer no céu, a possibilidade física deste movimento deve ser comprovada. Kepler indaga se é possível que o planeta regule de alguma maneira a sua aproximação e afastamento com relação ao Sol. A distância com relação ao Sol não varia uniformemente com a distância atravessada na órbita circular, nem com o tempo de percurso, nem com o ângulo percorrido. Além

³³⁴ *Non nego, cogitari posse centrum, et circa id, circum. Sed hoc dico, si centrum cogitatione sola consistat, nullo tempore, nullo signo externo; non posse circa id ordinari realiter corporis alicujus mobilis iter perfecte circulare. Astronomia nova*, p. 258; KEPLER, 1992-b, p. 410.

disso, nenhuma consideração física estabelece a correlação entre alguma destas grandezas e a distância do planeta ao Sol.³³⁵

A única possibilidade restante é que o planeta seja dotado de algum tipo de mente, observe (*respicere*) diretamente a variação de diâmetro do disco solar e compreenda, a partir daí, a distância a que ele deve estar do Sol no instante seguinte. O Sol é o único ponto de referência possível, já que o espaço sem orbes sólidos onde o planeta se move é homogêneo. Assim, a hipótese astronômica do movimento de libração em uma órbita circular depende da possibilidade de que o planeta possa de alguma maneira perceber o diâmetro do círculo solar.³³⁶

Kepler a princípio admite a possibilidade de que o planeta perceba a variação de distância do Sol. Entretanto, ainda resta um problema. A relação entre o diâmetro do Sol e a posição do planeta na órbita circular se revela demasiado complicada, e exigiria mais raciocínio da parte do planeta do que Kepler considera razoável.³³⁷ Desse modo, ele conclui que do ponto de vista físico é difícil explicar o mecanismo por trás de uma órbita excêntrica e circular, ainda que se decomponha o movimento excêntrico em dois movimentos mais simples:

Percebes, leitor atento e arguto, que a opinião de um círculo excêntrico perfeito para o trajeto do planeta cerca as investigações físicas de muitas coisas inimagináveis. Seguramente, não porque ela estabelece o diâmetro do Sol como um indicador para a mente do planeta, opinião que talvez cumpra ser a mais próxima da verdade, mas

³³⁵ Cf. *Astronomia nova*, p. 259; KEPLER, 1992-b, p. 412.

³³⁶ É certo que os planetas não são dotados de um aparato sensorial semelhante à visão humana. Kepler imagina que a percepção se dê por meio de algum sentido ainda desconhecido, e que talvez um dia venha a ser revelado por uma observação mais cuidadosa da natureza. É possível que essa percepção se dê por um mecanismo semelhante àquele que é responsável pelas influências astrológicas. Afinal, argumenta Kepler, não é com os olhos que alguém percebe a configuração dos astros no instante do seu nascimento, e no entanto essa configuração de alguma maneira vai atingir a alma do sujeito e ficar ali registrada. Este é apenas um exemplo da interação entre as teses astrológicas e astronômicas de Kepler. Sobre a importância científica da obra astrológica de Kepler ver SIMON, 1979.

³³⁷ Para que a órbita circular e excêntrica seja produzida, incrementos iguais no diâmetro aparente do Sol devem corresponder a deslocamentos diferentes no movimento de libração. Cf. *Astronomia nova*, p. 262; KEPLER, 1992-b, p. 415.

porque acarreta em coisas incríveis tanto do ponto de vista da mente como da alma motriz.³³⁸

Essa análise puramente teórica não depende dos dados de Tycho. Ainda que se conceda que os corpos celestes são providos de mentes, na nova física celeste a órbita de um planeta deve ser geometricamente estruturada de tal maneira que sua forma seja determinada unicamente a partir dos corpos envolvidos no problema, no caso Marte e o Sol. O centro do excêntrico não tem significado físico, e este ponto é fundamental para a definição de uma órbita circular excêntrica, qualquer que seja a hipótese geométrica adotada e quaisquer que sejam os mecanismos físicos aceitos. Em outras palavras, o excêntrico, o concêntrico associado a um epiciclo ou a associação de um movimento circular a um movimento oscilatório não são hipóteses propriamente astronômicas porque envolvem parâmetros que não podem ser determinados fisicamente, a saber, a distância do Sol até um ponto vazio.

7.2 A lei das áreas

O processo que levou Kepler ao resultado que conhecemos hoje como a sua segunda lei dos movimentos planetários é ainda mais complexo do que o processo de ruptura com a circularidade. Uma discussão detalhada seria demasiado extensa³³⁹, e nos limitaremos a salientar alguns aspectos importantes do ponto de vista da constituição do método astronômico de Kepler.

A lei das áreas corresponde à formulação final da relação estabelecida por Kepler entre a distância de um planeta ao Sol em cada trecho de sua órbita e tempo gasto pelo planeta

³³⁸ *Vides lector considerate et ingeniose, quod haec opinio de perfecto circulo eccentrico itineris Planetarii multa incredibilia in speculationibus Physicis involvat; non quidem quod Solis diametrum menti Planetariae pro signo ponit: faciet enim id forsitan ipsa etiam verissima sententia; sed quod incredibilia transcribat et menti et animae motrici.* K.G.W III, p. 262; KEPLER, 1992-b, p. 416.

³³⁹ A gênese e o significado da segunda lei de Kepler são discutidos em detalhe por DONAHUE, 1994; STEPHENSON, 1987, p. 80-87; WILSON, 1975 e AITON, 1969.

para percorrer o trecho correspondente.³⁴⁰ A sua primeira formulação aparece quando Kepler ataca o problema da determinação do percurso exato percorrido pela Terra em torno do Sol, etapa preliminar à determinação da órbita de Marte que ocupa a terceira parte da *Astronomia nova*. A fundação de uma astronomia física e realista depende com efeito da determinação do movimento exato descrito pelo observador – no caso a Terra, que deve ser subtraído dos movimentos aparentes dos corpos celestes para que os seus movimentos reais possam vir a ser encontrados.

A lei das áreas provê uma descrição matemática da variação de velocidade de um planeta em função da distância ao Sol em uma órbita excêntrica. Essa variação de velocidade é reproduzida na astronomia de Ptolomeu pelo círculo equante³⁴¹, que a princípio Kepler considera uma hipótese geométrica adequada para representar este efeito da ação física do Sol sobre os planetas, mas que finalmente, como vimos no capítulo precedente, não é capaz de acomodar todos os aspectos do movimento de Marte. A teoria ptolomaica do movimento do Sol (correspondente no heliocentrismo a uma teoria do movimento da Terra), consiste em um excêntrico simples, sem ponto equante. A demonstração de que o movimento da Terra também apresenta uma variação de velocidade que pode ser reproduzida adequadamente por um equante do tipo ptolomaico é importante na medida em que contribui para aproximar o movimento da Terra em torno do Sol daquele descrito pelos demais planetas. Assim, podemos identificar um duplo objetivo no estudo do movimento da Terra que ocupa a terceira parte da *Astronomia nova*: de um lado a determinação do percurso percorrido pela Terra é importante para que o caminho de Marte ao redor do Sol possa ser extraído das observações, e de outro a identificação do tipo de movimento descrito pela Terra com aqueles dos demais planetas permite a construção de uma única explicação física para todos os movimentos planetários, a partir da ação do Sol.

³⁴⁰ A forma elíptica da órbita de Marte seria um dos últimos resultados obtidos por Kepler, em 1605, quando a redação da *Astronomia nova* já estava bastante avançada. Embora conheçamos a ‘lei das áreas’ como a segunda lei, ela foi estabelecida antes, para o caso de uma órbita circular, e foi posteriormente adaptada à órbita elíptica.

³⁴¹ Mais precisamente, ela é responsável por uma pequena diferença angular no percurso observado do planeta, a equação física de centro, que na astronomia ptolomaica é determinada através do equante. A interpretação de Kepler para o equante Ptolomaico é discutida no sexto capítulo do presente trabalho.

Entretanto, se os mecanismos envolvidos na movimentação da Terra em torno do Sol devem ser semelhantes àqueles envolvidos no movimento de Marte, uma nova representação geométrica da variação de velocidade do planeta em função de sua distância ao Sol deve ser encontrada, já que o equante ptolomaico não resistiu ao teste imposto pelas observações. A nova hipótese deve ser compatível com a explicação física oferecida por Kepler para a variação de velocidade, formulada em termos da diferença de concentração da força motriz solar em regiões da órbita que estão situadas a diferentes distâncias do Sol: quando o planeta está próximo ao periélio a concentração de força motriz solar é maior do que quando ele está próximo ao afélio, e daí resulta a maior velocidade do planeta quando ele está próximo ao afélio do que quando está próximo ao periélio.

Vimos que essa idéia acompanha Kepler desde o *Mistério cosmográfico*. A matematização dessa relação é no entanto muito complicada, especialmente porque Kepler não dispunha do cálculo infinitesimal como ferramenta matemática para expressar a variação contínua da velocidade em função da distância ao Sol. O autor da *Astronomia nova* percebe muito claramente as dificuldades envolvidas:

Portanto, considerando que os atrasos do planeta sobre partes iguais do excêntrico estejam um para o outro como as distâncias dessas partes, e que a distância até os pontos individuais varia por todo o semi-círculo excêntrico, não é leve a tarefa que assumi, a de descobrir como pode ser obtida a soma das distâncias individuais. Pois a não ser que encontremos a soma de todas elas - e elas são infinitas em número, não poderemos dizer de quanto é o atraso em cada um [dos trechos do círculo excêntrico]. Pelo que as equações não serão conhecidas. Pois a totalidade da soma das distâncias está para o tempo periódico assim como qualquer soma parcial está para o seu tempo [correspondente].³⁴²

³⁴² *Cum ergo sint morae Planetae in aequalibus eccentrici partibus ad invicem in ea proportionem, in qua sunt ipsae partium illarum distantiae, at puncta singula in toto semicirculo eccentrici distantiam mutant; non levem operam mihi sumpsi, ut inquirerem, quomodo singularum distantiarum summae haberi possent. Nam nisi summam omnium, quae sunt tamen infinitae, habuerimus, non poterimus dicere, quanta sit cujusque*

A relação fundamental é fornecida pela ‘lei das distâncias’: o tempo que o planeta leva para percorrer um determinado trecho de sua órbita é proporcional à distância do planeta ao Sol naquele trecho.³⁴³ A lei das distâncias é uma hipótese astronômica. Ela enuncia um fato real que pode ao mesmo tempo ser constatado nos dados observacionais e explicado fisicamente através da ação física do Sol sobre o planeta. Do ponto de vista geométrico a lei das distâncias não envolve outros elementos além das posições relativas do Sol e do planeta e da linha das apsides do planeta, que aponta na direção de alguma estrela. Não há elementos arbitrários ou desprovidos de significado físico, como o centro vazio do círculo equante ou os movimentos epicíclicos. Entretanto, a distância de cada ponto do trecho escolhido até o Sol é diferente. Isso impossibilita a determinação direta da velocidade do planeta em um determinado trecho da órbita. O cálculo é feito por uma regra de três simples, e depende do tempo periódico orbital, que é finito e pode ser conhecido, e da soma das distâncias, que são infinitas.³⁴⁴

A solução de Kepler é engenhosa e envolve idéias que influenciariam profundamente o desenvolvimento das matemáticas, em particular do cálculo diferencial e integral. Ele começa por dividir o círculo excêntrico em 360 partes, cada uma delas compreendendo um ângulo igual a 1 grau, e por calcular uma distância correspondente a cada parte. A soma das 360 distâncias é proporcional ao tempo periódico do planeta. Supondo que a distância em cada uma dessas partes permaneça constante, ela é proporcional ao atraso no arco de 1 grau correspondente, que pode assim ser obtido.

mora. quare aequatio ignorabitur. Vt enim tota summa distantiarum est ad tempus totum periodicum, sic pars summae distantiarum quotabilet ad suum tempus. Astronomia nova, p. 263; KEPLER, 1992-b, p. 417.

³⁴³ Como observa Aiton, o conceito de velocidade instantânea é estranho a Kepler, e a lei das distâncias (como a lei das áreas) é escrita em função do tempo ou atraso (*mora*) que o planeta leva para percorrer um trecho finito de sua órbita. Cf. AITON, 1969.

³⁴⁴ William Donahue nota que ao conceber a razão entre uma distância e um tempo Kepler rompe com as regras da matemática antiga. De acordo com a definição 3 do livro V dos *Elementos* de Euclides, as razões devem ser constituídas entre grandezas ‘do mesmo tipo’. A derivação de novas unidades a partir de razões entre grandezas diferentes, mais fundamentais, se tornaria corrente na física moderna. Cf. DONAHUE, 1994, p. 97.

Infelizmente, como observa Kepler esse método é mecânico e tedioso, uma vez que a cada novo cômputo todos os arcos de 1 grau deverão necessariamente ser levados em conta. É neste momento que Kepler tem a idéia que está na origem da formulação definitiva da segunda lei:

E como eu soubesse que os pontos do excêntrico são infinitos, e que são infinitas as suas distâncias, ocorreu-me que todas essas distâncias estão contidas no plano do excêntrico. Pois eu me lembrava que Arquimedes, procurando a razão entre a circunferência e o seu diâmetro, outrora dividira o círculo em infinitos triângulos.³⁴⁵

Seguindo o exemplo de Arquimedes, Kepler divide o plano circular do excêntrico em 360 seções. É fácil mostrar que os triângulos desenhados a partir do centro do círculo, B, têm sempre a mesma altura, BC, BG, BH, etc. E triângulos de mesma altura têm a área proporcional a suas bases³⁴⁶, o que significa que nessa configuração as áreas dos triângulos podem ser calculadas a partir dos arcos de círculo.

A área do setor circular mede o efeito da soma das distâncias sobre o tempo gasto pelo planeta para percorrer o arco correspondente. No entanto, se as distâncias forem tomadas a partir do Sol como exige a hipótese física da força solar, então as bases do triângulo não são iguais e a lei das áreas já não corresponde exatamente à lei das distâncias. A diferença é muito pequena no caso da órbita da Terra, mas é significativa para a órbita de Marte, mais excêntrica.

³⁴⁵ *Cumque scirem infinita esse puncta eccentrici, et distantias earum infinitas; subiit, in plano eccentrici has distantias omnes inesse. Nam memineram, sic olim et ARCHIMEDEM, cum circumferentiae proportionem ad diametrum quaereret, circulum in infinita triangula dissecuisse. Astronomia nova*, p. 264; KEPLER, 1992-b, p. 418.

³⁴⁶ Kepler admite como uma boa aproximação que o arco compreendido por um ângulo de 1 grau seja igual à corda (a base reta do triângulo). É por isso que ele divide o círculo em intervalos pequenos, de um grau, para que a curvatura do arco correspondente a cada ângulo seja suficientemente pequena para ser desprezada. A fonte dessa idéia parece estar nos trabalhos matemáticos de Nicolau de Cusa (1401 – 1464). Cf. AITON, 1975-a, p. 574 - 575.

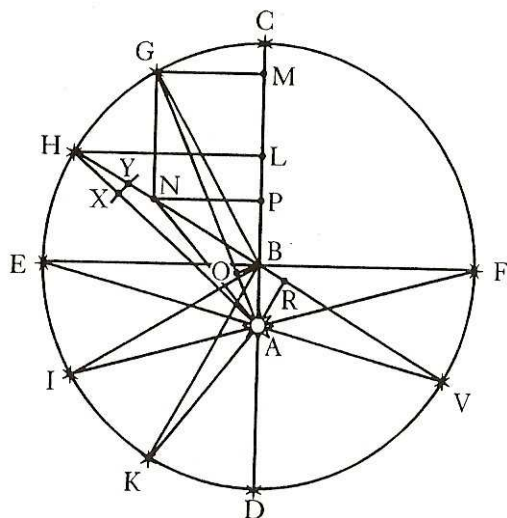


Figura 7.2 Enquanto as distâncias CB, GB, HB dos pontos sobre o círculo excêntrico até o centro do círculo são todas iguais, as distâncias ao Sol CA, GA, HA, dotadas de significado físico, exibem uma variação assimétrica que impossibilita a associação direta da lei das áreas com a lei das distâncias no caso de uma órbita circular. *Apud.* KEPLER, 1992-b, p. 419.

Para analisar o erro resultante da substituição da lei das distâncias pela lei das áreas Kepler construiu uma figura que representa as distâncias dos pontos sobre o semi-círculo CGHEIKD da figura 7.2 até o centro B e o Sol A. Enquanto as distâncias até o centro são todas iguais ao raio do círculo, as distâncias até o Sol variam. A discrepância é máxima nas apsides C e D, como pode ser visto na figura 7.3. Cada retângulo CGBB, GHBB, etc. tem a área igual à metade da área do triângulo CGB, GHB, etc. correspondente, e a área do retângulo CDBB é o dobro da área do semicírculo. No entanto, a curva conchóide³⁴⁷ AAAAAAA que delimita as distâncias até o Sol é assimétrica, e a área total por ela delimitada é maior do que a área total delimitada pela reta BBBBBBBB. Essa análise reproduz o fato de que a soma das distâncias dos pontos de um círculo até o centro é menor do que a soma das distâncias até um outro ponto qualquer, como por exemplo o ponto A, o que significa que a porção da órbita situada a uma distância maior do Sol do

³⁴⁷ Kepler esclarece que a curva que ele denomina conchóide (*conchoide*) não coincide mas apenas é parecida (*similis*) com a conchóide de Nicostrato, curva plana infinita constituída por dois ramos situados em lados opostos de uma reta assíntota. Cf. *Astronomia nova*, p. 268; KEPLER, 1992-b, p. 424, nota marginal do autor.

que o raio do círculo é maior do que a porção situada a uma distância menor, o que pode ser facilmente verificado de maneira qualitativa na figura 7.2.

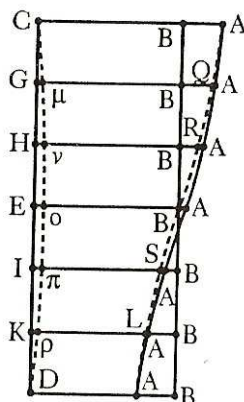


Figura 7.3 Nesta figura a curva conchóide AAAAAAA delimita as distâncias dos pontos C, G, H, E, I, K da figura 7.2 até o Sol em A, CA, GA, HA, EA, IA, KA. A reta BBBBBBB delimita as distâncias constantes dos mesmos pontos até o centro do círculo, CB, GB, HB, etc. Observe que EA é maior que EB, o que significa que a curva é assimétrica. A conchóide simétrica representada pela linha pontilhada *Apud*. KEPLER, 1992-b, p. 425.

No entanto, a curva AAAAAAA representa as distâncias ao Sol, mas não representa as áreas dos setores circulares correspondentes porque as retas AC, AG, etc. não são perpendiculares aos arcos equivalentes, e por esse motivo não correspondem às alturas dos triângulos cujas áreas devem ser encontradas. O conchóide simétrico representado pela linha pontilhada na figura 7.3 representa distâncias numericamente iguais às anteriores mas perpendiculares aos arcos correspondentes. Neste caso, as divisões do conchóide podem ser associadas às áreas dos setores circulares, mas o significado físico da construção se perde porque as novas distâncias são medidas ao longo da linha que liga cada ponto CGHEJKD ao centro vazio do círculo. Assim, a diferença entre a lei das distâncias e a lei das áreas é dada pela área contida entre as duas figuras conchóides reproduzidas abaixo. Ele é maior na região das longitudes intermediárias e se anula sobre

as apsides, pois no afélio e periélio as distâncias ao Sol se sobrepõem às distâncias ao centro do círculo e são portanto perpendiculares aos arcos.

Essa engenhosa demonstração geométrica de que a substituição da lei das distâncias pela lei das áreas implica em um pequeno erro é relativa, vale lembrar, a um percurso circular como o da figura 7.2.³⁴⁸ Veremos mais adiante que, na descrição da variação de velocidade de um planeta em sua órbita elíptica, Kepler vai retornar à lei das distâncias porque essa formulação expressa o fenômeno físico da interação entre o Sol e os planetas por meio de uma força que se atenua com o inverso da distância. A lei das distâncias será por fim modificada de maneira a se tornar equivalente à lei das áreas, porque Kepler reconhece que embora a esta última não possa ser tão diretamente explicada pela interação física entre o Sol e os planetas, ela se presta melhor à reprodução dos dados experimentais do que a lei das distâncias.³⁴⁹

7.3 Ruptura com a tradição

O final do capítulo 39 sela o fim de um princípio jamais questionado em quase dois mil anos de investigação sobre os movimentos celestes: a circularidade dos movimentos planetários. A importância deste princípio para a astronomia antiga não pode ser exagerada, como fica patente nas palavras de Neugebauer:

A pedra fundamental da mecânica celeste grega é um princípio essencialmente “dinâmico”, não importa o quão metafísica a sua formulação na literatura filosófica grega possa parecer. Ele consiste na idéia de que o movimento circular dos corpos celestes é o único movimento que pode durar eternamente. Este “princípio de inércia” é o princípio que orienta todas as teorias astronômicas gregas. A feliz casualidade de que as órbitas no nosso sistema planetário se afastem muito pouco da forma circular tornou possível a construção de modelos geométricos cujo refinamento gradual

³⁴⁸ Cf. *Astronomia nova*, p. 267- 268; KEPLER, 1992-b, 422 – 424.

³⁴⁹ A lei das áreas expressa a variação real de velocidade do planeta e determina equação física de centro, enquanto a aparente variação de velocidade decorrente da excentricidade da óptica é reproduzida pela equação óptica de centro e explicada por Kepler pela forma elíptica da órbita.

corresponde à adição de novos termos [em um série] de Fourier, cada um dos quais tem um determinado significado físico. Os cientistas modernos têm freqüentemente apontado a simplicidade como critério de verdade, e toda uma escola da “economia de raciocínio” tem oferecido a sua orientação ao pesquisador. Essa escola de pensamento poderia com justiça reivindicar os astrônomos gregos como os seus primeiros seguidores. Nada “mais simples” ou mais natural poderia ter sido admitido do que a preferência dos corpos celestes pelos movimentos circulares.³⁵⁰

Galileu, contemporâneo de Kepler, mantém uma posição semelhante quanto à forma circular dos movimentos:

Concluo portanto que só o movimento circular pode naturalmente convir aos corpos naturais integrantes do Universo e constituídos em ótima disposição; quanto ao movimento retilíneo, o máximo que se pode dizer é que ele é atribuído pela natureza a seus corpos e a partes deles toda vez que se encontrem fora de seus lugares, constituídos em péssima disposição e necessitando por isso voltar o mais rápido possível ao seu estado natural. Daqui me parece que muito razoavelmente se possa concluir que, para a manutenção da ordem perfeita entre as partes do mundo, é necessário dizer que os móveis são móveis apenas circularmente, e se existem alguns que não se movem circularmente, estes necessariamente são imóveis, e apenas o repouso e o movimento circular são capazes de conservar a ordem.³⁵¹

A quarta parte da *Astronomia nova* começa no capítulo 41, e é intitulada “Investigação da verdadeira medida da primeira desigualdade a partir de causas físicas e de idéias próprias.”³⁵² A primeira desigualdade reflete o movimento de Marte em torno do Sol (vide glossário). Assim, uma investigação de caráter realista acerca da primeira desigualdade implica na determinação da órbita percorrida por Marte no céu. As causas físicas se referem à discussão que ocupa o capítulo 39. Dentre as ‘idéias próprias’ destaca-se a forma elíptica da órbita.

