

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM LICENCIATURA EM FÍSICA

João Paulo Kaled

REVOLUÇÃO HELIOCÊNTRICA: INVESTIGAÇÃO DE ARGUMENTOS PRÉ-
REVOLUÇÃO COM ALGUMAS CONSEQUÊNCIAS E ORIGENS METAFÍSICAS

Maringá, Paraná

Novembro de 2014

João Paulo Kaled

REVOLUÇÃO HELIOCÊNTRICA: INVESTIGAÇÃO DE ARGUMENTOS PRÉ-
REVOLUÇÃO COM ALGUMAS CONSEQUÊNCIAS E ORIGENS METAFÍSICAS

Monografia apresentada como parte da
avaliação para obtenção do título de licenciado
em Física ao Departamento de Física – UEM.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Gardelli

Maringá, Paraná
Novembro de 2014

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por terem me trazido a este mundo e dado todas as oportunidades ao alcance deles para meu crescimento até, no presente momento, o término da graduação.

Ao Prof. Daniel Gardelli pela orientação e estímulo por meandros da Física que me passariam imperceptíveis.

À Renata pela ajuda incalculável para o término deste trabalho e pela companhia em inúmeras discussões clarificadoras.

A todos que, de algum jeito, me ajudaram.

RESUMO

A situação do ensino atualmente, em específico a falta de uso de discussões construtivas dentro da sala, falha em dar oportunidades ao aluno de pensar criticamente. Consultaremos fontes primárias e secundárias, visando produzir um material que se distancie das concepções inseridas nas práticas atuais e que possa subsidiar a elaboração de aulas por professores e auxiliie alunos de graduação. Será exposta parte da evolução histórica da argumentação sobre organização do universo e das concepções cosmológicas geocêntrica e heliocêntrica enquanto conhecimento dentro de um contexto social priorizando o enfoque metafísico para a demonstração da profunda complexidade em torno da dita Revolução Heliocêntrica.

Palavras-chave: Cosmologia; Metafísica; Revolução Heliocêntrica.

Sumário

| | |
|---|----|
| Introdução | 6 |
| 1 FÍSICA E ASTRONOMIA PRÉ-COPERNICANA | 9 |
| 1.1 Física e astronomia, ou melhor dizendo, física e geometria..... | 9 |
| 1.2 Física aristotélica, e um pouco da Metafísica..... | 10 |
| 1.3 Principais aspectos dos sistemas pré-copernicanos..... | 13 |
| 2 CONTEXTO HISTÓRICO – MUDANÇA DO MUNDO..... | 19 |
| 3 ASTRONOMIA COPERNICANA | 21 |
| 3.1 Metafísica e motivações copernicanas | 21 |
| 3.2 Aspectos e características da astronomia copernicana | 23 |
| 4 KEPLER E O INÍCIO DA FÍSICA HELIOCÊNTRICA E MODERNA | 28 |
| Considerações Finais..... | 38 |
| Referências | 40 |

Introdução

O ensino de astronomia em todas as esferas educacionais em nosso país se dá de maneira no mínimo insatisfatória (LANGHI e NARDI, 2009). Mais ainda, pelas suas dificuldades empíricas e/ou argumentativas, o ensino de astronomia, quando acontece, sofre intensamente a redução para apenas pregações de nomes e datas ou exclusivamente argumentos de autoridade dentro de sala. Assim o aluno carrega uma *crença* científica, mais fácil de ser adquirida do que o *conhecimento* científico, mas que é apenas fundamentada no argumento de autoridade do professor ou do “cientista”, um equivalente moderno a superstição (MARTINS, 2006), também contribuindo para a concepção da ciência como verdade absoluta.