³⁵⁰ NEUGEBAUER, 1983, p. 102.

³⁵¹ GALILEI, *Apud* ROSSI, 1992, p. 222.

³⁵² *INVESTIGATIO VERAE MENSURAE PRIMAE INAEQUALITATIS EX CAUSIS PHYSICIS ET PROPRIA SENTENTIA. Astronomia nova*, p. 271; KEPLER, 1992-b, p. 199.

Os capítulos que abrem a quarta parte não são concernentes a causas físicas. Ali Kepler desenvolve uma demonstração geométrica de que uma órbita circular não é capaz de acomodar as observações do movimento de Marte reunidas por Tycho Brahe. Estes capítulos tratam da construção de modelos geométricos capazes de reproduzir as observações, e as conjecturas físicas são então inteiramente deixadas de lado. O estabelecimento de um trajeto não circular para um corpo celeste é uma grande novidade, que exige uma justificação mais ortodoxa do que os argumentos físicos desenvolvidos por Kepler nos capítulos anteriores. E essa justificação é fornecida neste primeiro capítulo da quarta parte com a demonstração da impossibilidade de se reproduzir as observações de Tycho Brahe por meio de uma órbita circular. A força da demonstração provém da precisão dos dados de Tycho, amplamente reconhecida pela comunidade astronômica do início do século XVII.

Kepler emprega um método que havia sido desenvolvido por ele anteriormente. No capítulo 25, ele determinara valores para o apogeu e a excentricidade da órbita da Terra a partir de três distâncias da Terra ao Sol, relativas a posições angulares conhecidas da Terra com relação ao círculo zodiacal.³⁵³ Agora, no capítulo 41, este mesmo método será aplicado ao movimento aparente de Marte para a determinação da excentricidade e da posição do apogeu da órbita do planeta com relação ao círculo zodiacal. As distâncias selecionadas foram obtidas em capítulos anteriores (capítulos 26, 27 e 28), e conduzem a um círculo no qual a excentricidade e a direção do apogeu são determinados.³⁵⁴

³⁵³ Essas medidas foram feitas através de um expediente criado pelo próprio Kepler. Selecionando observações distantes de 687 dias, o período orbital de Marte, Kepler pôde desacoplar das aparências relativas a Marte um conjunto de posições reais da Terra em sua órbita ao redor do Sol. Cf. STEPHENSON, 1987, p. 52 - 55.

³⁵⁴ Cf. *Astronomia nova*, p. 274; KEPLER, 1992-b, p. 432-433.

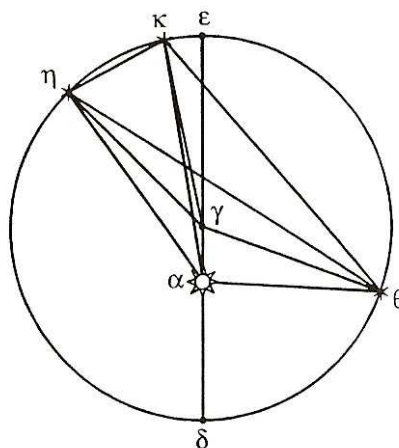


Figura 7.4 Na análise que ocupa o capítulo 41, os três pontos escolhidos por Kepler para a determinação do apogeu ϵ e da excentricidade $\gamma\alpha$ são os pontos η , κ , θ . *Apud.* KEPLER, 1992-b, p. 433.

Kepler observa que, para diferentes trios de distâncias relativas a diferentes trios de pontos sobre o círculo excêntrico, os valores encontrados para a excentricidade e a posição do apogeu são diferentes. Além disso, esses valores são diferentes daqueles obtidos em capítulos anteriores.³⁵⁵ Dessa maneira, fica demonstrado que a órbita circular não é uma hipótese astronômica adequada porque ela não satisfaz o mais fundamental dos critérios, o acordo com a experiência.

No capítulo 42 Kepler procede a uma determinação mais exata do afélio e do periélio da órbita de Marte. O procedimento deste capítulo envolve observações anacrônicas de Marte, nas quais entra em jogo a órbita da Terra em torno do Sol. Por outro lado, as observações são separadas por períodos inteiros do movimento anual de Marte, que permanece próximo ao afélio em cinco observações e próximo ao periélio nas três outras.

³⁵⁵ Excentricidade de 9264 e afélio em $28^{\circ} 53'$ Leão. Cf. *Astronomia nova*, p. 275; KEPLER 1992 – b, p. 434. Há um erro de tipografia na tradução de Donahue, onde ao invés de $28^{\circ} 53'$ Leão lemos $28' 53''$ Leão.

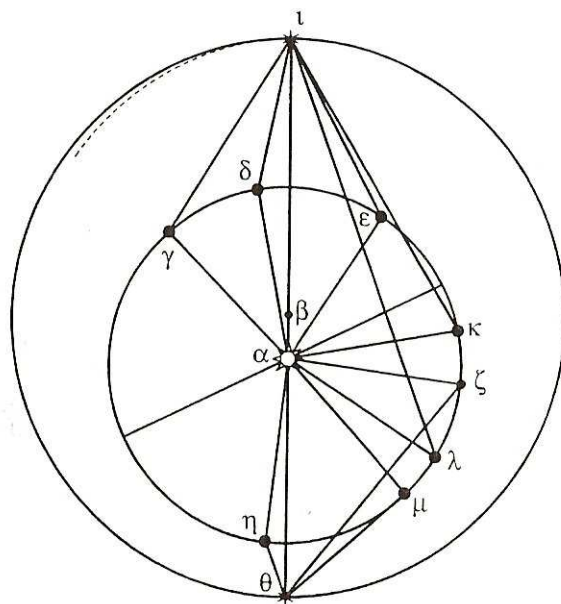


Figura 7.5 Em torno do Sol em α estão dispostos os percursos da Terra, $\gamma\delta\epsilon$, e de Marte, $\iota\theta$. A órbita de Marte é um círculo excêntrico de centro β . O centro da órbita excêntrica da Terra não aparece na figura. Os pontos da órbita da Terra $\gamma\delta\epsilon\kappa\lambda$ são empregados na determinação da posição do afélio ι , e os pontos ζ, μ, η são empregados na determinação do periélio, θ .³⁵⁶ *Apud.* KEPLER, 1992-a, p. 436.

A obtenção de resultados bem próximos (os erros são da ordem de 10') a partir de diferentes pontos sobre o círculo excêntrico mostra a Kepler que a teoria de que ele dispõe neste momento do desenvolvimento de sua análise funciona bem próximo às apsides embora, pelo capítulo 41, ela não funcione tão bem nas latitudes intermediárias. Conhecendo a posição da linha das apsides e a distância de Marte ao Sol no afélio e no periélio, é possível chegar à excentricidade da órbita. Kepler observa que ela é a metade da excentricidade do ponto equante, obtendo uma nova demonstração da biseção do

³⁵⁶ O menor número de pontos empregados na determinação do periélio se deve ao menor número de dados experimentais disponíveis. Kepler observa que em 1595 a chegada de Marte ao periélio coincidiria com o ápice do verão dinamarquês, impossibilitando as observações, e em 1597 Tycho Brahe estaria viajando (rumo ao exílio) por ocasião da chegada de Marte ao periélio. C. f. *Astronomia nova*, p. 279; KEPLER, 1992-b, p. 441.

equante, desta vez para a órbita de Marte e através de um método puramente geométrico.³⁵⁷

As investigações físicas são retomadas no capítulo 43. Se a órbita de Marte é circular e tem seus parâmetros (excentricidade e direção das apsides) determinados de acordo com os dois capítulos iniciais dessa quarta parte, então deve ser possível aplicar a idéia de força solar à análise do movimento em longitude de Marte em uma órbita dessa forma. O movimento em longitude apresenta-se de fato como o melhor meio de testar a órbita circular, já que a hipótese vicária encontrada no capítulo 16 é bem-sucedida no cômputo das longitudes, implicando em erros sempre inferiores a 2'.³⁵⁸ Assim, o movimento em longitude calculado através da hipótese vicária constitui um termo de comparação absolutamente confiável dentro dos limites de precisão experimental, e pode ser usado para representar as observações.³⁵⁹

O pressuposto físico é expresso geometricamente pela lei das áreas enunciada no capítulo 40: "... e assim as partes do plano medem os atrasos do planeta sobre as partes correspondentes da circunferência excêntrica."³⁶⁰ Kepler supõe que Marte descreva um trajeto circular em torno do Sol, com excentricidade igual a 0,09264 do raio de sua órbita, como encontrado no capítulo 42. O tempo gasto pelo planeta para percorrer um determinado trecho do seu percurso é proporcional à soma das distâncias de cada ponto do arco percorrido ao Sol, aproximadamente igual à área do setor circular correspondente – desde que a área do círculo inteiro seja associada ao período de revolução anual do planeta. Kepler começa a análise considerando passagem de Marte pela quadratura, fazendo um ângulo de 90° com o afélio a partir do centro do excêntrico, isto é, em uma posição com anomalia excêntrica igual a 90°. Pela lei das áreas, é possível obter a

³⁵⁷ Kepler obtém por este método uma excentricidade de 9264, próxima ao valor de 9282 anteriormente obtido. Cf. *Astronomia nova*, p. 282; KEPLER, 1992-b, p. 445. No capítulo 25, ele havia demonstrado a biseção da órbita da Terra. Cf. *Astronomia nova*, p. 202-204; KEPLER, 1992-b, p. 322-324.

³⁵⁸ Isso foi demonstrado no capítulo 18 da *Astronomia nova*, através do confronto com doze observações correspondentes a diferentes posições de Marte sobre o círculo excêntrico. Cf. *Astronomia nova*, p. 172-173; KEPLER, 1992-b, p. 277-278.

³⁵⁹ Cf. *Astronomia nova*, p. 285; KEPLER, 1992-b, p. 451.

³⁶⁰ "... itaque partes plani metiri moras, quas Planeta in partibus respondentis circumferentiae eccentricae trahat. *Astronomia nova*, p. 286-287; KEPLER, 1992-b, p. 453.

equação física de centro, a pequena diferença de posição angular resultante da velocidade não-uniforme do planeta em sua órbita excêntrica. O valor obtido, $5^{\circ} 18' 28''$, somado à anomalia excêntrica é igual à anomalia média, $95^{\circ} 18' 28''$.

A anomalia verdadeira, medida a partir do corpo solar, é obtida em seguida subtraindo-se, da anomalia média, a equação física de centro adicionada à equação óptica de centro. A equação óptica de centro representa a variação aparente de velocidade do planeta resultante da distância entre o centro da órbita e o Sol, e é dada pelo vértice do mesmo triângulo cuja área fornece a equação física de centro. Kepler obtém por um procedimento puramente geométrico um valor igual a $5^{\circ} 17' 34''$ para a equação óptica de centro, e um valor de $84^{\circ} 42' 2''$ para a anomalia verdadeira. Esse valor difere do valor obtido no capítulo 18 através da hipótese vicária por apenas $24''$.

Kepler seleciona então duas observações do planeta sobre os octantes, com anomalias excêntricas de 45° e 135° , e por um procedimento semelhante encontra desta vez um erro em torno de $8'$ entre as anomalias verdadeiras obtidas pela lei das áreas e as anomalias verdadeiras obtidas pela hipótese vicária no capítulo 18.³⁶¹ Mais precisamente, Kepler encontra um excesso de $8' 21''$ para a anomalia excêntrica de 45° e uma deficiência de $8'$ para a anomalia excêntrica de 135° . Trocando em miúdos, a aplicação da lei das áreas a uma órbita circular implica, para uma anomalia excêntrica de 45° , em uma anomalia verdadeira maior do que prevê a hipótese vicária, ou seja, em uma velocidade planetária maior do que aquela mostrada pelas observações. Por outro lado, a aplicação da lei das áreas a uma anomalia excêntrica de 135° gera uma posição atrasada e portanto uma aproximação mais lenta do periélio do que mostram as observações. Considerando que a variação de velocidade do planeta em sua órbita seja contínua, Kepler conclui que o planeta viaja mais rapidamente nas quadraturas e mais lentamente nas vizinhanças das apsides do que prevê a lei das áreas aplicada a uma órbita circular excêntrica.

³⁶¹ Kepler observa que esse valor é aproximadamente igual em módulo ao erro encontrado no capítulo 19 para as latitudes calculadas nos octantes através da biseção do equante. Porém, o erro ali se dava na direção inversa, e as anomalias verdadeiras computadas eram respectivamente mais próximas do afélio e do periélio do que é observado.

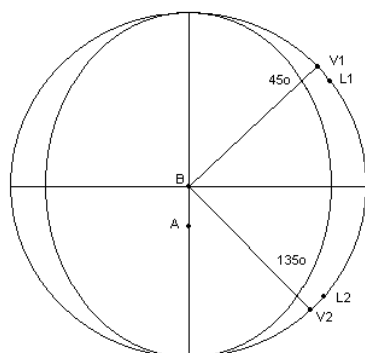


Figura 7.6 Nas apsidas a oval coincide com o círculo excêntrico. L1 e L2 representam as posições previstas pela lei das áreas, e V1 e V2 as previsões da hipótese vicária. No primeiro octante, a 45° do afélio, o planeta viaja mais lentamente do que prevê a aplicação da lei das áreas a uma órbita circular excêntrica, enquanto no segundo octante, a 135° , o planeta viaja mais rapidamente do que prevê a lei. Em ambos os casos o erro é de cerca de $8'$, e aparece exagerado no desenho.

O restante do capítulo 43 é consagrado à eliminação da possibilidade de que esse erro nos octantes seja resultante da aproximação em que consiste a lei das áreas com relação à lei das distâncias, a verdadeira hipótese astronômica aceita por Kepler nesse estágio.³⁶² A lei das áreas fora introduzida como uma aproximação, conveniente para o cálculo das posições de um planeta com o passar do tempo, mas sem relação direta com a ação da força solar sobre o planeta. Se a lei das áreas é uma aproximação da lei das distâncias, ela deve ser testada quanto ao seu desvio com relação a ela. Kepler avalia a diferença entre a área do círculo e a soma das distâncias ao Sol, para concluir que a diferença é maior nas quadraturas mas ainda assim é muito pequena. Além disso, a substituição da lei das áreas

³⁶² É relevante que Kepler não coloque em questão a lei das distâncias. Essa lei expressa matematicamente a variação de velocidade de um planeta em uma órbita excêntrica em torno do Sol quando o planeta é movido pela força solar kepleriana. A idéia de que o Sol move os planetas por meio de uma força imaterial concebida por analogia com a luz acompanha Kepler desde a sua juventude e jamais será abandonada por ele.

pela lei das distâncias implica em uma velocidade maior do planeta próximo às quadraturas, ao contrário do que deveria ocorrer se esta fosse a causa do erro.

O fracasso na reprodução da variação de velocidade de Marte por meio da aplicação da lei das áreas a uma órbita circular conduz à conclusão de que a órbita desse planeta não pode ser circular, já que além da circularidade a lei das áreas fora o único pressuposto do cálculo. A confiabilidade dessa demonstração depende acima de tudo da grande precisão dos dados de Tycho Brahe.

No capítulo 44 Kepler conclui definitivamente que o percurso de Marte em torno do Sol não é circular. As longas demonstrações que ocuparam os capítulos precedentes excluem as possibilidades de que a fonte do erro esteja situada no tratamento dado às observações. Pela geometria da órbita, a escolha do sol aparente como ponto de referência também é excluída. De fato, no capítulo 6, o último da primeira parte da *Astronomia nova*, Kepler mostrara que a substituição do sol médio pelo sol aparente implica em um deslocamento do excêntrico na mesma direção, de modo que pontos diametralmente opostos são deslocados em direções contrárias com relação ao centro. Mas não é isso que é observado aqui: embora o excêntrico represente bem o percurso do planeta próximo às apsides, esse percurso é achatado dos dois lados, e na região próxima das quadraturas o planeta está mais próximo ao Sol do que deveria estar caso sua órbita fosse circular:

Assim, claramente é isto [que acontece]: a órbita do planeta não é um círculo, mas pouco a pouco entra dos dois lados e volta a sair até a circunferência do círculo no perigeu. De sorte que tem-se o costume de nomear a forma desse percurso ‘oval’.³⁶³

A aplicação da lei das áreas a uma órbita circular implica em velocidades menores do que aquelas que são observadas nas quadraturas porque ali as distâncias reais do planeta ao Sol são inferiores às distâncias previstas pelo círculo excêntrico. O pressuposto físico de

³⁶³ *Itaque plane hoc est: Orbitae Planetarum non est circulus, sed ingrediens ad latera utraque paulatim, iterumque ad circuli amplitudinem in perigaeo exiens. Cujusmodi figuram itineris ovalem appellant.* *Astronomia nova*, p. 286; KEPLER, 1992-b, p. 453.

acordo com o qual a velocidade de um planeta é proporcional à distância do corpo central só pode reproduzir a variação de velocidade do planeta sobre sua órbita excêntrica se essa órbita for uma oval, ligeiramente achatada nas latitudes intermediárias. A maior distância ao Sol fornece uma explicação física para a menor velocidade do planeta nas vizinhanças das apsides – ou, nas palavras de Kepler, para o acúmulo dos atrasos nas vizinhanças das apsides.

A conclusão da refutação da circularidade da órbita se dá portanto no interior de uma análise física. A hipótese física da força solar havia sido anteriormente empregada para explicar a menor velocidade do planeta no afélio do que no periélio, e havia produzido a lei das distâncias e a lei das áreas. Agora essa mesma hipótese é invocada na análise do movimento de Marte na região das latitudes intermediárias, possibilitando a derivação das verdadeiras posições de Marte nas quadraturas a partir de uma análise das velocidades.

7.4 A elipse

O primeiro registro do estabelecimento da forma elíptica da órbita de Marte está em uma carta enviada por Kepler ao astrônomo frísio David Fabricius, datada de 11 de outubro de 1605: “Assim o caminho de Marte é em verdade uma elipse, cortada uma lúnula da metade da largura daquela relativa à elipse anterior.”³⁶⁴ O significado da segunda parte dessa frase ficará claro mais adiante. Avançamos que Kepler se refere à elipse que ele havia anteriormente tentado associar à órbita de Marte, e que se revelara demasiado excêntrica. O fato é que o caminho percorrido por Kepler é longo e intrincado, e envolve o recurso a uma série de curvas ovais até que a elipse correta seja finalmente encontrada.

Esse processo consumiu quatro anos da vida de Kepler, e é marcado por duas grandes descobertas. Como vimos acima, no capítulo 42 o astrônomo relata a obtenção de uma descrição precisa da órbita de Marte na região das apsides, que no entanto apresentava o

³⁶⁴ *Itaque omnino Martis via est Elipsis, resectâ lunula dimidia latitudinis pristinae Ellipseos.* K.G.W. XV, p. 247-248. A extensa carta ocupa quarenta páginas na edição de Caspar das obras completas. Nela Kepler discute uma série de questões relativas à física celeste, como a doutrina da gravidade e o movimento da Lua.

problema de implicar em distâncias demasiado grandes na região das quadraturas. As investigações físicas do capítulo seguinte apontavam na mesma direção, pois as observações mostravam que o planeta se movia mais rapidamente na região das quadraturas do que indicava a aplicação da lei das áreas a um percurso circular, o que devia significar que ali a distância do planeta ao Sol deveria ser menor do que aquela prevista por uma órbita circular. Uma maneira de resolver o problema seria abandonar o círculo e substituí-lo por uma curva oval, denominação comum a um conjunto de curvas planas fechadas, alongadas com relação ao círculo que as circunscreve e divididas em duas partes simétricas pela linha das apsides. Kepler demorou dois anos para chegar a esse resultado, anunciado em 1603 também em carta a David Fabricius.³⁶⁵ Somente em 1605 Kepler finalmente concluiria que a órbita de Marte tem a forma precisa de uma elipse, um tipo particular de oval matematicamente bem-definida como uma das seções cônicas descritas por Apolônio.

No capítulo 45 a explicação física previamente desenvolvida no capítulo 39 para a excentricidade de uma órbita circular, a saber, a interação entre a potência inerente ao planeta e a força solar, é retomada e adaptada à tarefa de explicar a forma não-circular da órbita. O percurso não-circular é assim decomposto em um modelo epicíclico onde dois movimentos circulares são causados por mecanismos distintos: o movimento do centro do epiciclo pela ação direta da força solar e o movimento do planeta sobre o epiciclo pela interação entre a potência intrínseca e a força solar.

Esse modelo é semelhante ao primeiro modelo examinado no capítulo 39, com a diferença de que agora o planeta viaja sobre o epiciclo com velocidade constante, diferente da velocidade variável do centro do epiciclo, a qual é regida pela força solar.³⁶⁶ Como a velocidade do planeta sobre o epiciclo não é igual à velocidade do centro do epiciclo sobre o círculo excêntrico, ND já não permanece paralelo à linha das apsides AC durante todo o percurso, e a curva resultante não tem a forma exata de um círculo (vide a figura 7.7).

³⁶⁵ Cf. STEPHENSON, 1987, p. 90. A carta encontra-se em K.G.W. XIV, p. 410-411.

³⁶⁶ Cf. *Astronomia nova*, p. 288-289; KEPLER, 1992-b, p. 456.

sobre o círculo concêntrico devem se mover com velocidade variável, igual àquela do planeta sobre o círculo excêntrico. No modelo do capítulo 45 o planeta se move sobre o epiciclo com velocidade constante, mas a velocidade do centro do epiciclo continua a seguir o mesmo padrão de variação da velocidade do planeta sobre o círculo excêntrico. Porém, essa variação de velocidade não pode receber uma explicação física em termos da força solar, já que o centro do epiciclo se move sobre um círculo concêntrico com o Sol, e portanto permanece sempre a uma mesma distância dele.³⁶⁷ E no entanto, para que o modelo seja interpretado como uma representação do real mecanismo de movimentação do planeta, isto é, como uma hipótese propriamente astronômica, o movimento do centro do epiciclo deve corresponder à componente causada pela ação da força solar, e deve ser explicado através dela, segundo a distância ao Sol.

No capítulo 46 Kepler procede a um exame do percurso resultante do movimento epicíclico descrito acima. Esse exame corresponde a uma análise da variação nas distâncias do planeta ao Sol produzida pelo movimento no epiciclo, que combinado com o movimento circular causado pela ação da força solar deve resultar em um percurso oval, achatado na região das quadraturas. O movimento do planeta sobre o epiciclo, com velocidade uniforme, coincide com sua anomalia média, e é portanto equivalente a uma medida de tempo. Como o movimento do planeta ao redor do Sol se dá com velocidade variável, porções iguais do epiciclo, que representam intervalos de tempo iguais, correspondem a porções diferentes do percurso planetário, maiores na região periélio e menores na região do afélio, ou, em termos mais gerais, inversamente proporcionais às distâncias.³⁶⁸ A princípio seria possível aplicar a lei das áreas a um círculo excêntrico equivalente ao modelo epicíclico, e assim calcular a anomalia excêntrica correspondente a cada anomalia média, isto é, a porção do círculo atravessada pelo planeta em cada intervalo de tempo. Porém, embora Kepler desenvolva dois métodos diferentes para calcular a posição do planeta sobre a oval, ele reconhece que ambos são aproximados e

³⁶⁷ Cf. *Astronomia nova*, p. 257; KEPLER, 1992-b, p. 409.

³⁶⁸ Cf. *Astronomia nova*, p. 292; KEPLER, 1992-b, p. 461.

envolvem ângulos que não podem ser geometricamente determinados de maneira exata.³⁶⁹

Neste capítulo 46, Kepler interpreta o epiciclo como a verdadeira hipótese astronômica, como a representação geométrica do mecanismo responsável pela não-circularidade da órbita. O excêntrico funciona aqui como uma mera hipótese geométrica representativa do movimento epicíclico real, como uma hipótese auxiliar para a conveniente determinação das anomalias excêntricas através da lei das distâncias ou, mais precisamente, da lei das áreas pela qual esta última é aproximada.³⁷⁰

Kepler recorre então à hipótese vicária como um meio independente de se calcular as longitudes do planeta, isto é, a direção da reta que o liga ao Sol, a cada instante. As distâncias fornecidas pelo modelo epicíclico são corretas e podem ser combinadas com as longitudes fornecidas pela hipótese vicária, que também reproduzem as observações adequadamente. Após uma análise elaborada,³⁷¹ Kepler chega ao resultado final, uma oval assimétrica, mais larga na base do que no topo, semelhante a um ovo.³⁷²

No capítulo 47 Kepler introduz uma elipse simétrica como hipótese auxiliar no tratamento matemático da oval assimétrica revelada pela ação conjunta da teoria epicíclica com a hipótese vicária.³⁷³ Pode-se questionar o motivo pelo qual Kepler, após ter-se convencido da impossibilidade de que o movimento de Marte em torno do Sol fosse circular, demorou tanto tempo para se decidir pela elipse. Em primeiro lugar, uma oval indeterminada é uma curva mais geral do que a elipse, e sua substituição por esta última deve ser justificada de alguma maneira. Além disso, também contribui para a

³⁶⁹ Cf. *Astronomia nova*, p. 293; KEPLER, 1992-b, p. 462-463.

³⁷⁰ Cf. *Astronomia nova*, p. 290; KEPLER, 1992-b, p. 459.

³⁷¹ Como observa Bruce Stephenson, a complexidade dos capítulos 45-58 reflete as dificuldades envolvidas na determinação da anomalia excêntrica em uma órbita não-circular, onde ângulos iguais já não correspondem a arcos iguais. Cf. STEPHENSON, 1987, p. 94.

³⁷² Cf. *Astronomia nova*, p. 295; KEPLER, 1992-b, p. 465-466.

³⁷³ O objetivo de Kepler aqui é calcular as equações físicas de centro fornecidas pela lei das áreas. Esse cálculo pressupõe o conhecimento da área total subentendida pela órbita bem como de setores arbitrários com vértice no Sol. Essas áreas só poderiam ser conhecidas por Kepler para o caso de uma elipse, e não de uma oval assimétrica. Cf. *Astronomia nova*, p. 296; KEPLER, 1992-b, p. 468.

adoção da oval o grande valor acordado por Kepler às hipóteses físicas como elementos constitutivos de uma teoria astronômica referente à real estrutura do mundo. A explicação física inicialmente forjada para explicar a não-circularidade da órbita de Marte implica, como é mostrado no capítulo 46 da *Astronomia nova*, em uma oval provida de apenas um eixo de simetria, coincidente com a linha das apsides. Uma elipse, simétrica com relação aos dois eixos perpendiculares que se cruzam no seu centro, deveria ser produzida por algum outro mecanismo, diferente do modelo epicíclico proposto no capítulo 45.

Desse modo, a elipse é apresentada no capítulo 47 como uma boa aproximação da oval verdadeira. Kepler procede à determinação da área da lúnula (vide glossário) que deve ser subtraída do círculo excêntrico na aplicação da lei das áreas ao percurso elíptico.³⁷⁴ Ele obtém que a largura máxima da lúnula é de 858 para um raio do círculo igual a 100.000, e corresponde às quadraturas.³⁷⁵ Subtraída do círculo primitivo a área da lúnula, Kepler procede à determinação das equações físicas de centro nos octantes, pontos onde havia falhado a hipótese circular ptolomaica da bisecção do equante (vide glossário).³⁷⁶ As novas equações, agora calculadas através da aplicação da lei das áreas aos setores da elipse auxiliar, são então obtidas para valores de anomalia excêntrica de 45° e 135° , nos octantes. As anomalias médias correspondentes são iguais a $48^\circ 45' 12''$, $138^\circ 45' 12''$.³⁷⁷ Como a unidade de medida em que as áreas são expressas é indiferente para a aplicação da lei, que versa sobre razões entre áreas, Kepler adota uma unidade tal que a área total é igual a 360 e as áreas dos triângulos pelos quais ele aproxima os setores são numericamente iguais aos valores das anomalias médias (os ângulos com relação ao afélio medidos a partir do centro) correspondentes.

Uma tabela ao final do capítulo mostra as anomalias verdadeiras, resultantes da adição das novas equações de centro às anomalias excêntricas. Os resultados são comparados

³⁷⁴ Cf. *Astronomia nova*, p. 299; KEPLER, 1992-b, p. 472-473.

³⁷⁵ Kepler emprega um ponto de anomalia média igual a $95^\circ 18' 28''$, ao qual ele associa uma anomalia excêntrica de 90° . Cf. *Astronomia nova*, p. 301; KEPLER, 1992-b, p. 475.

³⁷⁶ A hipótese ptolomaica e a hipótese vicária são discutidas no item 6.1 deste trabalho.

³⁷⁷ Na verdade, o ponto de partida de Kepler são os valores de anomalia média. Os valores redondos das anomalias excêntricas são suposições, confirmadas logo em seguida. Cf. *Astronomia nova*, p. 301-302; KEPLER, 1992-b, p. 475-476.

com valores obtidos por outros procedimentos, desenvolvidos em capítulos anteriores.³⁷⁸

A tabela mostra que os novos resultados são muito próximos daqueles obtidos através do equante ptolomaico no capítulo 19, e Kepler conclui que a nova hipótese implica em uma velocidade demasiado grande nas apsides e pequena nas quadraturas. Isso significa, levando-se em conta a lei das distâncias, que a elipse auxiliar deste capítulo 47 é demasiado alongada, pois os cálculos agora apresentam um erro oposto àquele que fora verificado para um percurso circular. A elipse auxiliar reproduz as distâncias de maneira adequada, segundo a teoria do capítulo 45, mas as anomalias verdadeiras resultantes são diferentes dos valores determinados pela hipótese vicária.

Os procedimentos geométricos empregados no capítulo 47 envolvem uma série de aproximações decorrentes da impossibilidade de se calcular exatamente a área compreendida pela lúnula, que na curva conchóide do capítulo 40 é dada pelo dobro da área contida entre a conchóide AAAAAAA e a conchóide simétrica pontilhada (vide a figura 7.3). Por esse motivo, Kepler procura no capítulo 48 confirmar o resultado do capítulo anterior, empregando um novo expediente que não envolva uma tal indefinição geométrica. Deixando de lado a lei das áreas ele calcula separadamente cada uma das 180 anomalias verdadeiras relativas a cada ângulo de um grau da órbita oval, e repete o procedimento inteiro três vezes, para valores diferentes da excentricidade do Sol. Os resultados obtidos são reproduzidos na tabela abaixo³⁷⁹:

anomalia média	anomalia verdadeira		diferença
	cap. 48	hip. vicária	
45°	38° 2' 24"	38° 4' 54"	2' 30"
90°	79° 26' 49"	79° 27' 41"	0 52"
135°	126° 56' 25"	126° 52' 0"	4' 25"

³⁷⁸ *Astronomia nova*, p. 302; KEPLER, 1992-b, p. 477.

³⁷⁹ *Astronomia nova*, p. 309; KEPLER, 1992-b, p. 487.

A conclusão é a mesma do capítulo anterior, uma velocidade muito grande na região das longitudes intermediárias e muito pequena próximo às apsides.³⁸⁰

O capítulo 49 começa com uma análise das dificuldades geométricas envolvidas no modelo epicíclico do capítulo 45. O trecho da órbita percorrido em um determinado intervalo de tempo depende da velocidade do planeta naquele trecho, regida pela aproximação e pelo afastamento com respeito ao Sol. Mas a distância do planeta ao Sol em cada trecho depende da porção de órbita atravessada. Em outras palavras, a forma oval da órbita depende dos incrementos nas distâncias, resultantes da interação entre a força solar e a potência intrínseca planetária. Mas o deslocamento resultante dessa interação depende da porção da órbita atravessada, que por sua vez não pode ser conhecida a menos que se tenha um conhecimento prévio da forma da órbita – ou que se lance mão da hipótese vicária como hipótese auxiliar no cálculo das longitudes, como foi feito no capítulo 46.

Desse modo, Kepler observa que há uma circularidade de raciocínio que impede o cálculo das anomalias verdadeiras a partir do modelo epicíclico proposto no capítulo 45. O interessante dessa discussão é que o autor da *Astronomia nova* não considera essa dificuldade do ponto de vista do astrônomo, mas do ponto de vista da ordenação do mundo natural. Não se trata aqui de desenvolver novas ferramentas matemáticas, mas de encontrar uma nova relação, compatível com a visão kepleriana de um cosmos ordenado da melhor maneira possível. Os movimentos celestes, como todos os fenômenos observados no mundo criado, devem ser determinados por relações geométricas bem-determinadas, e essas relações podem vir a ser conhecidas pelo homem.

No capítulo 49 Kepler tenta escapar dessa dificuldade retomando o modelo epicíclico do capítulo 45 e procurando mais uma vez analisá-lo a partir da ação conjunta da força solar e da potência intrínseca planetária. A despeito das objeções do capítulo 39 (por nós discutidas no sexto capítulo deste trabalho), na nova análise, como nos capítulos 45 e 46,

³⁸⁰ Cf. *Astronomia nova*, p. 310; KEPLER, 1992-b, p. 488.

o epiciclo é analisado como uma hipótese real ou astronômica, e não como mera representação geométrica de uma tal hipótese.³⁸¹ Porém, ao contrário da maneira confusa como vinha sendo definida a ação da força solar sobre o centro do epiciclo, Kepler faz agora a velocidade desse ponto ser determinada pela distância do corpo do planeta até o Sol. A relação de causalidade dependente da distância entre os corpos físicos do Sol e do planeta é assim respeitada, apesar de ser representada geometricamente pelo movimento do centro do epiciclo com velocidade variável em um círculo concêntrico com o Sol. A velocidade do centro do epiciclo é dependente da distância variável que separa o planeta do Sol, e não de sua distância constante até ele. Essa nova hipótese física, se não é direta, ao menos parece a Kepler mais viável do que aquelas que haviam sido propostas previamente.

Se as velocidades do centro do epiciclo em torno do Sol e do planeta sobre o epiciclo são conhecidas, então a posição do planeta sobre a oval pode ser determinada sem nenhuma circularidade no argumento, isto é, sem que a oval seja previamente conhecida. Ao final do capítulo é apresentada uma nova tabela³⁸² comparativa das anomalias verdadeiras calculadas no capítulo com aquelas geradas pela hipótese vicária:

anomalia média	anomalia verdadeira		diferença
	cap.49	hip. vicária	
45°	37°56'43"	38° 5'	8' (-)
90°	79°26'35"	79°27'	0
120°	110°28'8"	110°18 1/2 '	9 1/2 ' (+)
150°	144°16'49"	144°8'	8' (+)

Mais uma vez, o planeta apresenta uma velocidade muito grande na região das longitudes intermediárias e muito pequena próximo às apsides.³⁸³ Agora, porém, os erros são maiores do que aqueles encontrados no capítulo anterior. Como vimos, por se tratar de

³⁸¹ Cf. *Astronomia nova*, p. 312; KEPLER, 1992-b, p. 492.

³⁸² *Astronomia nova*, p. 313; KEPLER, 1992-b, p. 493.

³⁸³ Cf. *Astronomia nova*, p. 313-314; KEPLER, 1992-b, p. 494.

um movimento em torno de um ponto vazio o modelo epicíclico apresenta problemas sérios quando analisado do ponto de vista físico, e o fracasso experimental contribui para que Kepler o abandone definitivamente.

A sua invocação como hipótese astronômica nessa série de capítulos, em uma etapa tão avançada do argumento da *Astronomia nova*, pode ser no entanto compreendida em vista do método astronômico de Kepler. O modelo epicíclico é uma decomposição do movimento oval em dois movimentos circulares, que a princípio podem ser analisados isoladamente como processos físico autônomos. Cada um dos círculos do modelo recebe uma explicação causal, e ainda que persistam algumas inconsistências discutidas por Kepler na primeira parte da *Astronomia nova*, entre as quais a mais notória é a impossibilidade física de um movimento circular em torno de um centro vazio, a decomposição da órbita oval em dois círculos emula o processo de decomposição de movimentos complexos em movimentos circulares simples que Kepler identifica com o próprio progresso da astronomia. O modelo epicíclico parece portanto a Kepler a maneira mais natural de se procurar explicar um movimento planetário não-circular, ainda que a construção geométrica desse movimento seja necessariamente problemática.

A refutação do modelo epicíclico não depende necessariamente da controversa interpretação física tecida por Kepler para explicá-lo, e pode ser diretamente obtida da experiência. As anomalias verdadeiras calculadas através de um método muito seguro baseado nesse modelo e na lei das distâncias ainda apresentam erros, e como estes não podem ser creditados ao tratamento dos dados, eles devem necessariamente decorrer da adoção de uma hipótese astronômica que não corresponde à realidade, a saber, o modelo epicíclico.³⁸⁴

O capítulo 50 traz seis novas maneiras de se calcular as anomalias verdadeiras, isto é, de se determinar as equações de centro que devem ser somadas às anomalias excêntricas para que se represente o movimento de Marte em função da posição relativa do Sol. Mais

³⁸⁴ Cf. *Astronomia nova*, p. 313-314; KEPLER, 1992-b, p. 494.

uma vez, o planeta parece muito rápido próximo às apsides e muito lento na região das longitudes intermediárias, o que significa que a oval admitida é demasiado alongada e que o percurso real deve ser uma curva intermediária entre essa oval e um círculo.³⁸⁵

Os capítulos 45-50 podem ser tratados em bloco, porque neles Kepler avalia a viabilidade do modelo epicíclico na determinação das anomalias verdadeiras em um percurso oval. A conclusão de Kepler é que nenhum dos métodos analisados nesses capítulos alcança a precisão das longitudes calculadas através da hipótese vicária, que ele no entanto sabe ser falsa. Em todos os casos, a oval resultante é alongada demais, o que significa que o modelo tomado como ponto de partida é inadequado. A inclusão desses capítulos na argumentação do livro justifica-se porém porque ela torna explícitos o critérios que orientam Kepler na análise dos dados reunidos por Tycho Brahe e sua equipe. “Saiba pois que estes erros serão o nosso caminho para a verdade.”³⁸⁶

No capítulo 51 Kepler deixa de lado o modelo epicíclico e as curvas dele resultantes para proceder à determinação das distâncias de Marte ao Sol a partir de um conjunto de observações situadas em torno das longitudes intermediárias. Ele conclui que as distâncias correspondentes a pontos simétricos com relação à linha das apsides são iguais, o que significa que o afélio, o ponto a partir do qual são medidas as anomalias, encontra-se corretamente posicionado.³⁸⁷ As mesmas observações são empregadas no capítulo seguinte na demonstração de que essa linha das apsides passa pelo sol aparente, o corpo solar, e não pelo sol médio, o centro da órbita da Terra, como acreditara Copérnico. Esse resultado corresponde a uma comprovação empírica da hipótese física de Kepler que, como vimos, depende da adoção do corpo solar como fonte física e referência geométrica dos movimentos planetários.

No capítulo 53 Kepler retoma o exame das distâncias de Marte ao Sol. As equações de centro empregadas neste capítulo da *Astronomia nova* foram, como demonstra William

³⁸⁵ Cf. *Astronomia nova*, p. 317, 322; KEPLER, 1992-b, p. 499-500, 506.

³⁸⁶ *Scito itaque, quod hi errores via nobis futuri sint ad veritatem. Astronomia nova*, p. 313-314; KEPLER, 1992-b, p. 494.

³⁸⁷ Cf. *Astronomia nova*, p. 335; KEPLER, 1992-b, p. 524.

Donahue³⁸⁸, obtidas através do método definitivo proposto no capítulo 60, isto é, através da formulação final das duas primeiras leis que aparece ao final da quarta parte do livro. Isso significa que Kepler calculou essas distâncias posteriormente à descoberta da elipse verdadeira, e as incluiu nesta etapa da análise por algum motivo. Se o argumento da *Astronomia nova* de fato corresponde a uma exposição do método segundo o qual o astrônomo deve analisar as observações astronômicas, método onde entram em jogo a construção de hipóteses físicas e a construção de hipóteses geométricas ao mesmo tempo compatíveis entre si e com as observações, então este capítulo, artificialmente introduzido neste ponto da análise, deve corresponder a alguma etapa desse método. As primeiras linhas do capítulo com efeito apontam nessa direção:

Porque criamos aqui novas hipóteses, na medida em que procuramos a causa natural das equações excêntricas, convém que tudo seja explorado por nós o quanto for possível e que não sejam desprezados os alicerces, ou seria construído sobre eles um edifício pouco firme. E assim é vantajoso que exploremos a mesma coisa, as distâncias mais corretas de Marte ao Sol, através de uma maior quantidade de métodos.³⁸⁹

Essa passagem de fato indica qual o objetivo da inserção da nova tabela de distâncias a esta altura da análise. Desde o capítulo 39 fora traçada a distinção entre o movimento circular causado pelo Sol e o movimento resultante da interação da potência intrínseca do planeta com a força solar. Ali essa distinção havia sido introduzida para explicar a excentricidade de um percurso circular, e no capítulo 45 uma explicação do mesmo tipo fora adaptada à explicação da não-circularidade de uma órbita que tem forma oval apesar da forma necessariamente circular do movimento causado pela rotação do Sol em torno de seu eixo.

³⁸⁸ DONAHUE, 1988.

³⁸⁹ *Quia hic novas hypotheses condimus, inquirentes scilicet naturalem causam aequationum eccentrici, decet omnia nobis esse quam exploratissima, ne fundamentis neglectis ruinosum superstruatur aedificium. Itaque juvat eandem rem verissimas scilicet Martis a Sole distantias, pluribus methodis explorare. Astronomia nova*, p. 337; KEPLER, 1992-b, p. 529.

Ao procurar uma representação geométrica do movimento real de Marte em torno do Sol, Kepler adota um sistema de coordenadas onde o movimento do planeta é decomposto em movimento em longitude, movimento em latitude e variação periódica da distância ao Sol. Enquanto o movimento em longitude é circular ao longo do zodíaco e é explicado pela ação da força solar, os movimentos em latitude e da variação da distância se dão em direções ortogonais àquela do movimento em longitude, e são explicados pela interação entre a potência planetária e a força solar. O movimento de Marte em latitude é visto da Terra como um desvio periódico com relação à eclíptica. Kepler o interpreta como o resultado da inclinação relativa entre as órbitas, mas como o equador solar coincide, por definição, com o plano da órbita da Terra, o movimento de Marte em latitude deve ser explicado por alguma potência capaz de provocar um deslocamento periódico com relação ao plano situado sobre o equador solar. Desse modo, o movimento em latitude afeta a posição da órbita mas não entra em jogo na determinação da sua forma, que depende apenas do movimento circular imposto pelo Sol e da variação das distâncias.³⁹⁰

O movimento em longitude pode ser facilmente testado através da hipótese vicária, que como vimos o descreve com boa precisão. Já a variação das distâncias é mais difícil de se medir, além de não poder ser testada diretamente. Se o capítulo 53 foi de fato inserido posteriormente à descoberta das leis para explicitar alguma etapa que Kepler considerava importante no tratamento dos dados relativos ao movimento de Marte, essa etapa deve corresponder a uma confirmação da variação das distâncias reveladas pelo modelo epicíclico e pela oval a ele equivalente. As distâncias, associadas às longitudes, definem a forma da órbita do planeta, e devem portanto ser conhecidas com a maior segurança possível.

No capítulo 54 Kepler apresenta uma nova derivação das distâncias de Marte ao Sol no afélio e no periélio. No capítulo 55, essas distâncias são empregadas na construção de um modelo epicíclico como aquele do capítulo 45, de onde podem ser derivadas distâncias correspondentes às longitudes intermediárias. Estas últimas são comparadas às distâncias

³⁹⁰ Um dos aspectos menos estudados da astronomia kepleriana, a teoria da latitude que ocupa a quinta parte da *Astronomia nova* é discutida por nós em um trabalho a ser submetido em breve.

correspondentes determinadas a partir das observações, nos capítulos 51 e 53. Kepler conclui que as distâncias fornecidas pelo modelo epicíclico são demasiado curtas nas longitudes intermediárias.³⁹¹ Esse resultado é oposto àquele que havia sido obtido em uma órbita circular, na qual as distâncias calculadas a partir do modelo físico eram maiores do que aquelas derivadas das observações.