Esperando a minimização desta visão de ciência, apoiamos a ampla utilização da História da Ciência como ferramenta didática (MATHEWS, 1995). Se a formação dos futuros cientistas continuar a ocorrer disseminando uma visão essencialmente empobrecida em relação a uma tarefa que tem correlações filosóficas muito mais profundas, passaremos a não testemunhar novas revoluções científicas dentro da sociedade. Apenas “produziremos” empiristas rígidos, socialmente neutros para acumular conhecimento e que cultuam, e “comprovam”, velhas verdades ditas por grandes gênios (GIL-PEREZ *et al*, 2001).

Claramente um ensino em que todos os conteúdos tenham metodologias que abordem todos os aspectos da construção da ciência é utópico, devido a inúmeros fatores que não cabe aqui a discussão. Porém para alguns aspectos, como as influências das crenças sociais dominantes e críticas argumentativas, propomos um pequeno aprofundamento em certo conteúdo específico, a saber, a revolução heliocêntrica com pequeno enfoque em bases metafísicas.

Pretende-se situar os cientistas em seus contextos históricos, para ambientá-los dentro das concepções de mundo que dominavam suas sociedades, evidenciando os percalços e rejeições ideológicas que novas teorias revolucionárias enfrentam. Espera-se que assim sejam reencorajadas discussões, dentro e fora de sala de aula, sobre as motivações da ciência em sua essência, que extrapola a concepção da ciência por ela própria ou acumulação de conhecimento comprovados por gênios. Essência essa explicitamente menosprezada na prática do ensino de ciências e entre parte da própria comunidade acadêmica atual. Intenta-se que a abordagem desta revolução traga à tona argumentações omitidas ou pouco usadas no

ensino da teoria heliocêntrica, podendo então auxiliar os professores de Ensino Médio a tornarem este tema parte de seus projetos pedagógicos e estruturarem aulas mais argumentativas. A análise da construção das teorias inseridas nos seus contextos históricos permitirá ampliar a visão dos fatores de influência da ciência, recuperando parte de seu caráter humanitarista.

Arthur Koestler expressa sua visão, nem um pouco próxima à visão intentada pela ciência atual, sobre as teorias cósmicas:

A história das teorias cósmicas, em particular, pode, sem nenhum exagero, ser chamada de história de obsessões coletivas e esquizofrenias controladas, e o modo pelo qual se obtiveram alguns dos descobrimentos individuais mais importantes faz [com que] nos lembremos mais das atitudes do sonâmbulo¹ do que das atitudes do cérebro eletrônico (KOESTLER, 1989, p. XIV).

Inclusive Galileu, propagado como usuário pioneiro de grande repercussão do método científico altamente racional, por motivos puramente pessoais e nada racionais, contrariando as “evidências” obtidas pelo telescópio, insistia em dizer que os cometas eram ilusões atmosféricas (SILVA, 2006; KOESTLER, 1989).

É preciso entender os argumentos à luz da época em que foram desenvolvidos, pois foram feitos pensando nos leitores da época, e claro, colocar-se a par das observações disponíveis naquele momento. Deve-se levar em conta que tais argumentos carregam mais do que apenas simples concepções, carregam motivações e aspirações. Com a compreensão do contexto inserido podemos realmente entender as consequências, inclusive consequências em um escopo mais amplo que o da ciência propriamente dita.

A física aristotélica e o modelo ptolomaico, que hoje são vistos como simplistas e muito falhos, tiveram grande valor na construção do mundo e da sociedade.

Estas concepções eram tão arraigadas nos cientistas que foi difícil argumentar contrariamente. Foram necessários argumentos construídos durante séculos, para se consolidarem apenas com Newton. Como expõe Burt (1991) “acostumamo-nos tanto a pensar que a oposição ao grande astrônomo (Copérnico) baseava-se fundamentalmente em considerações teológicas² (o que, evidentemente, era bem certo à época) que tendemos a esquecer as sólidas objeções científicas que podiam ter sido e foram levantadas contra a nova

¹ Daí vem o nome original da obra: *The Sleepwalkers*.