Isso indica a Kepler que a curva correta deve ser ter uma forma intermediária entre o círculo e a oval considerada até então, isto é, a órbita do planeta deve ser alguma oval menos alongada. A lúnula cortada do círculo não deve ter uma largura de 858 para um raio do excêntrico igual a 100.000, mas de 429 ou algum valor próximo deste, a depender do conjunto de dados empregado.³⁹² Kepler narra a chegada à forma elíptica como accidental. Ele teria fortuitamente percebido que a secante do ângulo $5^{\circ}18'$, o valor máximo da equação óptica de centro de Marte, é igual a 100.429. “Quando eu vi que aquela [a secante da equação máxima] era igual a 100.429, foi quase como se eu acordasse de um sonho e contemplasse uma nova luz, e eu comecei a raciocinar desta maneira.”³⁹³

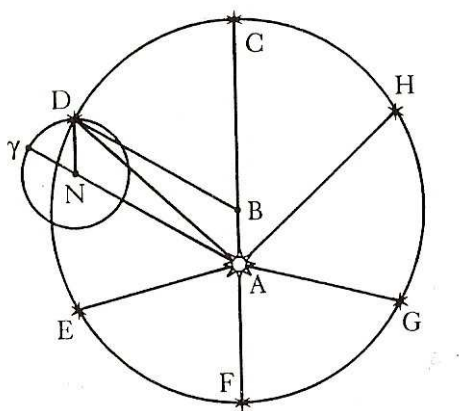
Kepler continua dizendo que tanto a equação óptica de centro quanto a largura da lúnula são máximas na região próxima às longitudes intermediárias, e que nas quadraturas a largura da lúnula tem a mesma magnitude que a diferença entre o valor da secante e o raio de 100.000. Kepler logo trata de confrontar, no capítulo 56, a nova oval com as hipóteses físicas previamente consideradas. Dentre elas, o movimento libratório proposto no capítulo 39 se apresenta como aquela que melhor reproduz a oval. De acordo com o modelo, o planeta não descreve um círculo em torno do centro do epiciclo, mas um movimento oscilatório ao longo do diâmetro epicíclico orientado na direção (variável) do Sol.

³⁹¹ Cf. *Astronomia nova*, p. 344; KEPLER, 1992-b, p. 541.

³⁹² Cf. *Astronomia nova*, p. 345; KEPLER, 1992-b, p. 543.

³⁹³ *Quem cum viderem esse 100.429, hic quasi e somno expergefactus, et novam lucem intuitus, sic coepi ratiocinari. Astronomia nova*, p. 346; KEPLER, 1992-b, p. 543

No capítulo 57 Kepler procura construir uma explicação física detalhada para a oscilação do planeta sobre o diâmetro do epiciclo, em uma configuração geométrica onde as sucessivas distâncias do planeta ao Sol são dadas por $\gamma\alpha$, $\kappa\alpha$, $\mu\alpha$, $\zeta\alpha$. Em cada ponto sobre o epiciclo, a largura da lúnula a ser cortada do excêntrico equivalente pode ser determinada, e é dada pela diferença entre as distâncias epicíclicas e as distâncias diametrais, $\iota\kappa$, $\lambda\mu$.



198

Kepler lembra que o planeta não pode se mover no espaço por si próprio porque ele não possui meios para isso, e deve de alguma maneira ser auxiliado pela força solar.³⁹⁴ Desse modo, o movimento de libração responsável pela excentricidade da órbita oval deve ser explicado pela interação entre a força solar e a potência intrínseca do planeta. Kepler imagina que a força solar se comporte como a correnteza de um rio, e representa a potência planetária como um remo, que gira uma volta inteira em torno de si mesmo a cada duas voltas ao redor do Sol, conforme a figura 7.9. Dependendo da sua orientação relativa ao fluxo da força solar o remo é pressionado de maneira diversa, afastando-se ou aproximando-se do Sol. Por esse expediente, Kepler fornece uma primeira explicação qualitativa para a forma oval da órbita e para as posições do afélio e do periélio.³⁹⁵

No caso de Marte, a correnteza é uma *species* imaterial, a força solar, capaz de interagir com o magnetismo do planeta. Porém, o padrão de rotação do remo é refutado em virtude do que é observado no caso da Lua, que sempre mantém a mesma face voltada para a Terra.³⁹⁶ Kepler imagina então que Marte, como a Terra, possua um eixo magnético, e que um dos pólos desse eixo seja atraído pelo Sol, enquanto o outro pólo é repelido por ele. A orientação desse eixo deve permanecer constante com o passar do tempo, como acontece com o eixo da Terra.³⁹⁷ O eixo magnético de Marte é representado pela seta na figura 7.9. No ponto C, o afélio, ambos os pólos encontram-se igualmente distantes do Sol, e a distância do planeta não é alterada. O mesmo acontece no ponto F, o periélio, e também ali a variação de distância é nula. Próximo ao ponto M, o pólo atraído pelo Sol encontra-se mais próximo dele, e o resultado líquido do efeito da força solar sobre os dois pólos é a aproximação do planeta com relação ao Sol. Na região em torno do ponto G acontece o oposto, e o planeta sofre um afastamento com relação ao Sol.

³⁹⁴ Cf. *Astronomia nova*, p. 349; KEPLER, 1992-b, p. 548-549.

³⁹⁵ A análise detalhada da ação da força solar sobre o remo é deveras confusa e incompatível com a física newtoniana, e não deve perturbar o leitor. Cf. *Astronomia nova*, p. 349; KEPLER, 1992-b, p. 549-550.

³⁹⁶ Cf. *Astronomia nova*, p. 349; KEPLER, 1992-b, p. 549.

³⁹⁷ A precessão dos equinócios, lento movimento circular descrito pelos polos da Terra, também é *grosso modo* explicada por Kepler em termos dessa teoria magnética. Cf. *Astronomia nova*, p. 350; KEPLER, 1992-b, p. 551.

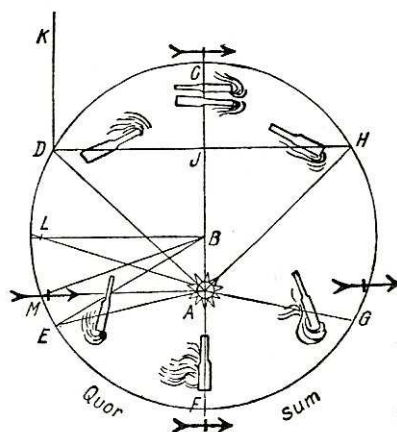


Figura 7.9 No modelo físico do capítulo 57 a força solar é analogicamente representada como a correnteza de um rio, e a potência planetária como um remo que é afetado por essa correnteza. As setas representam o eixo magnético do planeta. *Apud. Astronomia nova*, p. 349.

Esse modelo físico apresenta uma série de problemas, entre os quais o mais sério decorre de sua aplicação à órbita da Terra. Com efeito, a direção do eixo de rotação da Terra é incompatível com a direção das apses de sua órbita de acordo desse modelo, e Kepler é obrigado a se contentar com a possibilidade geral do mecanismo.³⁹⁸ Além disso, a órbita resultante da libração do planeta ao longo da reta que o liga ao Sol não corresponde a uma elipse, mas a uma curva mais larga na região do afélio do que próximo ao periélio, que Kepler denomina *via buccosa*.³⁹⁹

A elipse aparece finalmente, no capítulo 58, sem que Kepler explique muito bem como chegou até ela.⁴⁰⁰ Para que a elipse resulte da combinação do movimento circular com o movimento libratório, Kepler nota que este último deve se dar não na direção que liga o planeta ao Sol, mas na direção perpendicular à linha das apses. Embora a nova configuração geométrica do movimento libratório enfraqueça a explicação causal desse movimento, visto que Kepler é obrigado a empregar uma linha, e não mais o Sol como

³⁹⁸ Cf. *Astronomia nova*, p. 355; KEPLER, 1992-b, p. 559-560. O capítulo 57 da *Astronomia nova* é alvo de um estudo detalhado que esperamos publicar em breve.

³⁹⁹ Cf. *Astronomia nova*, p. 366; KEPLER, 1992-b, p. 575-576.

⁴⁰⁰ Segundo Stephenson, o fator determinante foi a adequação da elipse às hipóteses físicas da nova astronomia, fator que Kepler não menciona aqui. Cf. STEPHENSON, 1987, p. 124-130.

pelo qual ele chega ao real movimento descrito por Marte em torno do Sol a partir dos movimentos aparentes vistos da Terra.

A narrativa da *Astronomia nova* evidencia a importância da hipótese física da força solar no processo de derivação das duas primeiras leis. A introdução de considerações físicas ao lado dos dados da experiência como elementos determinantes das representações geométricas dos movimentos descritos pelos astros torna mais severos os critérios de seleção dessas representações, e conduz ao astrônomo até a determinação final da elipse. A *Astronomia nova* mostra que o movimento real de um planeta pode vir a ser conhecido pelos homens e representado geometricamente de maneira a possibilitar a predição dos fenômenos, desde que toda a força do intelecto humano seja mobilizada na execução dessa tarefa.

Conclusão: das aparências aos movimentos reais

A *Astronomia nova* certamente contém elementos de sobra para justificar o seu título, entre os quais destacamos o papel desempenhado pelo conceito de força solar na construção de representações geométricas precisas e a atribuição de uma forma não-circular ao percurso descrito por um planeta. E no entanto, apesar da grande novidade do conteúdo do livro, o autor insiste em mostrar que a descoberta da órbita elíptica só foi possível após uma série de etapas cumpridas pelos astrônomos que o precederam: a decomposição das espirais observadas em arranjos de círculos mais simples, a construção de modelos geométricos para representar as variações de velocidade dos planetas, as reinterpretações dos círculos com a criação do sistema copernicano, a destruição dos orbes sólidos pelas observações de Tycho Brahe.

Ao longo da guerra contra Marte, a complexidade dos movimentos aparentes do planeta é pouco a pouco resolvida em componentes mais simples, até a determinação da órbita elíptica por ele descrita em torno do Sol. Kepler conclui que a elipse, uma das quatro seções cônicas descritas por Apolônio de Perga, é suficientemente simples e geometricamente tratável para ser associada à forma dos movimentos dos astros no mundo criado. É certo porém que o círculo é uma figura mais simples e simétrica que a elipse, e é por esse motivo que Kepler tem a perspicácia de mostrar ao seu leitor nas duas primeiras partes da *Astronomia nova* que os círculos concêntricos e perfeitamente simétricos estão excluídos desde o início, visto que os astrônomos da Antigüidade já conheciam suficientemente bem os movimentos celestes para representá-los através de círculos excêntricos.

Kepler mostra que os círculos excêntricos não são figuras tão simples como os círculos concêntricos, pois eles possuem um diâmetro preferencial, a linha das apsides.⁴⁰¹ Ele mostra também que se a excentricidade do círculo, observada experimentalmente, deve receber algum tipo de explicação causal quando encarada como um fato do mundo físico, então as dificuldades envolvidas na representação geométrica de uma tal explicação são

⁴⁰¹ Como foi discutido no sétimo capítulo, as combinações de círculos concêntricos equivalentes ao excêntricos também envolvem complicações da mesma ordem.

suficientes para que a própria circularidade seja colocada em causa. Ele propõe uma curva oval assimétrica e indeterminada, cujos detalhes somente serão revelados através do confronto entre dados observacionais e premissas físicas segundo o método muito particular que é narrado na quarta parte da *Astronomia nova*. Desse ponto de vista, a elipse finalmente aparece como uma curva simples, especialmente por suas propriedades geométricas que facilitam a aplicação da lei das áreas.

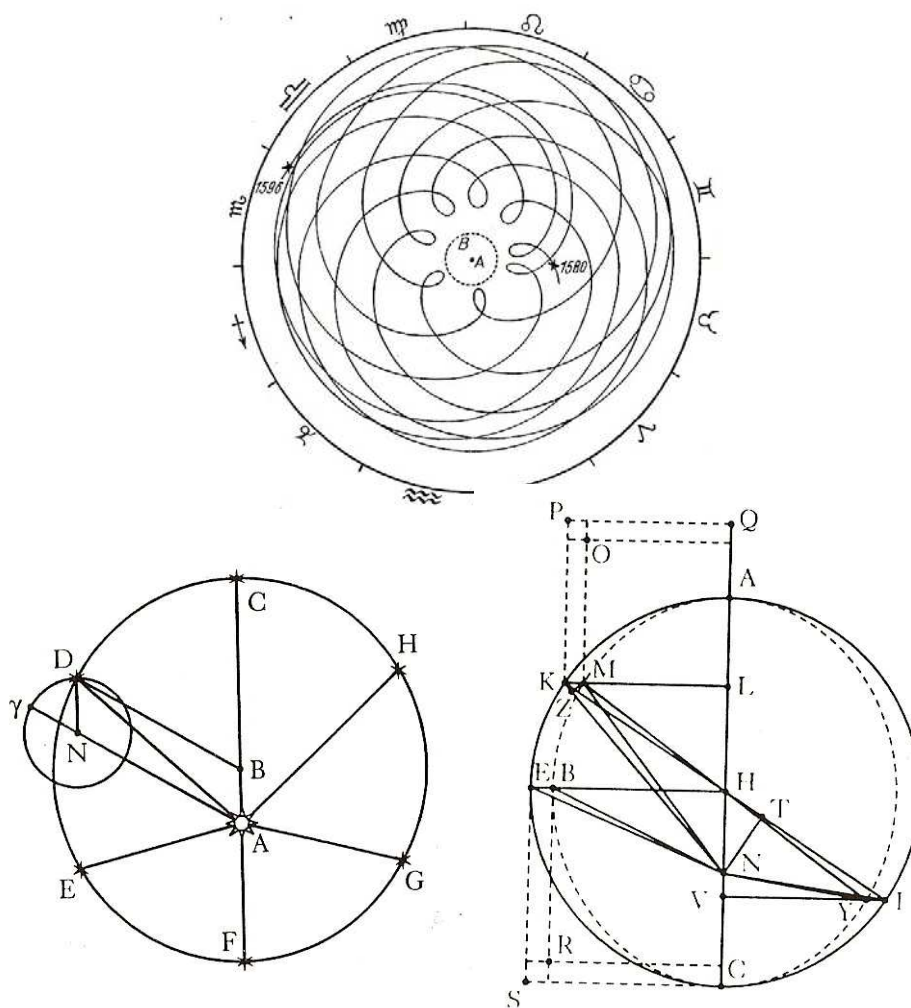


Figura C.1 O argumento da *Astronomia nova* é construído de maneira a contrapor a simplicidade da elipse à complexidade dos movimentos observados. *Apud. Astronomia nova*, p. 64; KEPLER 1992-a, p. 457; 593.

A orientação do argumento da *Astronomia nova* permite que Kepler insira sua física celeste na mesma tradição à qual pertencem Eudoxo, Calipo, Ptolomeu e Copérnico. Todos esses astrônomos contribuíram para a construção do templo de Urânia, que será completado por Kepler com a publicação das *Tábuas Rudolfinas*, em 1627. Kepler vê a astronomia como uma ciência que se desenvolve muito lentamente, ao mesmo tempo em que a própria humanidade que a produz.

Ao contrário do ordinariamente que se afirma, a discussão sobre a astronomia tradicional que ocupa as duas primeiras partes da *Astronomia nova* não é meramente introdutória ou o fruto de circunstâncias estrangeiras ao conteúdo científico da obra. Ao contrário, essa discussão tem uma tripla importância: de um lado, ela permite que o autor apresente sua nova astronomia com um colorido menos extravagante e mostre a continuidade entre as pesquisas de seus predecessores e a sua própria. Ela tem também a finalidade de destruir a falsa idéia da simplicidade dos círculos que Kepler acabaria por abandonar. Uma análise detalhada dos procedimentos empregados na astronomia de posição da Antigüidade demonstra que esses círculos não eram afinal tão simples assim, e Kepler mostra que quando interpretados fisicamente eles se tornam decididamente problemáticos. Finalmente, a discussão revela etapas importantes do tratamento teórico dos dados da observação, a saber, a decomposição das aparências complexas em elementos mais simples e a construção de explicações físicas para esses elementos.

Esperamos ter mostrado que a estrutura narrativa da *Astronomia nova* é moldada pela exposição daquele que podemos chamar o método astronômico de Kepler. Nos dois capítulos iniciais do trabalho discutimos outros textos da autoria de Kepler, onde encontramos idéias que nos parecem importantes para uma justa apreciação da história da guerra contra Marte. O primeiro capítulo traça um panorama das principais teses sustentadas por Kepler no seu primeiro livro escrito em defesa do copernicanismo, o *Mistério cosmográfico*. Entre essas idéias destacam-se a possibilidade de compreensão racional do mundo e a relação de causalidade expressa pelo conceito de alma motriz solar. No segundo capítulo exploramos um texto póstumo escrito por ocasião da chegada de Kepler a Praga, a *Defesa de Tycho contra Ursus*. A distinção entre hipóteses geométricas e

astronômicas, bem como alguns aspectos metodológicos discutidos na *Defesa*, são de grande utilidade para a compreensão da *Astronomia nova*, que tem sua estrutura retórica discutida, em termos gerais, no terceiro capítulo do trabalho.

Ao ler a *Astronomia nova* à luz da *Defesa de Tycho contra Ursus*, pudemos interpretar a guerra contra Marte como a exposição do novo método que Kepler propõe aos astrônomos de seu tempo. Essa interpretação tem a vantagem de tornar manifesta a unidade estrutural do argumento do livro, que longe de se tratar de um conjunto de especulações mais ou menos frutíferas, reunidas segundo critérios mais contingentes do que científicos, é o relato de um percurso orientado desde o primeiro capítulo na direção bem definida que parte das observações para chegar à realidade a elas subjacente. Os meandros desse percurso, as longas discussões acerca dos modelos desenvolvidos pelos astrônomos antigos, o recurso a hipóteses que logo em seguida se revelam problemáticas, tudo concorre para explicitar aspectos que Kepler considera importantes na maneira como ele trabalha a partir das observações de Tycho. A *Astronomia nova* trata de um problema astronômico, a determinação da órbita de Marte a partir das observações, e tem sua estrutura orientada por ele.

Esse problema encontra-se ligado a outros problemas correlatos, como o estabelecimento da forma da atenuação da força motriz solar ou a difícil representação geométrica de seu efeito sobre os planetas. A força solar tem sua formulação discutida no quarto capítulo deste trabalho. A discussão se concentra na analogia entre força motriz e luz, as duas emanções imateriais que partem do Sol, e um apêndice sobre as concepções keplerianas a respeito da natureza da luz foi anexado ao final do trabalho com a intenção de tornar essa discussão mais clara. O quinto capítulo traz uma análise, até onde sabemos sem precedentes, da importância da primeira parte da *Astronomia nova* para o argumento geral do livro. Essa análise baseia-se na tese de que o objetivo primeiro de Kepler ao apresentar a nova astronomia através de um relato de sua guerra contra Marte tenha sido o de expor o seu método de pesquisa o mais detalhadamente possível, e parece confirmá-la. A demonstração da equivalência geométrica das diferentes representações dos movimentos celestes lança o critério de seleção entre elas para o plano da nova física celeste, ou seja, do

tipo de interpretação, em termos de forças que agem à distância, que pode ser associada a cada modelo.

Por outro lado, à luz da *Defesa de Tycho*, percebemos uma nova dimensão na segunda parte da *Astronomia nova*. Além de atacar o círculo e os procedimentos da astronomia tradicional, demonstrando que os melhores modelos possíveis ainda implicam em erros da ordem de 8', demasiado grandes com relação à precisão dos dados disponíveis, Kepler desenvolve também uma análise física desses procedimentos, expondo como funciona na prática a distinção entre hipóteses geométricas e astronômicas e demonstrando que o sucesso da astronomia tradicional na predição dos movimentos observados não faz dela uma teoria capaz de concorrer com a nova interpretação física do heliocentrismo. Finalmente, o sétimo capítulo trata da formulação das duas primeiras leis de Kepler. Mais uma vez, tentamos evitar as trilhas mais pisadas, e procuramos abrir caminho em meio a outras passagens, nos concentrando sobretudo no problema da representação geométrica do movimento resultante da interação da potência intrínseca do planeta com a força solar.

Com efeito, particularmente interessante nos parece a divisão do movimento elíptico em duas componentes, a translação circular impressa pela força motriz emitida pelo Sol e a oscilação linear resultante da interação do magnetismo do planeta com essa força. Por esse expediente, Kepler transporta para o plano das causalidades físicas o tipo de decomposição de um movimento complexo em componentes mais simples que caracteriza o trabalho do astrônomo de posição. Essa decomposição já não diz respeito às aparências, mas a uma realidade ainda mais profunda do que a órbita elíptica, interpretada como o movimento resultante da ação de duas forças, as quais tomadas isoladamente causam movimentos mais simples.

Um dos principais obstáculos que se apresentam à leitura da *Astronomia nova* é a falta de familiaridade do leitor contemporâneo com os problemas tratados pela astronomia da época e com o tipo de diagrama utilizado por Kepler. Kepler foi, nas palavras de Owen Gingerich,

um “astrônomo para astrônomos”.⁴⁰² Para minimizar esse problema, adicionamos ao texto um glossário detalhado onde são explicados os principais termos astronômicos relevantes na derivação da órbita de Marte. Procuramos também reproduzir diretamente do livro algumas figuras particularmente importantes, como por exemplo a curva conchóide empregada por Kepler na determinação do erro resultante da substituição da lei das distâncias, baseada na hipótese física da ação do Sol sobre os planetas, pela lei das áreas, hipótese a princípio vista como uma aproximação.⁴⁰³ É certo que essas figuras são por vezes obscuras e trazem uma série de pontos e ângulos aos quais Kepler simplesmente não faz menção nas discussões a elas relativas – um bom exemplo é a figura 6.2, tirada do capítulo onde Kepler tece uma explicação física para a variação descoberta por Tycho no movimento da Lua. Porém, acreditamos que sua inclusão e explicação no corpo do texto facilite o acesso posterior ao livro de Kepler.

Ao final deste trabalho, observamos que da mesma maneira como Kepler reconhece que a construção da nova astronomia física exigiu a contribuição de gerações e gerações de astrônomos, também a história tem mostrado que a compreensão da *Astronomia nova* depende do trabalho conjunto de gerações de intérpretes. Esperamos contribuir para o acesso de outros estudiosos a esse livro de grande riqueza, no qual ainda restam muitas questões a serem elucidadas. A teoria das latitudes que ocupa a quinta parte do livro ainda não recebeu, até onde sabemos, a devida atenção dos estudiosos⁴⁰⁴, e na derivação das leis persistem capítulos inteiros cujo significado não foi plenamente compreendido. O fato é que Kepler é um autor pouco estudado, especialmente se o compararmos a Galileu ou Copérnico, ainda que desde a segunda metade do século XX o volume de trabalhos acadêmicos dedicados a sua obra tenha se amplificado. Para isso contribuíram enormemente os trabalhos inspiradores de Alexandre Koyré⁴⁰⁵ e C. Wilson⁴⁰⁶, bem como o

⁴⁰² *Kepler was an astronomer's astronomer*. GINGERICH, 1993, p. 329.

⁴⁰³ Kepler se serve da conchóide nos capítulos 40, 43 e 47 da *Astronomia nova*. No presente trabalho a curva é reproduzida na figura 7.3.

⁴⁰⁴ Stephenson dedica algumas páginas à teoria das latitudes em STEPHENSON, 1987, p. 130-137, e Neugebauer discute brevemente o capítulo 69 da *Astronomia nova* em NEUGEBAUER, 1975.