² Evidencio que são “considerações teológicas”, não ações punitivas da Igreja. Aliás, de acordo com Koestler (1989), a Igreja dominante, a católica, foi menos agressiva a Copérnico do que as protestantes.

hipótese” (BURTT, 1991, p. 29). Devemos ter cuidado para não cair em extremos opostos. Havia objeções tanto metafísicas quanto empíricas.

Ambas as oposições, científicas e de crenças, caminham juntas em suas elaborações, suportando-se correlativamente. Portanto, para superação da oposição, os argumentos matemáticos e lógicos e a estrutura metafísica que sustenta as novas teorias devem ser incorporados em aspectos mais profundos que apenas a própria ciência, pois essas influências estão correlacionadas com aspectos humanos. Como exemplo, está claro em Koyré (1961) que o tema central da discussão pode ser grosseiramente reduzido às discussões das concepções do deus da crença pessoal de cada cientista.

O trabalho “físico” da teoria heliocêntrica recaiu sobre Galileu e foi completado apenas com Newton. Como dito por Martins (2003), a colaboração de Copérnico para a “Física” atual não é relevante, em termos de dinâmica e gravitação, se comparada à contribuição astronômica. Poderia dizer até que a colaboração para a estruturação social foi maior.

1 FÍSICA E ASTRONOMIA PRÉ-COPERNICANA

1.1 Física e astronomia, ou melhor dizendo, física e geometria

A priori, como dito, é necessário ambientar-se à época. A física atual difere muito das concepções vigentes pré-revolução. As concepções de antigamente são de que a Física desvendava as “verdades” da Natureza enquanto a astronomia servia como ferramenta descritiva do que se observava sem necessariamente obedecer a “verdade”:

[...] O astrônomo “salvava” os fenômenos quando conseguia imaginar uma hipótese que resolvesse os movimentos irregulares dos planetas ao longo de órbitas irregularmente formadas em movimentos regulares ao longo de órbitas circulares, **pouco importando que a hipótese fosse verdadeira ou não**, isto é, que fosse fisicamente possível ou não. A astronomia, depois de Aristóteles, torna-se uma geometria-celeste abstrata, divorciada da realidade física. O seu principal alvo era explicar o escândalo de movimentos não circulares no firmamento³. Na prática, serve como método para o cálculo de tabelas dos movimentos do sol, lua e planetas; quanto a natureza verdadeira do universo, nada diz. [...]

[...] Ptolomeu esclarece, outrossim, por que deve a astronomia renunciar a todas as tentativas de explicar a realidade física: porque os corpos celestes sendo de natureza divina, obedecem leis diferentes das encontráveis na terra. Nenhum elo comum existe entre as duas; logo, nada podemos saber da física do firmamento (KOESTLER, 1989, p. 43).

E nas palavras de Hugh Lacey (1979):

Dizia-se então que a tarefa da astronomia era puramente matemática, a de salvar as aparências, nunca tratando das causas ou das verdadeiras trajetórias dos movimentos celestes. Só a física lidava com as causas. Assim se configura uma separação entre explicação causal e explicação matemática, e entre teoria e realidade. A teoria astronômica é apenas um instrumento preditivo: a física é que atinge a realidade e a causalidade (LACEY, 1979, p. 114)

É possível ver esta dicotomia bem destacada, por exemplo, na repercussão da obra de Copérnico. A qual foi a utilização das predições dos movimentos celeste resultante enquanto se menosprezava a qualidade e coerência “Física” das hipóteses.

Do pensamento medieval até a época pós-Kepler “havia fatos mas não causas, movimentos mas não forças motrizes. A tarefa dos astrônomos era observar, descrever e prever, e não pesquisar causas – ‘não lhes cabia discutir o porquê!’. A física aristotélica, que tornava inimaginável qualquer acesso racional e causal aos fenômenos celestes, ia em plena

³ Firmamento é a abóboda celeste observável.

decadência, mas só deixara atrás de si um vácuo” (KOESTLER, 1989, p. 188). Isto ajudou a voz de Kepler se espalhar.

1.2 Física aristotélica, e um pouco da Metafísica⁴

A física aristotélica parte do senso comum e da observação dos fenômenos diários, chegando a uma sistematização e organização coerente sem precedentes. Com a construção lógica sendo seu método de desenvolvimento. Assim que assumidos seus princípios, as consequências tiradas deles são logicamente válidas, mesmo que leve a conclusões dificilmente comprováveis fisicamente.

Na cosmologia aristotélica, o universo é único e eterno, nunca foi gerado e nunca perecerá. São eternos também o movimento e o tempo. Tem como estrutura básica duas esferas: uma pequena esfera, a Terra, fixada no centro de outra, vasta, porém finita, que rotaciona e carrega as estrelas fixas proporcionando os movimentos vistos nos céus. Têm-se duas regiões distintas: terrestre e celeste, ocupadas por matérias distintas e governadas por leis distintas. Cada coisa, seja na região terrestre ou celeste, possui um lugar próprio, conforme sua natureza, e é só nesse lugar que se completa e se realiza um ser, e é por isto que este tende para lá chegar. Como conclui Évora, “o universo aristotélico, portanto, é finito, hierarquicamente ordenado e ontologicamente diferenciado, segundo as qualidades dos elementos” (ÉVORA, 2005, p. 130). As causas encontradas para a explicação deste universo se relacionavam com uma busca teleológica, de sua finalidade, como um comportamento orgânico.

Dentro da física aristotélica percebe-se a organização essencial fundamentada em naturalidade e ordem. Tudo tem seu estado em que é natural e está completo. Partindo do centro do universo para as extremidades, considerando a esfericidade, temos, em sequência, os lugares naturais da terra, da água, do ar, do fogo e da quintessência, o éter, que compõe os astros. Repare que a Terra ser o centro do cosmo é uma consequência da estrutura da

⁴Há que se deixar claro uma das diferenças majoritárias do movimento da física aristotélica, muito usual na concepção dos alunos (ZYLBERSZTAJN, 1983; VILLANI *et al*, 1985), para a inércia finalizada em Newton, objeto de ensino. Com a vivência cotidiana constata-se a necessidade de imprimir força para manter objetos em movimento, assim como Aristóteles disse. A física newtoniana traz o princípio da equivalência entre o movimento retilíneo uniforme e o repouso, sendo ambos estados de equilíbrio. Assim o movimento passa a ser tão natural quanto o repouso. Uma negação das nossas experiências.

Natureza. Ou seja, a terra não tem lugar natural no centro da Terra, e sim a Terra é um produto da acumulação da terra que completou seu movimento ao devido lugar.