⁴⁰⁵ KOYRÉ, 1961. Jardine traça um interessante panorama das diversas interpretações da astronomia de Kepler desde o século XVIII, e destaca a importância do trabalho de Koyré para a compreensão de sua obra – bem como a importância da obra de Kepler para a constituição do pensamento de Alexandre Koyré em JARDINE, 2000-a.

impulso representado pelo simpósio internacional realizado em homenagem aos quatrocentos anos do nascimento de Kepler, celebrados em 1971.⁴⁰⁷ Destacamos também os estudos de E. J. Aiton, N. Jardine, B. Stephenson e J. Voelkel, listados na bibliografia. No Brasil, Claudemir Roque Tossato é o pioneiro na investigação filosófica da obra de Kepler. Seus trabalhos também encontram-se enumerados na bibliografia. Procuramos complementar os trabalhos desses autores, a quem muito devemos, e se alguma maneira tivermos enriquecido a discussão nossos objetivos terão sido alcançados.

⁴⁰⁶ WILSON, 1989.

⁴⁰⁷ Os trabalhos apresentados nesse simpósio encontram-se reunidos em BEER & BEER, 1975. Eles são citados ao longo do trabalho pelo nome de cada autor.

Apêndice I - da natureza da luz

Quando Kepler desenvolve na *Astronomia nova* a noção de força motriz, ele o faz a partir de analogias com dois modelos de propagações capazes de transportar a influência dos corpos, a luz e o magnetismo. Uma discussão aprofundada sobre a natureza metafísica da luz é o tema do primeiro capítulo da *Parte óptica da astronomia*, ou *Suplemento a Vitelo*⁴⁰⁸ (*Ad Vitellionem paralipomena, quibus astronomiae pars optica traditur*, 1604)⁴⁰⁹, o mais importante tratado de Kepler sobre a óptica.⁴¹⁰ O *Suplemento a Vitelo* haveria de exercer uma grande influência sobre as teorias modernas da percepção. Ali Kepler expõe uma teoria revolucionária da visão, destruindo definitivamente a homogeneidade entre a essência dos objetos e a maneira como eles são percebidos pelo sujeito.⁴¹¹

O *Suplemento a Vitelo* é dividido em onze capítulos que se agrupam em duas grandes partes. A primeira parte trata da ciência da visão, ou óptica, em termos gerais e se estende dos capítulos 1 ao 5. Os capítulos 2, 3 e 4 são consagrados à óptica geométrica: a câmara escura, a reflexão⁴¹² e a refração, respectivamente. O capítulo 5 apresenta o mecanismo da visão proposto por Kepler (e até hoje considerado correto), segundo o qual o olho é um aparelho óptico capaz de projetar na retina uma imagem invertida do objeto observado, em um processo puramente físico de natureza distinta do processo mental pelo qual a imagem projetada é recolhida pelo nervo óptico, apreendida pelo cérebro e reconhecida pela alma do sujeito. Esse processo psicológico (do qual Kepler afirma explicitamente que não irá tratar) introduz uma componente subjetiva na maneira como são vistos os objetos e na maneira como operam os sentidos em geral.

⁴⁰⁸ Vitellio ou Witelo (c. 1220 – c. 1275) é o autor de um importante tratado de óptica do século XIII. Seu *Perspectivae*, originalmente escrito por volta de 1270 e reimpresso três vezes no século XVI, trazia uma síntese dos desenvolvimentos anteriores, principalmente de Ptolomeu e de Alhazen. Cf. CASPAR, 1993, p. 44.

⁴⁰⁹ K.G.W. II.

⁴¹⁰ Kepler ofereceria em 1611 uma justificativa teórica para o emprego do telescópio na astronomia com a publicação da *Dióptrica* (*Dioptrice*), pequeno tratado onde é discutida a passagem da luz por lentes. Os aspectos técnicos da teoria kepleriana de funcionamento do telescópio são discutidos no artigo de MALET, 2003.

⁴¹¹ Sobre as implicações filosóficas da teoria kepleriana da visão Cf. HAMOU, 2002, p. 78.

⁴¹² Traduzimos o termo latino *repercussio* como reflexão, que nos parece mais adequado para designar o fenômeno em jogo do que o termo *repercussão*, escolhido por Cathérine CHEVALLEY, responsável pela tradução francesa do *Suplemento a Vitelo*.

Os capítulos 6-10 do *Suplemento a Vitelo* expõem a parte óptica da astronomia propriamente dita. No capítulo 6 Kepler discute a luz dos corpos celestes, no capítulo 7 os eclipses da Lua, no capítulo 8 os eclipses solares, no capítulo 9 as paralaxes dos corpos celestes, no capítulo 10 os fundamentos ópticos dos movimentos dos corpos celestes e no capítulo 11 a mensuração dos diâmetros da Terra, do Sol e da Lua a partir dos eclipses.

Na carta dedicatória a Rudolfo II, Kepler afirma que irá tratar no *Suplemento* de dois problemas relativos à óptica levantados por Brahe e de cuja compreensão dependeria a confiabilidade das medições astronômicas: a refração da luz dos astros (*refractione luminis siderum*) e a diminuição do diâmetro da Lua nos eclipses (*de diminutione diametri Lunae in Solis deliquiis*).⁴¹³ Antes de abordar esses problemas Kepler desenvolve, no primeiro capítulo do *Suplemento a Vitelo*, uma longa discussão sobre a natureza da luz, na qual ele a define como uma força (*virtus*) ou *species* imaterial. É dessa discussão que trataremos aqui.

O ponto de partida para o estudo da natureza da luz no capítulo I do *Suplemento a Vitelo* é a sua forma esférica. O capítulo começa por uma exposição cosmogônica, pela qual Kepler explica a forma esférica do universo e sua coincidência com a forma esférica da luz. Deus criou o mundo mais perfeito possível lhe concedendo a forma mais semelhante à sua própria forma, a esfera, a mais perfeita das figuras geométricas.⁴¹⁴ Reproduzimos a passagem inteira:

Em primeiro lugar, todas as coisas da natureza tiveram de reproduzir o Deus criador na medida em que isso lhes fosse permitido pelas condições ditadas por suas essências. Pois o Criador sapientíssimo, procurando conferir a tudo a maior perfeição, beleza e excelência possíveis, nada encontrou de mais belo ou de mais excelente do que si mesmo. Por isso, quando dirigiu seu pensamento ao mundo corpóreo, destinou-lhe a forma mais parecida possível com a sua própria. Assim surgiu todo o gênero das quantidades, e com ele a distinção entre o curvo e o reto, e a mais excelente das figuras,

⁴¹³ Cf. K.G.W. II, p. 8.

⁴¹⁴ A formulação que encontramos aqui é ligeiramente diferente daquela exposta no segundo capítulo do *Mistério cosmográfico*. Cf. *Mistério cosmográfico*, p. 23-25; KEPLER, 1992 - a, p. 92-95.

a superfície Esférica. Com efeito, na sua formação o Criador sapientíssimo se ocupou prazerosamente de reverenciar a sua imagem trina. Assim entendemos que a geração se dá a partir do ponto central, que é quase como alguma fonte esférica, [sendo] a superfície a imagem do ponto íntimo, e devendo cada caminho para isso ser imaginado como uma emanção infinita do ponto continuamente para fora de si mesmo, até que seja atingida a igualdade entre todas as emanções, o ponto se comunicando a uma dada amplitude de tal maneira que ponto e superfície, considerando-se a relação inversa entre amplitude e densidade, são iguais. De modo que sob todos os aspectos existe entre o ponto e a superfície uma identidade absolutíssima, uma união estreitíssima, harmonia, continuidade, relação, proporção e simetria as mais belas. E embora o Centro, a Superfície e o Intervalo sejam claramente três, eles porém são um e nenhum pode faltar, mesmo em pensamento, sem que o todo seja destruído.⁴¹⁵

A luz imita o movimento de criação do mundo. Ela emana do Sol, corpo físico que ocupa o centro do universo, se afastando da fonte por meio de infinitos raios lineares dirigidos a todas as direções, e formando uma superfície esférica se expandindo em direção à esfera das estrelas fixas.⁴¹⁶ Como observa Cathérine Chevalley, a emanção esférica do centro em direção à periferia explica de maneira estruturalmente idêntica a gênese geométrica da esfera, a gênese do mundo e a gênese do Cristo.⁴¹⁷

⁴¹⁵ *Primum omnium rerum natura Deum conditorem, quantum quaeque suae essentiae conditione potuit, repraesentare debuit. Nam cum Conditor sapientissimus omnia studeret quàm optima, ornatissima praestantissimaque efficere: nihil seipso melius ornatiusque, nihil praestantius reperit. Propterea cum corporeum mundum agitare animo, formam ei destinavit sibi ipsi quam similimam. Hinc ortum totum quantitatum genus, et in eo curui rectique discrimina, praestantissimaque omnium figura, Sphaerica superficies. Nam in ea formanda lusit sapientissimus Conditor adorandae suae Trinitatis imaginem. Hinc Centri punctum, est Sphaerici quaedam quasi origo, superficies puncti intimi imago, et via ad id inveniendum, quaeque infinito puncti egressu ex se ipso, vsque ad quandam omnium egressuum aequalitatem, gigni intelligitur, puncto se in hanc amplitudinem communicante, sic ut punctum et superficies, densitatis cum amplitudine commutata proportionem, sint aequalia: Hinc est vndique punctum inter et superficiem absolutissima aequalitas, arctissima unio, pulcherrima conspiratio, connexus, relatio, proportio, commensus. Cumque Tria sint planè, Centrum, Superficies et Intervallum; ita tamen vnun sunt, ut nullum ne cogitatu quidem abesse possit, quin totum destruat. K.G.W. II, p. 19.*

⁴¹⁶ A semelhança com a propagação da luz descrita por Grosseteste no seu *De Luce* é marcante: “A luz, com efeito, por si própria se espalha em todos os sentidos, de maneira que a partir do ponto luminoso uma esfera de luz tão grande quanto se queira é subitamente engendrada, a menos que um corpo opaco se interponha.” Roberto Grosseteste, *De Luce*, apud. WEBER (1981), p. 15.

⁴¹⁷ Cf. KEPLER, 1980, p. 54-55.

A gênese do universo é explicada por uma emanção do ponto central para fora de si mesmo. Essa emanção, através da qual é explicada a criação do mundo, é essencialmente diferente da emanção das espécies imateriais, uma vez que o mundo é constituído de matéria e que a sua criação se deu em um momento definido do passado. Os corpos existentes no mundo criado são limitados por suas superfícies e não são capazes de se multiplicar para além desses limites. Eles não são dotados de emanções materiais. Alguns deles no entanto emitem certas potências imateriais, como o magnetismo e a luz, capazes de se propagar esfericamente no espaço, para além dos limites dos corpos onde se originam. Assim, o Sol não é entretanto o único corpo do qual emana uma potência imaterial. As tochas e os imãs, por exemplo, emitem suas potências imateriais como demonstra a experiência, a saber, a luz e a força magnética.

A propagação das potências imateriais obedece a leis geométricas. Uma fonte luminosa emana a luz em torno dela como uma superfície esférica, através da projeção (*ejaculatio*) de um número infinito de raios retilíneos e iguais que constituem o seu movimento. Enquanto a luz é interpretada como uma superfície esférica, interpretação em grande medida derivada da superioridade ontológica de que desfrutam a esfera na geometria e as potências imateriais no universo físico, os raios, úteis na medida em que constituem um sujeito tratável pela óptica geométrica tradicional, são derivados da esfera e definidos a partir dela. “Pois dissemos que a luz aspira à forma da Esfera. Mas a verdadeira gênese geométrica desta [figura] consiste justamente na igualdade dos segmentos pelos quais o ponto central se espalha até a superfície, e estes segmentos são linhas retas.”⁴¹⁸ Em primeiro lugar, por razões metafísicas, é preciso que a luz seja esférica. Em seguida, por um raciocínio geométrico, os raios luminosos da óptica geométrica tradicional são explicados como o movimento de expansão dessa superfície esférica para fora do centro. Os raios de luz não poderiam ser linhas curvas, ou a superfície formada pelo conjunto das extremidades das linhas não seria perfeitamente esférica. Kepler introduz assim uma explicação por meio de uma causa

⁴¹⁸ *Nam diximus affectari à luce figurationem Sphaerici. Eius verò genesis verè Geometrica consistit in aequalitate interuallorum, per quae punctum medium in superficiem diditur: Illae verò sunt rectae lineae.* K.G.W. II, p. 20, prop. IV.

geométrico-arquetípica para o postulado da óptica geométrica segundo o qual a luz se propaga sempre por linhas retas.

Assim como ele não aceita na *Astronomia nova* a bissecção do equante a não ser que ela possa ser explicada a partir de causas, também aqui, no *Suplemento a Vitelo*, Kepler não aceita a forma retilínea da propagação dos raios luminosos a menos que esta possa ser provada por princípios mais gerais. No caso, a demonstração decorre da superioridade ontológica da forma esférica, forma conferida na criação tanto ao mundo quanto à potência imaterial que o ilumina. A forma esférica se acorda arquetipicamente à função da luz de iluminar o mundo esférico, limitado pela esfera das estrelas.

A propagação da luz é portanto retilínea. “As linhas dessas projeções são retilíneas, e as chamamos raios.”⁴¹⁹ Mas os raios de luz apenas representam o movimento da superfície esférica em expansão, e não constituem uma parte da luz em si: “O raio luminoso não é de modo algum a própria luz emanada. Pois pela proposição 4 o raio nada é além do movimento da luz.”⁴²⁰ Assim como o movimento de um corpo físico pode ser uma linha reta ou qualquer outra curva, o movimento da luz é sempre uma linha reta, o raio luminoso.⁴²¹ As superfícies esféricas semelhantes à superfície do corpo do Sol são continuamente geradas de modo que cada superfície luminosa, ao se afastar do Sol com velocidade infinita, é imediatamente precedida e seguida por outras superfícies semelhantes, que também se afastam do Sol com velocidade infinita. Desse modo, a iluminação do espaço tridimensional se dá por meio de superfícies esféricas bidimensionais se propagando na direção radial.

“A luz é por si mesma apta a se propagar até o infinito.”⁴²² Ora, a luz é imaterial⁴²³ e, sendo desprovida de peso, não está sujeita a nenhuma resistência. A luz é definida

⁴¹⁹ *Liniae harum eiaculationum rectae sunt, dicantur radij.* K. G. W. II, p. 20, prop. IV.

⁴²⁰ *Lucis radius nihil est de luce ipsa egrediente. Nam radius per 4. nihil aliud est nisi ipse motus lucis.* K.G.W. II, p. 21, prop. VIII.

⁴²¹ Como a luz se projeta esfericamente a partir da fonte, seu movimento é rigorosamente representado por infinitos raios luminosos.

⁴²² *Lux seipsa in infinitum progredi apta est.* K.G.W. II, p. 20, prop. III.

geometricamente como uma superfície esférica em expansão radial a partir da fonte. Cada ponto dessa superfície corresponde a um raio que a liga ao Sol, e cada raio dessa esfera é um raio luminoso. A luz participa portanto das categorias da quantidade e da densidade e pode ser infinitamente dividida, sem desaparecer:

Com efeito, como ela [a luz] participa da quantidade e da densidade de acordo com o que precede, ela não poderá se anular para nenhuma amplitude : pois a quantidade, assim como a densidade, se divide ao infinito.⁴²⁴

Apesar de sua imaterialidade, a luz participa dos gêneros quantidade e da densidade. Podemos conhecer sua densidade em qualquer ponto do espaço compreendido entre o Sol e as estrelas fixas, pois esta depende diretamente da área que a luz deve cobrir.

Kepler acrescenta ainda uma outra razão pela qual os raios luminosos não podem ser curvos, devendo ser rigorosamente retilíneos : a natureza sempre procede pelo caminho mais curto – isto é, retilíneo, quando se trata da união e separação dos corpos, como nos movimentos dos corpos graves em direção à Terra ou do aço (*chalybs*) em direção ao imã. Considerando a luz seja na medida em que ela se afasta do Sol, seja na medida em que se aproxima dos corpos iluminados, o caminho mais curto é sempre a linha reta que une a fonte a cada objeto iluminado. No universo esférico de Kepler este caminho será sempre um dos infinitos raios que partem do Sol em direção à esfera das estrelas fixas. Cada uma dessas retas é um raio luminoso.

A velocidade de propagação da luz é infinita, o que Kepler expressa pela afirmação de que “o movimento da luz não se dá no tempo, mas em um instante.”⁴²⁵ Com efeito, em virtude de sua imaterialidade, a luz não está sujeita a nenhuma resistência do meio, se movendo

⁴²³ A imaterialidade da luz é assegurada pelo fato de que os corpos que emitem luz não experimentam um enfraquecimento de suas potências emissoras, como ocorre no caso de emissões materiais, tais como os odores. Cf. CHEVALLEY, In: KEPLER, 1980, p. 34 .

⁴²⁴ *Cum enim quantitatis et densitatis sit particeps, per superiora, nullâ amplitudine in nihilum abire poterit : quantitas enim, et sic densitas, divisione in infinitum abit.* K.G.W. II, p. 20, prop. III.

⁴²⁵ *Lux motus non est in tempore, sed in momento.* K.G.W. II, p. 21, prop. V.

instantaneamente.⁴²⁶ E graças a sua velocidade infinita a luz só existe realmente na fonte que a emite e nos corpos iluminados: “...o raio não está no diáfano (na medida em que ele é diáfano), mas ali esteve, ou quase esteve. Ele só está realmente nas cores e nas superfícies das coisas.”⁴²⁷

Na sua propagação, “a luz é atenuada transversalmente (*in latum*) conforme ela se afasta do centro.”⁴²⁸ Os raios pelos quais ela se projeta são infinitos em número, mas eles se encontram todavia mais concentrados em uma superfície próxima do centro luminoso do que em uma superfície mais afastada. Em compensação, os raios em si mesmos não experimentam nenhuma atenuação; “ao se afastar do centro, o raio de luz não sofre nenhuma atenuação no sentido de sua propagação [*in longum*], isto é, ele não se torna mais raro e esparso conforme se torna mais longo, pelo menos não por se tornar mais longo.”⁴²⁹ Como ela é uma espécie imaterial, a luz é apta a se propagar até o infinito. E porque ela é uma superfície esférica e seus raios são sujeitos à geometria da esfera, eles não podem se enfraquecer ao atravessar o espaço, mas devem se conservar sempre idênticos a si mesmos, se afastando uns dos outros conforme a distância ao centro aumenta, mas conservando seu vigor para que a forma esférica da superfície não sofra nenhuma deformação.

Se a luz é uma superfície esférica e se os raios luminosos não sofrem nenhuma atenuação ao se afastar da fonte, então a intensidade da luz a uma distância determinada do centro depende da área da superfície esférica correspondente a essa distância.

⁴²⁶ Aqui, como em outros lugares, Kepler se serve do princípio dinâmico aristotélico que pode ser escrito como $V = F/R$; onde V é a velocidade do móvel, F é o impulso responsável pelo movimento e R é a resistência do meio no qual se dá o movimento. Se a resistência for igual a zero (o que ocorre para as forças imateriais se propagando no ar) a velocidade correspondente será infinita.

⁴²⁷ “...radius in perspicuo (quatenus perspicuum) non est, sed fuit, vel quasi fuit. Est verò in solis rerum coloribus et superficiebus. K.G.W. II, p. 40.

⁴²⁸ *Luci cum discessu à centro accidit aliqua attenuatio in latum.* K.G.W. II, p. 21, prop. VI.

⁴²⁹ *Lucis radio cum discessu à centro nulla accidit attenuatio in longum: hoc est, non quo longior radius hoc rarior seu sparsior, propter quidem hanc ipsam longitudinem.* K.G.W. II, p. 21, prop. VII. Essa posição é mantida na *Astronomia nova*. A luz se propaga por todo o universo sem sofrer nenhuma perda. Sua atenuação se deve somente à divergência entre os raios, que depende da área da superfície esférica correspondente a cada distância ao Sol.

Cf. K.G.W. III, p. 250; KEPLER 1992-b, p. 397.

Dadas duas superfícies esféricas, uma mais ampla e a outra mais estreita, e no centro das quais está uma fonte de luz, assim como [a área da] a superfície menor está para [a área da] a superfície maior, assim a intensidade ou densidade dos raios de luz na superfície maior estará para a intensidade ou densidade dos raios de luz na superfície menor, isto é, inversamente.⁴³⁰

Como a área da superfície esférica é igual a $4/3 \pi r^2$, onde r é a distância ao centro, a intensidade ou densidade da luz diminui com a distância ao quadrado.⁴³¹ Isso quer dizer que considerando dois pontos situados a distâncias diferentes de uma fonte central, a relação entre as densidades da luz em cada ponto será inversa à relação entre as áreas das superfícies esféricas correspondentes a esses pontos, e portanto inversamente proporcionais às respectivas distâncias elevadas ao quadrado. Porque os raios não são atenuados em sua propagação através do espaço existe a mesma quantidade de luz em uma superfície grande e em uma superfície pequena. A densidade da luz emitida por uma fonte qualquer (que podemos chamar de ρ_{lux}) depende somente da área da superfície na qual ela está distribuída, variando com a distância (r) segundo a expressão $\rho_{lux} \propto 1/r^2$.⁴³²

Ao fim do primeiro capítulo do *Suplemento a Vitelo*, Kepler acrescenta um apêndice refutando a teoria da visão apresentada por Aristóteles no segundo livro do *De anima*, capítulo VII. Ali ele trata do papel do espaço na propagação da luz – discussão que pode ser estendida a outras potências imateriais, como a força motriz.

Segundo Kepler, na teoria aristotélica o meio intermediário participa ativamente do mecanismo da visão: “A visão (o movimento do instrumento do qual resulta a visão) se faz

⁴³⁰ *Sicut se habent sphaericae superficies, quibus origo lucis pro centro est, amplior ad angustiore: ita se habet fortitudo seu densitas lucis radiorum in angustiori, ad illam in laxiori sphaerica superficie, hoc est, conuersim.* K.G.W. II, p. 22, prop. IX.

⁴³¹ Essa lei de atenuação não vale para a vitude motriz. Veremos que Kepler, por ter mantido o princípio dinâmico aristotélico de proporcionalidade entre a velocidade de um móvel e o impulso que o coloca em movimento, se viu obrigado a introduzir uma imperfeição em sua analogia, fazendo a atenuação da força motriz inversamente proporcional à distância ao Sol e não a essa distância ao quadrado.