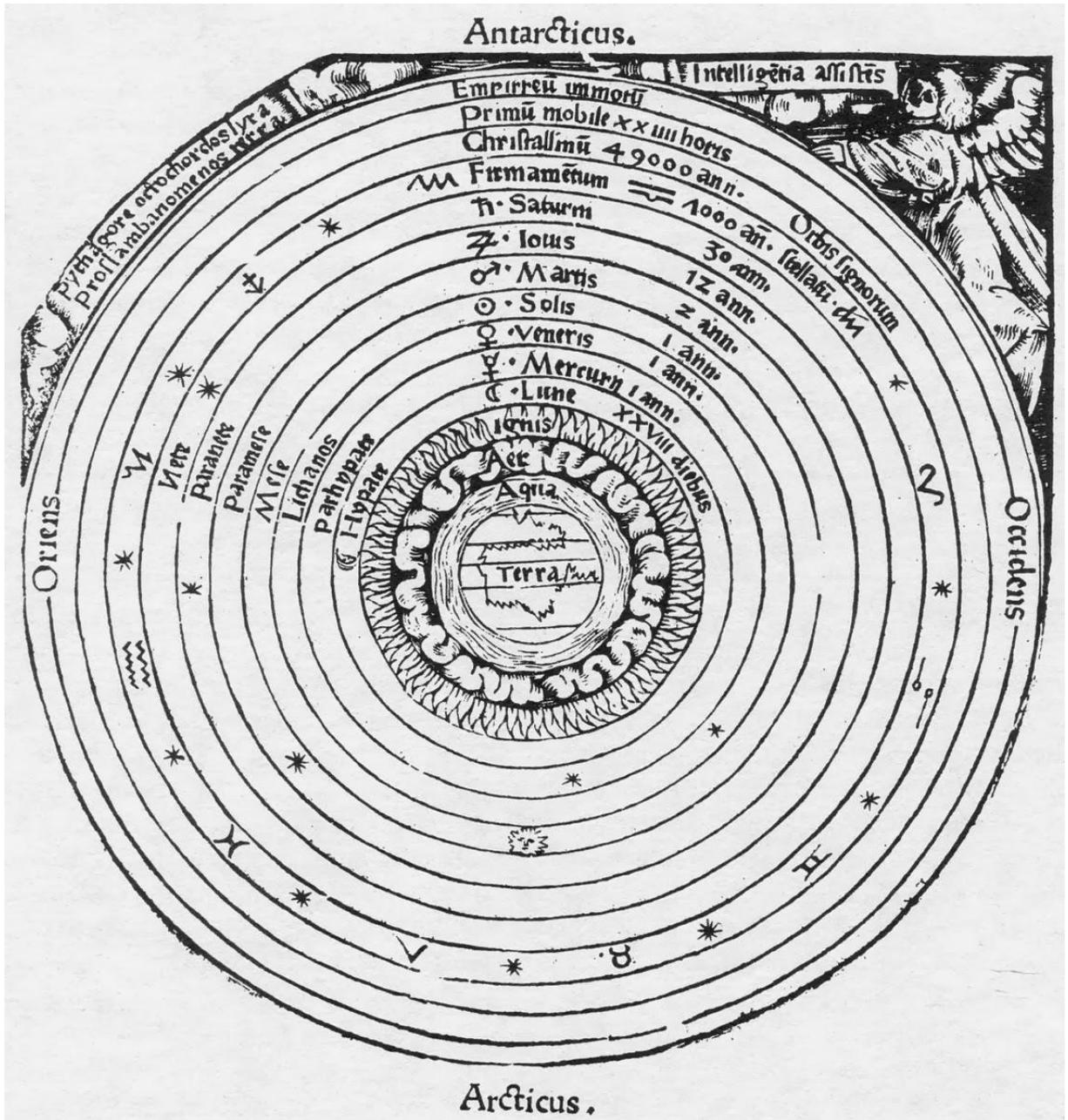


Figura 1 - Estrutura do universo aristotélico. (Retirado de https://lh5.googleusercontent.com/-a96Jh7X9bKw/Up4E-eHBxZI/AAAAAAAAAGgE/cBGZcN_t9i8/s1600/figure-B-aristotle-libri-de-caelo.jpg)

A divisão dos movimentos é feita em *naturais* (causado pela natureza do corpo) e *violentos* (causado por um agente, e que se opõe ao “natural”) propondo que cada ser⁵ tem seu lugar preferencial de repouso⁶. Repouso, aliás, sendo o estado para o qual as coisas tendem. O movimento é apenas um processo, que cessa quando, no movimento *natural*, atinge o “local natural” ou quando, no movimento *violento*, o motor causador do movimento para de agir. Para os corpos celestes o movimento “natural” é o circular uniforme, pois sua essência difere em absoluto dos corpos mundanos. Estabelece-se assim que nenhum movimento, exceto dos corpos celeste, pode ser perpétuo.