⁴³² Kepler corrige aqui a relação linear de proporcionalidade entre a densidade da luz e a distância da fonte ($\rho_{lux} \propto 1/r$) que ele havia sustentado anos antes no capítulo 20 do *Mistério cosmográfico*. Cf. K.G.W. I, p. 71.

quando o instrumento do sentido sofre o efeito do [meio] intermediário.”⁴³³ Assim como os odores e os sons, que não podem ser percebidos a não ser que exista um meio capaz de transmitir essas informações, também a visão depende da existência de um meio diáfano entre o corpo e o olho. A luz é definida por Aristóteles como o ato próprio do diáfano na medida em que ele é diáfano. A fonte luminosa coloca o meio em movimento e este movimento, por sua vez, coloca o olho em movimento. O ato do diáfano, a transmissão do movimento entre a fonte e o olho, é indispensável para a visão, e se o meio fosse de alguma maneira retirado a visão seria impossível.⁴³⁴

Kepler não acredita que o meio possa contribuir para a visão, mas que, ao contrário, ele sempre age no sentido de impedi-la e obstruí-la. Quanto mais o olho sofrer o efeito do meio intermediário, menos ele vai ver; a visão perfeita corresponderia à situação em que o olho em nada padecesse do meio.⁴³⁵ Mais tarde veremos que, quando se trata da força motriz, Kepler também se recusa a assumir que o espaço intermediário possa desempenhar um papel ativo em sua propagação. Seu espaço, esférico e limitado pela esfera das estrelas fixas, não é dotado de nenhuma de nenhuma propriedade. A organização e os movimentos dos corpos (os planetas) nesse espaço seguem proporções determinadas por princípios extraídos da geometria euclidiana e da teoria musical, mas o espaço em si é inerte, e o meio que o preenche (o éter) também não participa ativamente da propagação das forças imateriais. O som, que é mais próximo da matéria e por isso sofre mais o efeito do meio, se torna mais fraco conforme o ouvido se afasta da fonte. Ora, como um aumento na causa deve implicar em um aumento no efeito, resulta que o meio é antes um entrave à propagação do som. Com efeito, contrariamente ao que faz Aristóteles, é preciso definir o som, a luz e as outras forças imateriais como um tipo de escoamento, para que os órgãos sensitivos possam sofrer o efeito dessas forças sem que o meio participe ativamente dos mecanismos de percepção. Sua

⁴³³ *Itaque fit visio (motio instrumenti quam sequitur visio) cum sensorium instrumentum aliquid ab intermedio patitur.* K.G.W. II, p. 39.

⁴³⁴ Cf. K.G.W. II, p. 38-39.

⁴³⁵ *Quo plus oculus patitur (visionis causâ) ab intermedio, hoc minus rectè et perspicuè res trans illud uidebuntur. Tunc itaque perfectissima fit visio, cum oculus planè nihil ab intermedio patitur.* K.G.W., II, p. 42.

species se projeta para fora da fonte como um escoamento, como demonstra o emprego do termo do termo *effluxus*⁴³⁶.

Se o Sol está presente no ar, e não obstante ele permanece fixo no céu, ele estará portanto presente no ar através de um fluxo. A não ser que alguma filosofia oculta se esconda por trás dessas palavras; o que pode agradar alguém que gosta do desconhecido, embora aqueles que aspiram ao conhecimento não se satisfaçam com palavras vazias.⁴³⁷

Kepler não admite a possibilidade de existência do vazio. Os meios diáfanos, que impedem o mínimo possível o escoamento das forças imateriais, foram criados para que estas possam se difundir o melhor possível em um mundo onde não existem espaços vazios e onde a matéria sempre age no sentido de impedir a propagação. O éter é imaginado por Kepler como um meio fluido semelhante ao ar. A existência do vazio é refutada, mas não como na teoria da visão de Aristóteles, onde o meio desempenha um papel ativo na propagação da luz. Em todo caso existe sempre um meio diáfano preenchendo o espaço atravessado pelas forças imateriais, e esse meio sempre age no sentido de impedir a propagação dessas forças. A imaterialidade da luz também determina a sua interação com os corpos materiais, que se dá de três maneiras: como ela é uma superfície esférica, a luz interage geometricamente com as superfícies dos corpos, iluminando-as.⁴³⁸ A refração é assim explicada como o efeito sofrido pela luz ao atravessar a superfície que separa dois meios⁴³⁹, enquanto a reflexão é o resultado do encontro da luz com uma superfície refletora.⁴⁴⁰ Os corpos coloridos, por sua vez, participam da natureza da luz tendo sido a cor definida como ‘luz em potência que jaz no interior dos corpos’.⁴⁴¹ A iluminação da cor é um fenômeno que se dá no interior dos corpos e todo corpo colorido é, em alguma medida, transparente.⁴⁴² A iluminação dos corpos

⁴³⁶ Ver por exemplo, as proposições I e II deste primeiro capítulo: *Luci effluxus vel ejaculatio competit à sua origine in locum distantum*. K.G.W. II, p. 20, prop. I; *Punctum quodlibet infinitis numero lineis effluit*. K.G.W. II, p. 20, prop. II.

⁴³⁷ *Si Sol est in aëre praesens, et tamen affixus in coelo, per effluxum igitur in aëre praesens erit. Nisi forte occultae philosophiae quippiam in his admirabilibus latet verbis: quod quidem admiretur incognitum cui lubuerit, doctrinae cupidi verbis inanibus non satiantur*. K.G.W. II, p. 40.

⁴³⁸ Cf. K.G.W. II, p. 22; KEPLER, 1980, p. 113.

⁴³⁹ Cf. K.G.W. II, p. 26-27; KEPLER, 1980, p. 119-121.

⁴⁴⁰ Cf. K.G.W. II, p. 25; KEPLER, 1980, p. 117-118.

⁴⁴¹ Cf. K.G.W. II, p. 23; KEPLER, 1980, p. 114.

⁴⁴² Kepler explica as cores por meio de pequenas superfícies existentes no interior dos corpos, capazes de interagir com a luz. Neste ponto a influência de Roberto Grosseteste é nítida. Cf. CROMBIE, 1971, p. 111.

é um processo instantâneo e recíproco, isto é, ao mesmo tempo em que ilumina os corpos a luz é por eles afetada, sendo desviada e colorida. Finalmente, o calor é a ação física da luz sobre a matéria dos corpos.⁴⁴³ Enquanto a iluminação dos corpos é um processo recíproco, o aquecimento dos corpos não é recíproco; a matéria dos corpos é aquecida pela ação da luz, mas esta não é afetada nesse processo. A ação física da luz sobre os corpos tem o efeito de clareá-los e destruí-los. O aquecimento dos corpos pela ação da luz é um processo que requer tempo para se concretizar, pois a matéria requer tempo para ser afetada. De maneira semelhante, o clareamento e destruição dos corpos, efeitos duradouros da ação física da luz sobre a matéria, também necessitam de tempo para afetar os corpos de maneira significativa.

⁴⁴³ Cf. K.G.W. II, p. 34-36; KEPLER, 1980, p. 135-136.

Apêndice II - glossário de termos astronômicos⁴⁴⁴

Afélio: ponto na órbita excêntrica de um corpo celeste no sistema heliocêntrico no qual este corpo está mais afastado do centro do mundo, ocupado pelo Sol. Na astronomia copernicana o afélio se reporta ao sol médio, o centro da órbita da Terra, ponto geométrico ligeiramente afastado do corpo solar. Kepler substituiu o sol médio pelo sol aparente na determinação dos afélios e periélios.

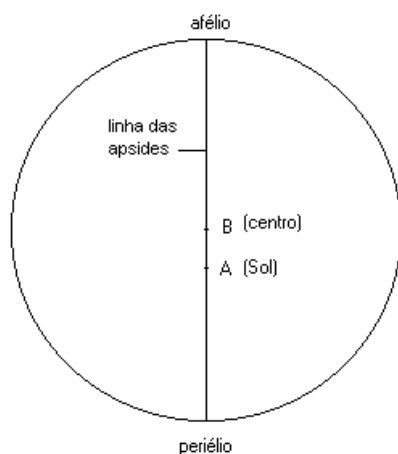


Figura G.1 O afélio é ponto mais distante do Sol em uma órbita excêntrica, enquanto o periélio é o ponto mais próximo dele. A linha que liga esses dois pontos é denominada linha das apsides.

Ano: Período no qual o Sol completa a sua revolução em torno da Terra. **ano sideral:** período que o Sol leva, em seu movimento aparente, para retornar à mesma posição com relação ao fundo de estrelas fixas. **ano tropical:** tempo que o Sol leva, em seu movimento aparente, para retornar ao equinócio vernal. Em virtude do movimento de precessão dos equinócios o ano sideral é ligeiramente mais longo do que o ano tropical.

Anomalia: 1. ângulo que define a posição de um astro, geralmente medido a partir do apogeu ou do afélio. 2. o mesmo que variação. **anomalia excêntrica:** distância angular de um planeta até o afélio medida a partir do centro da órbita circular excêntrica. **anomalia**

⁴⁴⁴ As fontes empregadas na elaboração deste glossário são: SZCZECINIARZ, 1998; MOURÃO, 1995; ÉVORA, 1993; PEDERSEN, 1993; GINGERICH, 1992; STEPHENSON, 1987; NEUGEBAUER, 1983; 1969.

média: distância angular do planeta até o afélio (ou apogeu) caso o seu movimento angular em torno do Sol fosse uniforme. Na astronomia ptolomaica a anomalia média é dada pela distância angular do planeta até o afélio medida a partir do ponto equante. A anomalia média equivale matematicamente a uma medida de tempo, desde que se faça equivaler um período completo a cada revolução de 360° . **anomalia verdadeira:** distância angular do planeta até o afélio medida a partir do corpo central – no caso do sistema heliocêntrico de Kepler, o Sol. **anomalia co-igualada:** termo freqüentemente empregado por Kepler para designar a anomalia verdadeira. Para maior clareza, no corpo do texto escrevemos sempre anomalia verdadeira.

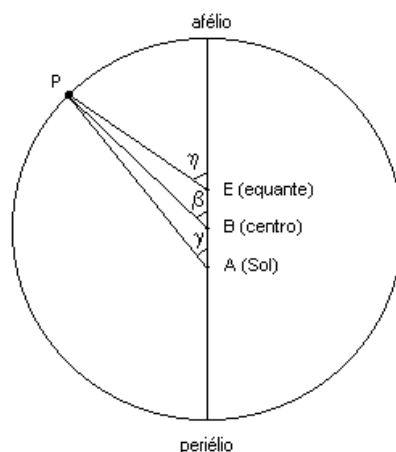


Figura G.2 Na órbita circular e excêntrica representada acima o ângulo γ , medido a partir do Sol, é a anomalia verdadeira ou co-igualada do ponto P, o ângulo β , medido a partir do centro do círculo, é a sua anomalia excêntrica, e o ângulo η , medido a partir do ponto equante, é a anomalia média do ponto.

Apogeu: o ponto na órbita excêntrica de um corpo celeste no qual este se encontra mais afastado da Terra.

Apolônio, teorema de: O matemático grego Apolônio de Perga (c. 262 – c. 190 a.C.), autor das *Cônicas*, expôs a equivalência entre um círculo excêntrico e um círculo concêntrico associado a um epíciclo (sistema epíciclo-deferente), dois mecanismos computacionais capazes de reproduzir a variação aparente de velocidade observada no movimento do Sol, responsável pela duração desigual das quatro estações do ano. Os dois modelos geométricos são equivalentes desde que sejam satisfeitas as seguintes condições: o

raio do excêntrico $\gamma\beta$ deve ser igual ao raio do deferente AB, o raio do epiciclo BC igual à excentricidade do excêntrico $\beta\alpha$ e a linha das apsides do excêntrico deve sempre permanecer paralela à linha que liga o planeta ao centro do epiciclo.

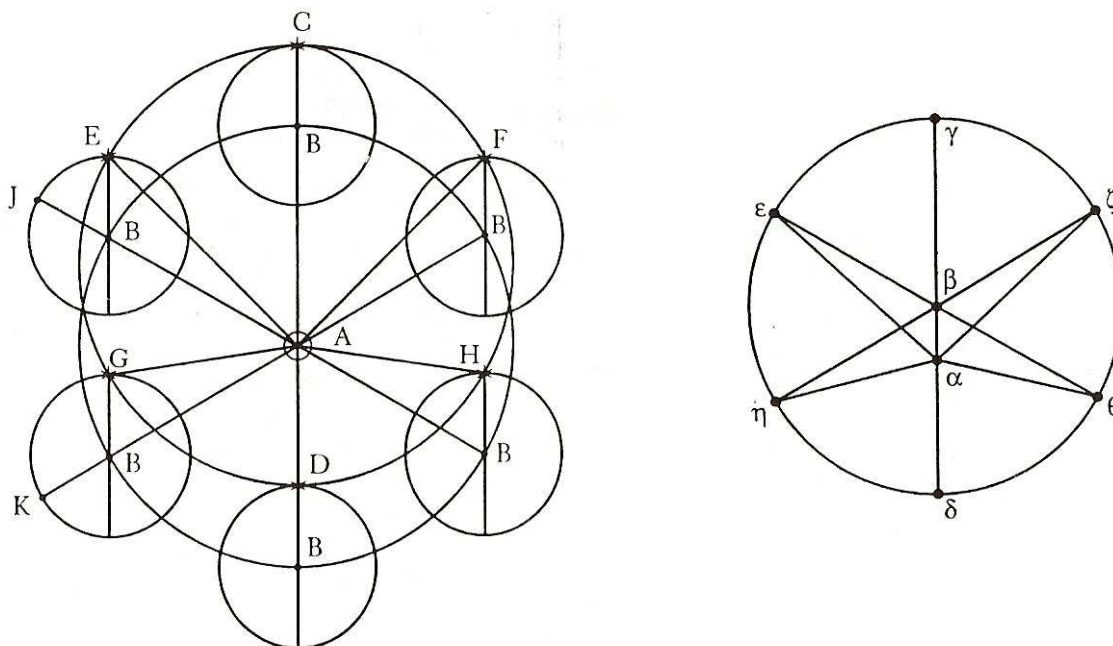


Figura G.3 Pelo teorema de Apolônio, desde que sejam satisfeitas certas condições geométricas o movimento do Sol sobre o círculo excêntrico $\gamma\zeta\theta$ de excentricidade $\alpha\beta$ é equivalente ao movimento CFH do Sol sobre um epiciclo de centro B que por sua vez gira sobre um círculo concêntrico em torno da Terra A. *Apud*. KEPLER, 1992-b, p. 123.

Essa última condição é satisfeita se tanto o valor numérico da velocidade angular do planeta sobre o epiciclo quanto aquele da velocidade angular do centro do epiciclo sobre o círculo concêntrico forem iguais ao valor da velocidade do planeta no círculo excêntrico. A velocidade do planeta no excêntrico e a velocidade do centro do epiciclo têm o mesmo sentido, enquanto a velocidade do planeta no epiciclo tem o sentido contrário. O teorema de Apolônio é exposto por Ptolomeu no terceiro livro do *Almagesto*, por Copérnico no terceiro livro do *de Revolutionibus* e por Kepler no início do segundo capítulo da *Astronomia nova* e no primeiro capítulo da *Defesa de Tycho*.

Apsides: os dois pontos na órbita de um corpo celeste onde ele está respectivamente mais afastado (afélio, apogeu) e mais próximo (periélio, perigeu) do centro do mundo. **linha das**

apsides: a linha que une esses dois pontos passando pelo centro da órbita. (vide figura G.1)

Atraso: (Latim *mora, ae*) tempo necessário para que um planeta percorra um pequeno arco em uma determinada região de sua órbita.

Axioma platônico: princípio da astronomia antiga segundo o qual os movimentos celestes são circulares ou composições de movimentos circulares.

Bisecção do equante: na astronomia ptolomaica, o ponto equante está situado sobre a linha das apsides, em uma posição simétrica àquela do observador com relação ao centro do círculo excêntrico.

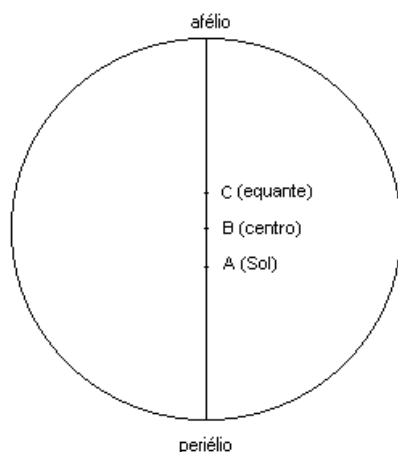


Figura G.4 Na astronomia de Ptolomeu as distâncias do observador A e do ponto equante E ao centro B do círculo excêntrico são iguais.

Cometa: corpo celeste que surge próximo ao Sol, ali permanecendo por alguns dias para em seguida desaparecer. Tycho demonstrou que os cometas se situam acima da esfera da Lua, e portanto na região celeste, e que seus percursos são elipses muito alongadas.

Concêntrico: círculo cujo centro é ocupado pelo corpo central. No sistema ptolomaico um círculo concêntrico tem a Terra em seu centro, enquanto no sistema copernicano o centro de um círculo concêntrico é ocupado pelo Sol.

Conjunção: situação em que dois corpos celestes encontram-se alinhados em uma mesma direção com relação à Terra. Se um dos corpos for o Sol, o outro naturalmente não será

visível. A distância entre os planetas externos e a Terra é máxima quando eles são vistos em conjunção com o Sol.

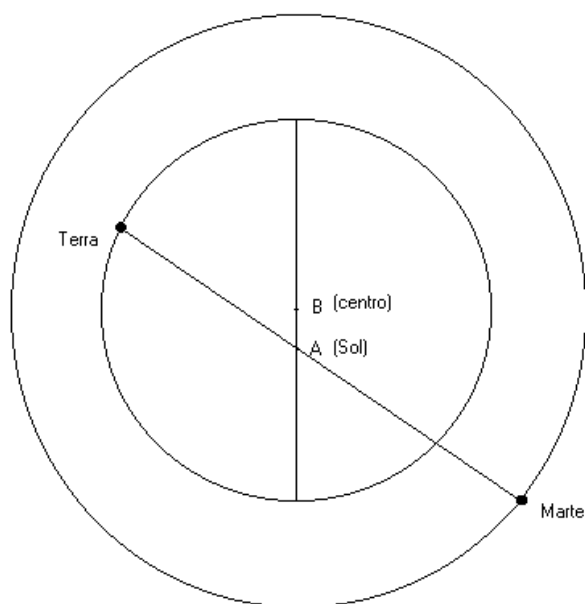


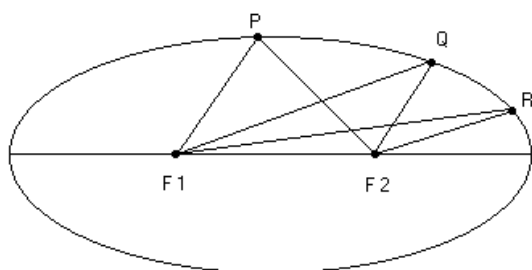
Figura G.5 Quando em conjunção com o Sol, Marte não é visível.

Eclipse: ocultação do Sol ou da Lua. Os eclipses solares ocorrem quando a Lua se interpõe entre o Sol e a Terra. Os eclipses lunares resultam da interposição da Terra entre o Sol e a Lua, impedindo a iluminação desta.

Eclíptica: no sistema geocêntrico, o círculo percorrido pelo Sol ao longo do ano, inclinado de $23^{\circ}27'$ em relação ao equador celeste. O nome vem do fato de que os eclipses só ocorrem quando a Lua está muito próxima a este círculo. No sistema heliocêntrico a eclíptica é o plano da órbita da Terra.

Efeméride: Tabela onde são determinadas as posições dos astros ao longo do ano, empregada nas previsões astrológicas. Uma das principais tarefas dos astrônomos, o cálculo de efemérides motivou o desenvolvimento de modelos planetários precisos

Elipse: a elipse é, junto com a parábola, a hipérbole e o círculo, uma das seções cônicas descritas por Apolônio. A elipse é definida como o lugar geométrico dos pontos de um plano cujas distâncias a dois pontos fixos desse plano, chamados *focos*, têm soma constante.



$$F1P + F2P = F1Q + F2Q = F1R + F2R = \text{constante}$$

Figura G.6 Na *Astronomia nova* Kepler mostra que o percurso de Marte em torno do Sol tem a forma de uma elipse.

Epiciclo e deferente: mecanismo amplamente utilizado na astronomia geocêntrica (e empregado também por Copérnico, embora de forma mais restrita) pelo qual o movimento de um corpo celeste é reproduzido por uma combinação de dois movimentos circulares, conforme a figura abaixo. O primeiro desses movimentos é a rotação periódica do círculo deferente, construído em torno do corpo central - a Terra ou o Sol, dependendo do sistema de mundo adotado. Em torno de um dado ponto do círculo deferente é construído um segundo círculo menor, o epiciclo, que também gira com um período determinado. A razão entre os dois períodos de revolução – do centro do epiciclo em torno do corpo central e do corpo celeste em torno do centro do epiciclo, bem como a razão entre os raios dos círculos, determinam as características do percurso resultante. Construções onde um segundo epiciclo gira sobre o primeiro também são comuns na astronomia pré-kepleriana. Nos modelos ptolomaicos para os planetas superiores o movimento da Terra em torno do Sol é reproduzido pelos **grandes epiciclos** ou **epiciclos maiores**, enquanto o deferente corresponde ao movimento do planeta em torno do Sol. Já nos modelos para os planetas inferiores os epiciclos representam o movimento próprio de cada planeta, e os respectivos deferentes reproduzem o movimento da Terra.

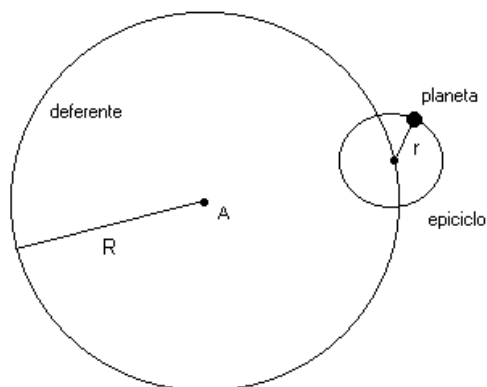


Figura G.7 Esquema simples de epícolo e deferente. O planeta gira sobre o epícolo de raio r , cujo centro gira em torno do centro A do círculo deferente de raio R . A variação dos parâmetros relativos aos dois círculos e a adição de novos epícolos possibilitam a representação de qualquer curva fechada periódica.

Equação: pequena correção somada ou subtraída para refinar uma aproximação, tipicamente de um ângulo. **equação de centro:** pequena correção correspondente à diferença entre o movimento em um círculo excêntrico e o movimento em um concêntrico. Na equação de centro somam-se duas componentes: **equação óptica de centro:** componente da equação de centro resultante do simples fato de que o planeta se move em uma órbita excêntrica. Quando a distância do planeta ao observador (ou ao Sol) é maior, seu movimento angular aparente é mais lento, e quando essa distância é menor, seu movimento aparente é mais rápido, mesmo que a velocidade do planeta em sua órbita seja na realidade constante. **equação física de centro:** componente da equação de centro resultante do fato de que a velocidade do planeta em sua órbita varia com a distância ao Sol. Kepler explica essa variação de velocidade pela ação da força solar.