A existência do vácuo, dentro da física aristotélica, é descartada. Não seria possível o vazio, pois, como o movimento do corpo depende da força impressa sobre ele e é dificultado pelo meio no qual se move⁷, não havendo meio implicaria em movimento instantâneo já que nada oferece resistência. Além disso, dentro do vazio absoluto não há local privilegiado, todos os locais são semelhantes, não haveria diferenciação entre o “lugar natural” e qualquer outro, tornando o movimento natural indiferente, não levando a um estado de maior ordenação.

Com as características e limitações de duração dos movimentos constrói-se um universo finito no qual o equilíbrio é atingido quando tudo está em repouso em seus lugares naturais de forma bem ordenada de acordo com sua essência. Mesmo o movimento celeste sendo perpétuo, deve ser circular, não extrapolando alguma limitação máxima mais externa, mantendo-se ordenado.

Dissemina desta forma a concepção de hierarquias bem determinadas dentro da natureza, hierarquias parecidas com esta podem ser constatadas em todas as estruturas sociais que foram vigentes até por volta do século XVIII. Não se pode estabelecer uma ligação simplista entre estas diferentes produções sociais, mas há inegável correlação entre estes ramos da sociedade.

Como coloca Koestler (1989),

⁵ “Ser” é usado como um termo bem amplo. Leia-se objeto inanimado, ser vivo, elementos naturais, corpos celestes, cosmos etc. É tão amplo devido à organicidade da natureza para Aristóteles.

⁶ O “local natural” de cada coisa é aquele, dentro da estrutura do cosmos, pertencente à sua essência.

⁷ Há uma possível simbolização matemática com relação ao movimento para Aristóteles, que é $v \propto F/R$, sendo v a velocidade, F a força motora e R a resistência oferecida pelo meio. Particularmente não acho válida essa matematização como uma representação fidedigna do pensamento em relação ao movimento aristotélico, tendo em vista que, até por volta do séc. XVIII com Kepler, a ciência física era dissociada da matemática, como visto em 1.1. Não esquecendo esta dissociação, pode-se recorrer a equação para análise das consequências.

O segredo do universo medieval é que é estático, imune contra a mudança; que cada artigo no inventário cósmico tem o seu lugar permanente, a sua posição, a ele atribuída num dos degraus da escada. Lembra-nos a hierarquia de bicadas num galinheiro. Não há evolução de espécies biológicas, não há progresso social; nenhum tráfego percorre a escada para cima ou para baixo. O homem pode aspirar uma ida superior ou condenar-se a outra, inferior, mas só irá para cima ou para baixo, na escada, após a morte; enquanto estiver neste mundo, a sua posição ordenada de antemão, o seu lugar, não pode ser alterado. Assim, a abençoada imutabilidade prevalece até no baixo mundo da mutabilidade e corrupção. A ordem social é parte da corrente, e parte que liga a hierarquia de anjos à hierarquia de animais, vegetais e minerais (KOESTLER, 1989, p. 62).

A física aristotélica foi a verdade durante toda a Idade Média. Durante sua aceitação nesta época, algumas características que fizeram parte da elaboração foram deixadas de lado. Em princípio, para a elaboração da teoria, houve um caráter empírico. Os resultados das experiências diárias foram o ponto de partida. A base na experimentação para desenvolvimento de ideias foi abandonado durante grande parte de sua vigência, e pode ser que esta união tenha sido retomada, consciente e claramente, apenas em Galileu (KOESTLER, 1989, p. 68-69), mas há este aspecto surgindo em Kepler. Em Kepler, apesar de todas as contradições pessoais, a busca empírica de Aristóteles superou a busca intuitiva de Platão nas suas conclusões e dá moldes à ciência moderna.

1.3 Principais aspectos dos sistemas pré-copernicanos

É importante ter em mente a situação vivida pelos astrônomos terrestres, principalmente àquela época. A visão que temos do referencial terrestre não propicia conhecimento das distâncias aos astros, pois temos dados apenas das suas projeções angulares até nós. Observamos apenas movimentos bidimensionais. A tridimensionalidade de qualquer sistema astronômico a partir deste tipo de dados depende exclusivamente da interpretação dada a eles.