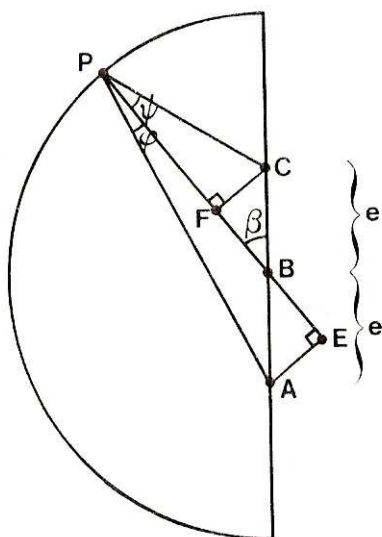


Figura G.8 A equação óptica de centro correspondente ao ponto P de anomalia excêntrica β é dada pelo ângulo φ . A equação física de centro correspondente ao mesmo ponto é dada pelo ângulo ψ . A equação de centro total é dada pela soma dos dois ângulos, $\varphi + \psi$. O ponto A representa o Sol, B o centro do percurso e C o ponto equante. *Apud*. STEPHENSON, 1987, p. 59.

Equador: o movimento de rotação completado pela Terra a cada 24 horas se dá em torno de um eixo que define os pólos Norte e Sul da esfera das estrelas fixas. O equador celeste é o grande círculo que corta a esfera das fixas a uma distância igual de seus dois pólos.

Equante: artifício criado por Ptolomeu para representar a velocidade variável dos planetas. O círculo equante é um círculo imaginário de mesmo raio que o excêntrico, a partir de cujo centro o movimento do planeta parece uniforme. Na astronomia ptolomaica o centro do círculo equante está situado sobre a linha das apsides, à mesma distância do centro do excêntrico que a Terra, na direção contrária. Geralmente o círculo é subentendido e o termo designa o seu centro. O movimento no círculo equante, com velocidade uniforme, equivale a uma medida de tempo e é representado pela anomalia média, desde que se faça o círculo inteiro corresponder a um período completo.

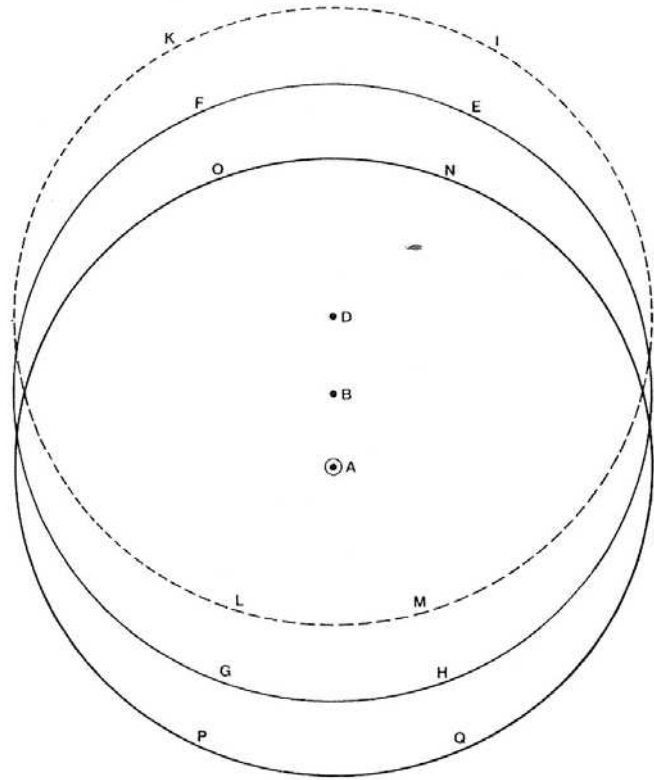


Figura G.9 O planeta descreve o percurso excêntrico EFGH em torno do Sol A com velocidade variável. O círculo NOPQ é o concêntrico, e o círculo pontilhado IKLM é o círculo equante, construído em torno do ponto equante D. *Apud*. STEPHENSON, 1987, p. 19.

Equinócios: os dois pontos nos quais o equador celeste intercepta a eclíptica. Duas vezes por ano o Sol, em seu movimento aparente, cruza o equador celeste, fazendo com que o dia e a noite tenham igual duração. O equinócio de primavera no hemisfério Norte (e de outono no hemisfério Sul) é dito **ponto vernal** e marca o início do signo de Áries. No equinócio de primavera o Sol passa das latitudes austrais para as latitudes setentrionais, enquanto no equinócio de outono o Sol passa das latitudes setentrionais para as latitudes austrais. Tradicionalmente, o ponto vernal é tomado como ponto de partida para a determinação das longitudes. Os equinócios não permanecem fixos, mas apresentam um lento movimento de precessão, que completa um ciclo a cada 26.000 anos.

Evecção: variação sinódica na desigualdade epicíclica da Lua, descoberta por Ptolomeu. A evecção tem um período de 32 dias e uma amplitude de $1,16^\circ$.

Excentricidade: em um círculo excêntrico, a distância entre o centro e o corpo central (o Sol ou a Terra), representada na figura G.8 pela distância AB. Em uma órbita elíptica, a razão entre a distância do Sol ao centro e o comprimento do semi-eixo maior. Na figura G.9, a excentricidade é dada pela razão $\frac{SC}{PC}$.

Excêntrico: círculo ou esfera, em um modelo astronômico, no qual o corpo central (o Sol ou a Terra) não ocupa o centro. Essa configuração gera a aparência de um movimento irregular, mesmo que o movimento real seja perfeitamente regular. Essa irregularidade aparente, resultante da excentricidade da órbita, é representada pela equação óptica de centro. Na figura G.8 o círculo EFGH, percorrido pelo planeta, é um percurso excêntrico.

Estrelas fixas: o universo de Kepler é esférico e limitado por uma esfera sólida e imóvel, na qual estão incrustadas as estrelas. Como estas não mudam de posição entre si, elas são chamadas ‘fixas’ desde a Antigüidade (apesar de no geocentrismo a esfera das estrelas fixas ser dotada de um movimento de rotação com período de 24 horas).

Horizonte: grande círculo da esfera celeste perpendicular à vertical do local considerado, e que divide o céu em duas regiões iguais, uma visível e a outra invisível.

Latitude: distância angular de um ponto na esfera celeste até a eclíptica. O movimento em latitude dos planetas resulta da inclinação relativa entre os planos de suas órbitas e o plano da órbita da Terra. Do mesmo modo, o movimento em latitude da Lua resulta da inclinação entre o plano de sua órbita em torno da Terra e o plano da órbita da Terra em torno do Sol, uma vez que, assim como os demais movimentos em latitude, ele é tradicionalmente medido a partir da eclíptica. As latitudes da Lua e dos planetas são sempre pequenas.

Leis de Kepler: As duas primeiras leis de Kepler foram originalmente publicadas na *Astronomia nova* (1609). De acordo com a primeira lei, os planetas descrevem órbitas elípticas que têm o Sol em um dos focos. A segunda lei procura estabelecer uma relação entre a velocidade de um planeta em uma dada região de seu percurso e sua distância ao Sol naquela região. Em sua formulação final, a lei das áreas mantém que a linha que une o planeta ao Sol percorre áreas iguais em tempos iguais. A terceira lei foi derivada a partir do estabelecimento de intervalos musicais harmônicos nas relações entre as velocidades dos seis planetas conhecidos por Kepler. Ela foi publicada na *Harmonia do mundo* (1619). Dados dois planetas quaisquer, essa lei estabelece a relação entre os raios médios de suas

órbitas e seus períodos de revolução anual. Em notação moderna ela pode ser expressa como $T_1/T_2 = (r_1/r_2)^{3/2}$, onde T_1 e T_2 são os períodos e r_1 e r_2 são os raios das órbitas dos dois planetas, respectivamente.

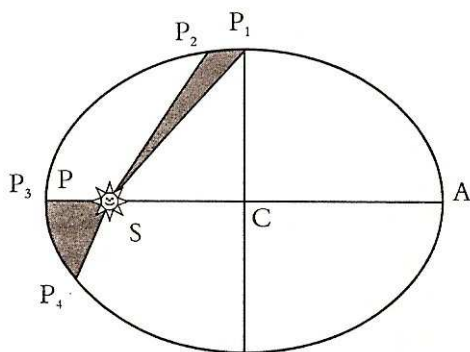


Figura G.10 As duas primeiras leis de Kepler. Pela primeira lei, a órbita do planeta é uma elipse, na qual o Sol ocupa um dos focos, o ponto S. A excentricidade é dada pela razão SP/PC . As órbitas dos planetas no sistema solar são na realidade elipses muito menos excêntricas do que esta aqui representada. A segunda lei estabelece que, se as duas áreas sombreadas delimitadas respectivamente por P_1, P_2 e P_3, P_4 são iguais, o tempo gasto pelo planeta para atravessar os dois trechos desiguais correspondentes será igual. Isso significa que o planeta é mais veloz quando ele se encontra mais próximo do Sol, fato que Kepler explica creditando os movimentos planetários à ação da força motriz solar. *Apud*. VOELKEL, 1999, p. 65.

Libração: movimento oscilatório ao longo da direção que liga o planeta ao Sol, através do qual Kepler explica a excentricidade das órbitas, sejam elas circulares ou elípticas.

Longitude: distância angular de um corpo celeste, no plano da eclíptica, até um ponto de referência. Tradicionalmente essa referência é o equinócio vernal ou uma estrela próxima dele. **longitude geocêntrica:** longitude de um ponto da esfera celeste referida ao centro da Terra. **longitude heliocêntrica:** longitude de um ponto na esfera celeste referida ao centro do Sol. **longitudes intermediárias:** o mesmo que quadraturas. Denominação comum às duas posições simétricas no percurso de um planeta que fazem respectivamente ângulos de 90° e 270° com a linha das apsides. Essas posições correspondem à máxima diferença entre o percurso circular e o círculo que o circunscreve (vide a figura G.11).

Lúnula: cada uma das pequenas superfícies compreendidas entre a órbita elíptica de um planeta e o círculo que a circunscreve. Essas pequenas superfícies têm a forma de uma pequena lua crescente, daí o nome.

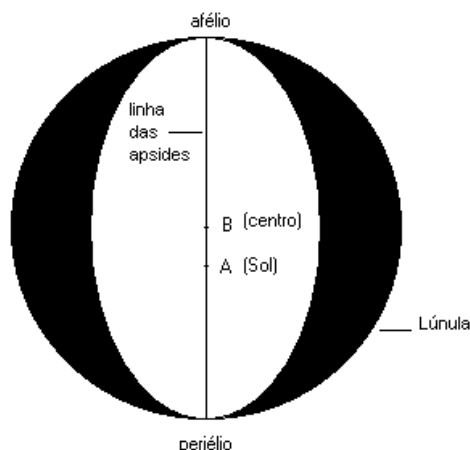


Figura G.11 Na *Astronomia nova* o percurso circular é substituído por curvas ovais e finalmente pela elipse. Essas curvas são construídas através da diminuição das distâncias entre o planeta e o Sol nas longitudes intermediárias, mantendo-se as apsides do círculo original.

Movimentos: a astronomia tradicional trata das posições angulares dos astros movendo-se em torno da Terra. Os movimentos observados dos astros em torno da Terra podem ser agrupados em quatro fenômenos: em primeiro lugar, observa-se que todos os corpos celestes percorrem o céu de Leste para Oeste no período de um dia sideral (23 horas e 56 minutos). Este movimento, tradicionalmente denominado *primeiro movimento*, é explicado no geocentrismo pela rotação diária da esfera das estrelas fixas, transmitida por contato a todos os orbes. Copérnico o explica pela rotação diária da Terra de Oeste para Leste. Em segundo lugar, observa-se que os planetas se movem ao longo do ano no sentido contrário, de Oeste para Leste, contra o céu de estrelas fixas, em um movimento muito mais lento tradicionalmente denominado *segundo movimento*. A esses dois movimentos na longitude soma-se um terceiro, o movimento na latitude, o desvio da Lua e dos planetas com relação à eclíptica no sentido Norte-Sul. Por fim os cinco planetas, de tempos em tempos,

interrompem os seus movimentos usuais ou diretos para descrever uma laçada ou retrogradação, depois da qual o movimento direto é retomado.

Nova e supernova: estrelas que repentinamente aparecem no céu, ali permanecendo por um período da ordem de alguns dias. Hoje esses fenômenos são explicados por uma gama relativamente extensa de eventos estelares cataclísmicos. As novas de 1572 e 1604 seriam na verdade supernovas, eventos mais raros e energéticos do que as novas, resultantes da explosão de estrelas muito maciças.

Nós: os dois pontos nos quais o percurso de um planeta (ou da Lua) cruza a eclíptica. No nó ascendente o planeta cruza a eclíptica passando das latitudes austrais para as latitudes setentrionais, enquanto no nó descendente ele passa das latitudes setentrionais para as austrais.

Observações acrônicas: observações de um planeta efetuadas no momento em que a segunda anomalia se anula. Nas observações acrônicas o planeta aparece em oposição ao Sol – as conjunções também corresponderiam a observações acrônicas, mas elas não são observáveis.

Octantes: as quatro posições intermediárias entre as apsides e as quadraturas, situadas a ângulos de 45° , 135° , 225° e 315° , medidos a partir do afélio.

Oposição: situação na qual dois astros têm latitudes semelhantes e longitudes diferentes de 180° . Quando se diz que um determinado planeta está em oposição ao Sol, deve-se entender que o Sol, a Terra e o planeta estão alinhados, nesta ordem. Os planetas externos apresentam o seu máximo diâmetro aparente quando em oposição do Sol. O sistema copernicano explica este fenômeno através da posição relativa entre a Terra e o planeta no momento da oposição. De acordo com a distinção avançada na *Astronomia nova*, na oposição verdadeira o astro se opõe ao sol aparente, enquanto na oposição média o astro se opõe ao sol médio.

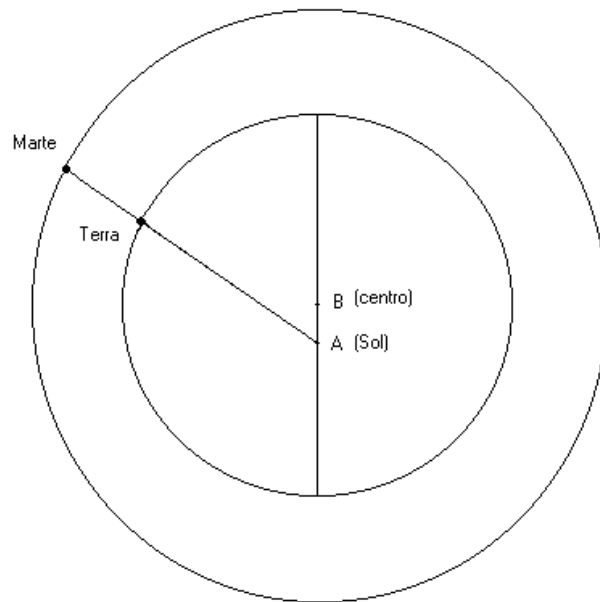


Figura G.12 Quando Marte encontra-se em oposição com o Sol o seu diâmetro aparente é máximo.

Orbe: casca esférica correspondente à região ocupada por um determinado astro no cosmos. No geocentrismo de Aristóteles e Ptolomeu os orbes são sólidos e cristalinos, constituídos de éter, o quinto elemento eterno e incorruptível do qual também são feitos todos os corpos celestes. Existe uma controvérsia acerca da existência de orbes sólidos na astronomia de Copérnico, mas ele parece tê-los mantido, dispostos em torno do Sol. Tycho contesta a solidez dos orbes através de observações de cometas – os orbes sólidos eram, de resto, incompatíveis com seu sistema misto. Kepler, no *Mistério cosmográfico*, ainda utiliza o termo orbe para designar a região correspondente a cada planeta em seu sistema heliocêntrico. Entretanto, desde essa sua primeira obra, Kepler já não confere solidez aos orbes.

Órbita: curva simples descrita por um astro em torno de um corpo central. Na astronomia de Kepler todos os planetas descrevem órbitas elípticas em torno do Sol. Essas curvas simples, vistas da Terra, resultam nos movimentos observados.

Paralaxe: deslocamento aparente de um corpo celeste quando se muda a posição do observador. **paralaxe diurna:** ângulo formado por duas retas que partem do centro de um determinado astro, uma até o centro da Terra e a outra até o observador. Se o corpo celeste

for observado no zênite, as duas retas coincidem e a paralaxe diurna se anula. A paralaxe diurna é o ângulo sob o qual seria visto, do objeto celeste observado, o raio da Terra. **paralaxe anual:** ângulo formado por duas retas que partem do centro de um determinado astro, a primeira até o centro do Sol e a segunda até o centro da Terra. A paralaxe anual se anula nas conjunções e oposições, quando o astro observado, a Terra e o Sol encontram-se alinhados. A paralaxe anual é o ângulo sob o qual seria visto, do objeto celeste observado, o raio da órbita da Terra.

Periélio: ponto na órbita excêntrica de um corpo celeste no sistema heliocêntrico no qual este corpo está mais próximo do centro do mundo, ocupado pelo Sol. Como ocorre com o afélio, na astronomia copernicana o periélio se reporta ao sol médio. Kepler substitui o sol médio pelo sol aparente na determinação dos afélios e periélios.

Perigeu: o ponto na órbita excêntrica de um corpo celeste no qual este se encontra mais próximo da Terra.

Planeta: corpo celeste sem luz própria que órbita uma estrela. À época de Kepler eram conhecidos cinco planetas, além da Terra: Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno.

planetas inferiores: Mercúrio e Vênus, os planetas cujas órbitas estão situadas entre a Terra e o Sol. **planetas superiores:** aqueles cujas órbitas estão situadas além da órbita da Terra, como Marte, Júpiter e Saturno, além dos demais planetas posteriormente descobertos no sistema solar.

Pólo: Os dois pontos da superfície terrestre por onde passa o seu eixo de rotação. Nos sistemas geostáticos, a projeção desses pontos na esfera das estrelas fixas. A posição do eixo de rotação e dos pólos é a mesma nos diversos sistemas de mundo, mas o sentido da rotação em 24 horas é invertido conforme ela seja atribuída à Terra ou à esfera das fixas.

Precessão dos equinócios: Lento movimento dos equinócios devido ao fato de que o eixo de rotação da Terra descreve um cone em torno do eixo da eclíptica.

Quadratura: As duas posições, simétricas com relação à linha das apsides, onde um astro encontra-se a uma distância angular de 90° ou 270° do afélio. O vértice a partir do qual é medido este ângulo, o centro da órbita ou o Sol, depende da anomalia considerada, excêntrica ou verdadeira, respectivamente.

Retrogradação: Porção do movimento observado de um planeta na qual ele parece se deslocar no sentido oposto ao usual, descrevendo uma curva freqüentemente denominada

‘laçada’. As retrogradações dos planetas superiores, Marte, Júpiter e Saturno, ocorrem sempre que estes planetas estão em oposição ao Sol. Vênus e Mercúrio apresentam movimento retrógrado quando em conjunção com o Sol. Em todos os casos, o ponto de conjunção ou oposição está localizado exatamente no centro do arco retrógrado. Na astronomia geocêntrica as retrogradações são reproduzidas por sistemas de epiciclos e deferentes, enquanto no heliocentrismo as retrogradações de um planeta são explicadas pela composição de seu movimento em torno do Sol com o movimento anual da Terra.

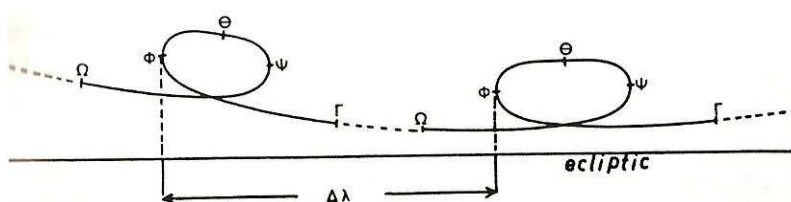


Figura G.13 Duas ocorrências sucessivas de uma retrogradação. O arco $\Delta\lambda$ corresponde a um período sinódico e varia em torno de um valor médio. *Apud*. PEDERSEN, 1993, p. 62.

Sinódico: Relativo às conjunções e oposições com o Sol. **período sinódico:** intervalo de tempo compreendido entre dois fenômenos sinódicos sucessivos, como por exemplo o período entre duas retrogradações no movimento aparente de um planeta.

Sistema de mundo: concepção geral acerca da estrutura do universo. À época de Kepler três grandes sistemas de mundo disputavam a adesão dos astrônomos: o sistema ptolomaico, o sistema misto de Tycho Brahe e o sistema copernicano.

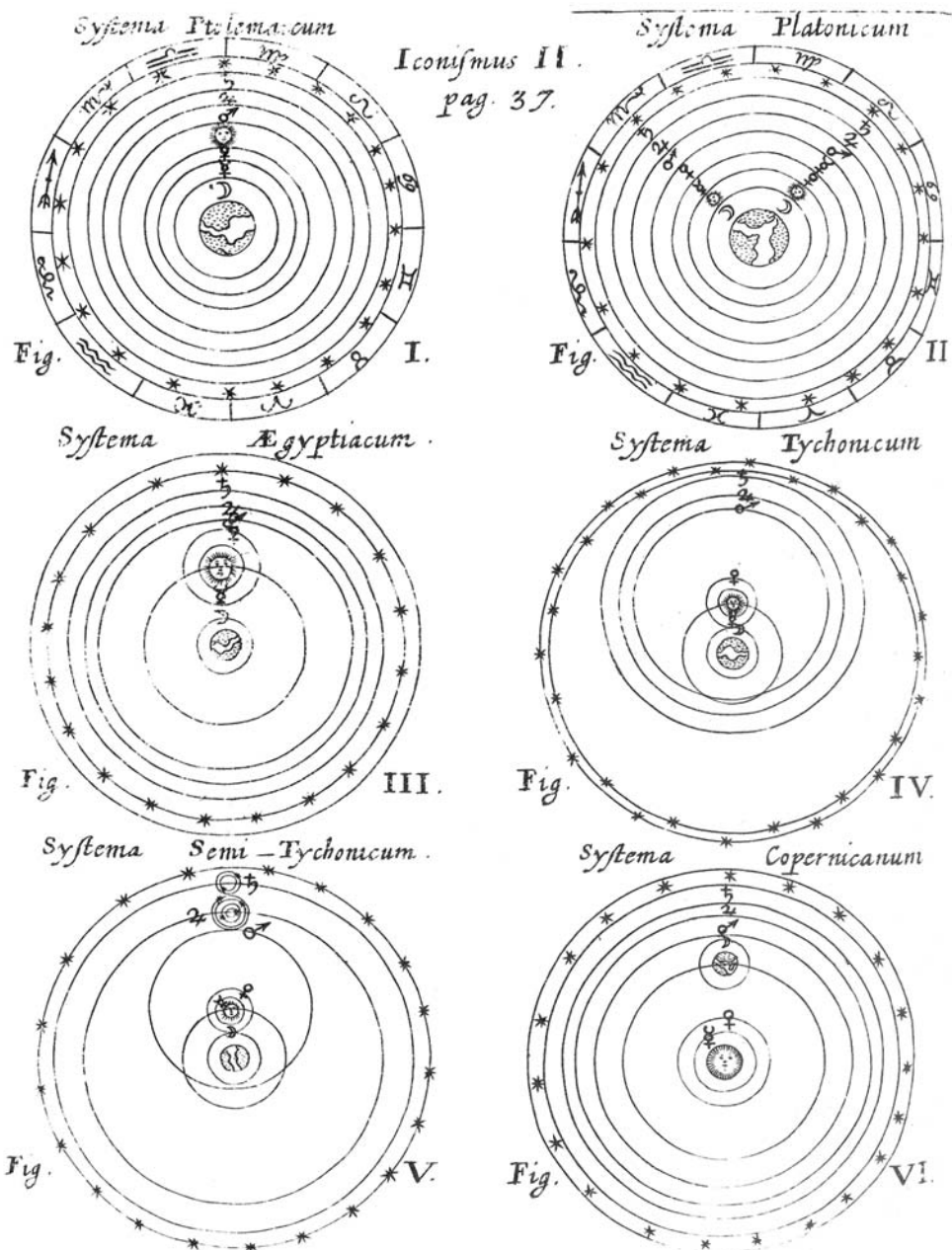


Figura G.14 Os movimentos celestes vistos da Terra podem ser explicados a partir de diferentes sistemas de mundo. A opção por um determinado sistema envolve uma série de fatores além das observações. *Apud*. COHEN, 1980, p. 44.

Sol aparente: ponto matemático definido como o centro do corpo solar.

Sol médio: ponto matemático definido como o centro da órbita da Terra. Na teoria do sol exposta no *Almagesto*, a distância angular entre o sol médio e o sol aparente tem um valor máximo de cerca de 2° . O valor reflete a pequena excentricidade da órbita da Terra.

Solstícios: os dois pontos no caminho percorrido pelo Sol nos quais a distância angular ao plano que contém equador celeste é máxima. O solstício de inverno corresponde à noite mais longa e ao dia mais curto do ano, enquanto o solstício de verão corresponde ao dia mais longo e à noite mais curta.

Varição (diferença ou desigualdade): primeira variação: em geral, movimento do planeta sobre o círculo do zodíaco; irregularidade no movimento observado do planeta que não apresenta correlação com as conjunções e oposições ao Sol. Para Marte, a primeira variação é interpretada por Kepler como o movimento do planeta em sua própria órbita. **segunda variação:** movimento do planeta com relação ao Sol. Na astronomia geocêntrica, a segunda variação do movimento de Marte é representada pelo epiciclo maior. No sistema copernicano o epiciclo maior é substituído pela órbita da Terra em torno do Sol.

Zênite: ponto da esfera celeste situado na vertical do observador, diretamente sobre a sua cabeça.

Zodíaco: faixa que se estende por cerca de $8^\circ 30'$ de cada lado da eclíptica e sobre a qual se movem o Sol, a Lua e os planetas. Essa faixa é dividida em doze setores iguais, correspondentes aos doze signos zodiacais. A primeira referência conhecida às doze constelações zodiacais da maneira como as descrevemos até hoje é um texto cuneiforme de cerca de 400 a.C., designado VAT 4924 e conservado em Berlim.

BIBLIOGRAFIA

1. Textos de Kepler

1.1 Obras completas

KEPLER, J. *Gesammelte Werke*. 20 vols. Ed. Max Caspar & W. von Dyck. Munique: Bayerische Akademie der Wissenschaften, 1938 - . (K.G.W.)

_____. *Opera omnia*. 8 vols. Ed. C. Frisch. Frankfurt: Erlangen, 1858-1871. (K.O.O.)

1.2 Traduções

KEPLER, J. *Le secret du monde*, trad. A. Segonds, Paris: Les Belles Lettres, 1984.

_____. *El secreto del universo*, trad. Eloy Rada García, Madri: Alianza editorial, 1992a.

_____. *Les fondements de l'optique moderne – paralipomènes à Vitellion*, trad. Catherine Chevalley, Paris: Vrin, 1980.

_____. *Optics : Paralipomena to Witelo & optical part of astronomy*, trans. W. H. Donahue, Novo México: Green lion Press, 2000.

_____. *New astronomy*, trad. William H. Donahue, Cambridge University Press, 1992b.

_____. “Defense of Tycho against Ursus”, texto latino, intr. e trad. N. Jardine, In: JARDINE, N. *The birth of history and philosophy of science: Kepler's “a defense of Tycho against Ursus”*, Cambridge University Press, 1988.

_____. *L'etrenne ou la neige sexangulaire*, trad. Robert Halleux, Paris: Vrin, 1975.

_____. *L'harmonie du monde*, trad. Jean Peyroux, Paris: A. Blanchard, 1979.

_____. *The harmony of the world*, trad. E. J. Aiton *et al.*, Filadélfia: American Philosophical Society, 1997.

_____. *Abrégé d'astronomie copernicienne*, trad. Jean Peyroux, Paris: A. Blanchard, 1988.

_____. “Rudolphine tables”, intr. e trad. Owen Gingerich e William Walderman, In: *Quarterly journal of the Royal Astronomical Society*, XIII, 1972, p. 360-373.

_____. “Carta a Mästlin de 14 de dezembro de 1604”, intr. e trad. Claudemir Roque Tossato. In: *Scientiae studia*, Vol. 1, No. 2, 2003, p. 207 – 215.

KEPLER-BRAHE *Tables rudolphines*, trad. Jean Peyroux, Paris: A. Blanchard, 1986.
KEPLER-GALILEU *Sidereus nuncius – el mensaje y el mensajero sideral*, trad. Carlos Solís Santos, Madri: Alianza Editorial, 1984.

2. Outras fontes

ARISTÓTELES *Physics*, Trad. W. D. Ross, Oxford: Clarendon Press, 1998.
_____. *Metafísica*, trad. V. G. Yebra, Madrid: Ed. Gredos, 1990.
BACON, R. ‘De multiplicatione specierum’ In: LINDBERG, D. *Roger Bacon’s philosophy of nature*. Oxford: Clarendon Press, 1983.
COPÉRNICO N. *Comentariolus*, trad. R. A. Martins, São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2003.
_____. *Das revoluções dos orbes celestes*, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1984.
GALILEU GALILEI *Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo, ptolomaico e copernicano*, trad. Pablo Rúben Mariconda, São Paulo: Discurso Editorial, 2001.
GILBERT, W. *De magnete*, trad. P. Fleury Mottelay, Nova Iorque: Dover, 1958.
GROSSETESTE, R. *Optica*, trad. Celina A. Mendoza, Buenos Aires: Ed. del Rey, 1985.
LAPLACE, P.-S. *Exposition du système du monde*, Paris: BNF numérique, 1997 – reprodução da edição de Paris: Bachelier, 1836.
PLATÃO *Timeu, Crítias, O segundo Alcibiades, Hípias menor*, trad. Carlos Alberto Nunes, Belém: Editora UFPA, 2001.
PTOLOMEU, C. *Composition mathématique*, trad. M. Halma, notas M. Delambre, Paris: A. Blanchard, 1988.
TYCHO BRAHE *Sur des phénomènes plus récents du monde étheré. Livre second [des progymnasmata]*, Paris: A. Blanchard, 1984.
_____. “Carta a Kepler de 9 de dezembro de 1599”, intr. e trad. Claudemir Roque Tossato. In: *Scientiae studia*, Vol. 2, No. 4, 2004, p. 536 – 578.

3. Estudos

- AITON, E. J. "The elliptical orbit and the area law", In: BEER A., BEER P. (Eds.), *Kepler four hundred years: conference held in honour of Johannes Kepler, Philadelphia, 1971*, Oxford: Pergamon, 1975-a, p. 573 - 583.
- _____. "Infinitesimals and the areal law", In: BEER A., BEER P. (Eds.), *Kepler four hundred years: conference held in honour of Johannes Kepler, Philadelphia, 1971*, Oxford: Pergamon, 1975-b, p. 585, 586.
- _____. "Kepler's second law of planetary motion", *Isis*, 205, Set. 1969, p. 75-90.
- BAIGRIE, B. S. "Kepler's laws of planetary motion, before and after Newton's Principia: an essay on the transformation of scientific problems". *Stud. hist. phil. sci.*, v. 18, n° 2, 1987, p. 117-208.
- BARKER P., GOLDSTEIN B. "Distance and velocity in Kepler's astronomy", *Annals of science*, 51, 1994, p. 59-73.
- BEER A. & BEER B. (Eds.) *Kepler four hundred years*, Oxford: Pergamon, 1975.
- BONER, P. G. "Soul searching with Kepler: an analysis of *anima* in his astrology", In: *Journal for the history of astronomy*, 36, 2005, p. 7 -20.
- BRACKENRIDGE, J. B. "Kepler, elliptical orbits, and celestial circularity: a study in the persistence of metaphysical commitment – part I", *Annals of science*, 39, 1982, p. 117 – 143.
- CASPAR, M. *Kepler*, Nova Iorque: Dover, 1993.
- CASSIRER, E. *Indivíduo e cosmos na filosofia do Renascimento*, São Paulo: Martins Fontes, 2001.
- CHEVALLEY, C. "Sur le statut d'une question apparemment dénuée de sens : la nature immatérielle de la lumière", *XVIIe siècle*, vol. 136, n° 3, Paris, 1982.
- CHRISTIANSON, J. R. *On Tycho's island*, Cambridge University Press, 2003.
- COHEN, I. B. *Revolution in science*, Harvard University Press, 1985.
- _____. *The birth of a new physics*, Nova Iorque: W.W. Norton, 1985.
- _____. (Ed.) *Album of science, from Leonardo to Lavoisier, 1450-1800*, Nova Iorque: Charles Scribner's Sons, 1980.
- CROMBIE, A. C. *Styles of scientific thinking in the european tradition*, 3 vols., Londres: Duckworth, 1994.

- _____. *Science, optics and music in medieval and early modern thought*, Londres: Hambledon, 1990.
- _____. *Robert Grosseteste and the origins of experimental science*, Oxford: Clarendon Press, 1971.
- _____. *From Augustine to Galileo*, Londres: Falcon Press, 1952.
- CROWTHER-HEYCK, K, “Wonderful secrets of nature – natural knowledge and religious piety in reformation Germany”, *Isis*, vol. 94, n. 2, 2003, p. 253 - 273.
- DAVIS, A. E. L. “Kepler’s distance law – myth not reality”, “Grading the eggs (Kepler’s sizing procedure for planetary orbit)”, “Kepler’s road to Damascus”, “Kepler’s physical framework for planetary motion” In: *Centaurus*, 35, 1992, p. 97-191.
- DE LA COTARDIÈRE, P. *et al. Larousse Astronomy*, Hong Kong: Librairie Larousse, 1988.
- DIJKETERHUIS, F. J. *The mechanization of the world picture*, Princeton University Press, 1986.
- DONAHUE, W. H. “Kepler’s approach to the oval of 1602 from the mars notebook”, In: *Journal for the history of astronomy*, 27, 1996, p. 281 – 295.
- _____. “Kepler’s invention of the second planetary law”, In: *British journal for the history of science*, 27, 1994, p. 89-102.
- _____. “Kepler’s fabricated figures: covering up the mess in the new astronomy”, In: *Journal for the history of astronomy*, 19, 1988, p. 217-237.
- DREYER, *A history of astronomy from Thales to Kepler*, Nova Iorque: Dover, 1953.
- DUHEM, P. *Le système du monde : histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic*, Paris: Hermann, 1913-1917.
- ÉVORA, F. R. R. *A revolução copernicana-galileana*, 2 vols., Campinas: CLE/Unicamp, 1993.
- FIELD, J.V. *Kepler’s geometrical cosmology*, The University of Chicago Press, 1988.
- GERLACH, W., LIST, M. *Johannes Kepler, Dokumente zu Leben und Werk*, Munique: Ehrenwirth, 1971.
- GILLISPIE, C. C. (ed.) *Dictionary of scientific biography*, Nova Iorque: Charles Scribner’s Sons, 1981.

GINGERICH, O. *The eye of the heaven: Ptolomy, Copernicus, Kepler*, Nova Iorque: American Institute of Physics, 1993.

_____. *The great Copernicus chase and other adventures in astronomical history*, Cambridge University Press, 1992.

_____. “Kepler’s treatment of redundant observations or, the computer versus Kepler revisited”, In: In: BEER A., BEER P. (Eds.), *Kepler four hundred years: conference held in honour of Johannes Kepler, Philadelphia, 1971*, Oxford: Pergamon, 1975, p. 747-748.

_____. “Kepler’s place in astronomy”, In: BEER A., BEER P. (Eds.), *Kepler four hundred years: conference held in honour of Johannes Kepler, Philadelphia, 1971*, Oxford: Pergamon, 1975, p. 261 - 278.

GRANT, E. “Hipóteses no fim da Idade Média e nos primórdios da Idade moderna”. In: ROLLER D. *et al. Iniciação à história da ciência*, São Paulo: Cultrix, 1966, p. 41-57.

GUÉROULT, M. *Descartes selon l’ordre des raisons, vol. I – l’âme et dieu*, Paris: Aubier, 1968.

HALLYN, F. *The poetic structure of the world – Copernicus and Kepler*, Nova Iorque: Zone Books, 1993.

HAMOU, P. *Voir et connaître à l’âge classique*, Paris: PUF, 2002.

HOLTON, G. “Johannes Kepler’s universe: its physics and its metaphysics”, *American Journal of Physics*, v. 24, 1956, p. 340-351.

JAMMER, M. *Concepts of space*, Nova Iorque: Dover, 1993.

_____. *Concepts of force*, Harvard University Press, 1957.

JARDINE N. *et al.* “Tycho v. Ursus: the build-up to a trial, part 1”, In: *Journal for the history of astronomy*, 36, 2005, p. 81 - 106.

_____. *et al.* “Tycho v. Ursus: the build-up to a trial, part 2”, In: *Journal for the history of astronomy*, 36, 2005, p. 125 - 165.

_____. “Koyré’s Kepler / Kepler’s Koyré”, In: *History of science*, 38 (4), 2000-a, p. 363-376.

_____. “Uses and abuses of anachronism in the history of the sciences”, In: *History of science*, 38 (3), 2000-b, p. 252-270.

- _____. “The places of astronomy in early-modern culture”, In: *Journal for the history of astronomy*, 29, 1998, p. 49 – 62.
- _____. *The birth of history and philosophy of science: Kepler’s ‘a defense of Tycho against Ursus’*, Cambridge University Press, 1988.
- _____. “The forging of modern realism: Clavius and Kepler against the sceptics”, *Studies in history and philosophy of science*, 10 (2), 1979, p. 141-173.
- KOESTLER, A. *O homem e o universo*, São Paulo: IBRASA, 1989.
- KOYRÉ, A. *Estudos de história do pensamento científico*, São Paulo: Forense Universitária, 1991.
- _____. *Du mode clos à l’univers infini*, Paris: Gallimard, 1973.
- _____. *La révolution astronomique: Copernic, Kepler, Borelli*, Paris: Hermann, 1961.
- KOZHAMTHADAM, J. *The discovery of Kepler’s laws: The interaction of science, philosophy and religion*, The University of Notre Dame Press, 1994.
- KUHN, T. *A estrutura das revoluções científicas*, São Paulo: Perspectiva, 1994.
- _____. *The copernican revolution*, Cambridge University Press, 1957.
- LAKATOS, I. & FEYERABEND, P. *For and against method*, The University of Chicago Press, 1999.
- LAKATOS, I. *Histoire et méthodologie des sciences*, Paris, PUF, 1994.
- LINDBERG, D. C. *The beginnings of western science*, The University of Chicago Press, 1992.
- _____. “The genesis of Kepler’s theory of light: light metaphysics from Plotinus to Kepler”, *Osiris*, 2nd series, ii, 1986, p. 5 -42.
- MALET, A. “Kepler and the telescope”, *Annals of science*, vol. 60, n. 2, 2003, p. 107-136.
- MCCLUSKEY, S. C. *Astronomies and cultures in early medieval Europe*, Cambridge University Press, 1998.
- METHUEN, C. *Kepler’s Tübingen, stimulus to a theological mathematics*, Hampshire: Ashgate Publishing Limited, 1998.

- MITTELSTRASS, J. “Epistemological elements in Kepler’s astronomy”, In: BEER A., BEER P. (Eds.), *Kepler four hundred years: conference held in honour of Johannes Kepler, Philadelphia, 1971*, Oxford: Pergamon, 1975, p. 727 - 728.
- MOURÃO, R. R. F. *Dicionário enciclopédico de astronomia e astronáutica*, Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.
- NASCIMENTO, C. A. *De Tomás de Aquino a Galileu*, Campinas: IFCH/Unicamp, 1995.
- NEUGEBAUER, O. “Some fundamental concepts in ancient astronomy”, In: *Astronomy and history selected essays*, Nova Iorque: Springer-Verlag, 1983, vol. I, p. 5-21.
- _____. “Exact science in Antiquity”, In: *Astronomy and history selected essays*, Nova Iorque: Springer-Verlag, 1983, vol. I, p. 23-31.
- _____. “The history of ancient astronomy: problems and methods” In: *Astronomy and history selected essays*, Nova Iorque: Springer-Verlag, 1983, p. 33-98.
- _____. “Mathematical methods in ancient astronomy”, In: *Astronomy and history selected essays*, Nova Iorque: Springer-Verlag, 1983, vol. I, p. 99 – 127.
- _____. “The transmission of planetary theories in ancient and medieval astronomy”, In: *Astronomy and history selected essays*, Nova Iorque: Springer-Verlag, 1983, vol. I, p. 129 - 156.
- _____. “Notes on Kepler”, In: BEER A., BEER P. (Eds.), *Kepler four hundred years: conference held in honour of Johannes Kepler, Philadelphia, 1971*, Oxford: Pergamon, 1975, p. 781 - 785.
- _____. *The exact sciences in antiquity*, Nova Iorque: Dover, 1969.
- PANNEKOEK, A *history of astronomy*, Nova Iorque: Dover, 1961.
- PEDERSEN, O. *Early physics and astronomy*, Cambridge University Press, 1993.
- _____. “The origins of the *theorica planetarum*”, In: *Journal for the history of astronomy*, 12, 1981, p. 113 – 123.
- POULLE, E. *Astronomie planétaire au Moyen Âge latin*, Aldershot: Variorum, 1996.
- RABIN, S. J. “Was Kepler’s *species immateriata* substantial?”, In: *Journal for the history of astronomy*, 36, 2005, p. 49 - 56.
- REINBOLD, A. “Les peintres du XVIIe siècle et les diverses perceptions de la lumière”, *XVIIe siècle*, vol. 136, n° 3, 1982.
- RONCHI, V. *Optics – the science of vision*, Nova Iorque: Dover, 1991.

- _____. *Storia della luce*, Bolonha: N. Zanichelli, 1952.
- ROSEN, E. *Three imperial mathematicians: Kepler trapped between Tycho Brahe and Ursus*, Nova Iorque: Abaris Books, 1986.
- _____. “Kepler’s place in the history of science”, In: BEER A., BEER P. (Eds.), *Kepler four hundred years: conference held in honour of Johannes Kepler, Philadelphia, 1971*, Oxford: Pergamon, 1975, p. 279 - 285.
- ROSSI, P. *A ciência e a filosofia dos modernos*, São Paulo: Editora UNESP, 1992.
- RUSSEL, J. L. “Kepler and scientific method”, In: BEER A., BEER P. (Eds.), *Kepler four hundred years: conference held in honour of Johannes Kepler, Philadelphia, 1971*, Oxford: Pergamon, 1975, p. 733 - 745.
- _____. “Kepler’s laws of planetary motion: 1609-1666”, *The british journal of the history of science*, 2-3, 1964, p. 1-24.
- RUSSO, F. “L’explication des mouvements des planètes des grecs à Kepler”, *Cahiers d’histoire & philosophie des sciences*, 30, 1990.
- SANTIAGO, H. “Do cartesianismo ao espinosismo: estudo de um axioma”, In: *Cadernos espinosanos*, 9, 2002, p. 109-121.
- SIMON, G. *Kepler astronome astrologue*, Paris: Gallimard, 1979.
- STEPHENSON, B. *The music of the heavens*, Princeton University Press, 1994.
- _____. *Kepler’s physical astronomy*, Nova Iorque: Springer-Verlag, 1987.
- SWERDLOW, N. M. *Mathematical astronomy in Copernicus’ De revolutionibus*, Nova Iorque: Springer-Verlag, 1984.
- SZCZECINIARZ, J.-J. *Copernic et la révolution copernicienne*, Paris: Flammarion, 1998.
- THÖREN, V. E. *The lord of Uraniborg, a biography of Tycho Brahe*, Cambridge University Press, 1990.
- TOSSATO, C. R. *Força e harmonia na astronomia física de Johannes Kepler*, tese de doutorado, FFLCH/USP, São Paulo, 2003.
- _____. *O processo de elaboração das duas primeiras leis keplerianas*, dissertação de mestrado, FFLCH/USP, São Paulo, 1997.
- VOELKEL, J. R. *The composition of Kepler’s Astronomia nova*, Princeton University Press, 2001.

_____. *Johannes Kepler and the new astronomy*, Oxford University Press, 1999.

WARRAIN, F. *Essai sur l'harmonices mundi de Jean Kepler*, Paris: Hermann, 1942.

WESTMAN, R. S. "The astronomers role in the sixteenth century: A preliminary Study", *History of science*, XVIII, 40, 1980.

_____. "Kepler's theory of hypothesis", In: BEER A., BEER P. (Eds.), *Kepler four hundred years: conference held in honour of Johannes Kepler, Philadelphia, 1971*, Oxford: Pergamon, 1975, p. 713 - 724.

_____. "Continuities in Kepler scholarship: The European Kepler Symposia in historiographical perspective", In: BEER A., BEER P. (Eds.), *Kepler four hundred years: conference held in honour of Johannes Kepler, Philadelphia, 1971*, Oxford: Pergamon, 1975, p. 713 - 724.

WEBER, E. "La lumière principale de l'univers, d'après Robert Grosseteste", *Cahiers de l'Hermetisme - Lumière et Cosmos*, Paris, 1981.

WILSON, C. A. *Astronomy from Kepler to Newton: historical studies*, Londres: Variorum reprints, 1989.

_____. "Kepler's ellipse and area rule – their derivation from fact and conjecture", In: BEER A., BEER P. (Eds.), *Kepler four hundred years: conference held in honour of Johannes Kepler, Philadelphia, 1971*, Oxford: Pergamon, 1975, p. 587 - 591.

_____. "Kepler's derivation of the elliptical path", *Isis*, 59, 1958, p. 5-25.