A movimentação mais comum no nosso céu, e que provavelmente foi a primeira a ser observada, é a do Sol e da Lua. Hoje entendemos como sendo a rotação da Terra sobre o próprio eixo em 24 horas o motivo da movimentação em torno de 15° por hora do Sol e da Lua, também das estrelas. Cinematicamente o resultado seria o mesmo caso a Terra se mantivesse parada e os astros se movimentassem com velocidade angular equivalente.

Mantendo, neste aspecto, concordância com a física aristotélica, levando em conta que não há percepção do movimento do chão e não havia fenômenos explicáveis por esse movimento, mais ainda, a interpretações dos fenômenos apontava contrariamente⁸. Concluí-se o repouso da Terra.

Têm-se dois grandes argumentos para a centralidade da Terra no universo. O argumento aristotélico se baseia na queda dos corpos. O argumento ptolomaico é astronômico, baseado no horizonte visível.

O primeiro é sobre a queda vertical dos corpos e a esfericidade da Terra. Se todos os corpos caem verticalmente em qualquer lugar da Terra, então todos caem seguindo linhas radiais ao centro. A física da época nos dizia que os corpos pesados, obedecendo sua constituição, pertencem ao centro do universo. Se caem no sentido do centro da Terra, logo este deve ser o centro do universo.

De acordo com as observações astronômicas constata-se apenas metade do zodíaco visível a cada noite de horizonte a horizonte. Caso a Terra não estivesse no centro, o horizonte não cortaria a esfera das fixas exatamente no meio. Este é o segundo argumento.

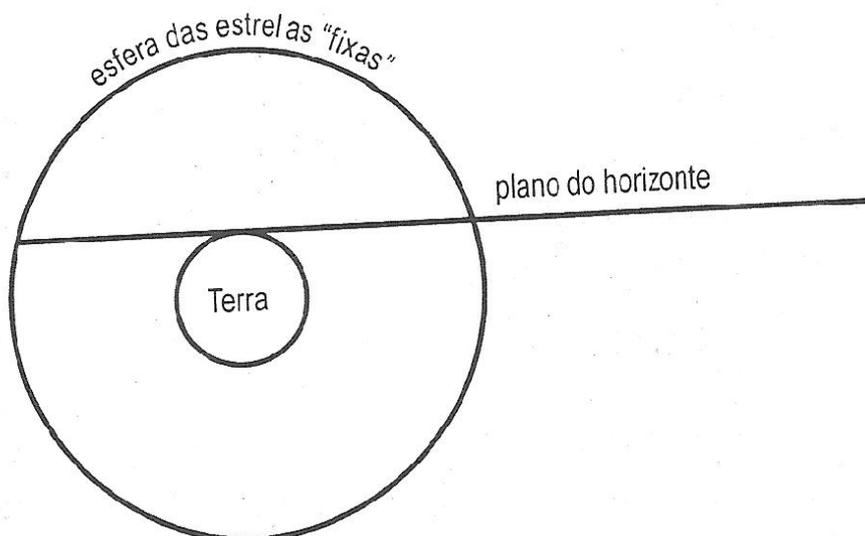


Figura 2 - Argumento astronômico para a centralidade da Terra (Fonte: *Commentariolus*, 2003, p. 33)

⁸O argumento mais forte pode ser a observação do lançamento ao alto de um objeto. Se a Terra girasse deveria ser de oeste para leste, assim o objeto lançado, ao perder o contato com o chão, deveria se atrasar com relação ao ponto de lançamento, caindo alguma distância a oeste.

O Sol, além da rotação diária, durante o ano tem um atraso com relação às estrelas. No decorrer do ano, o Sol percorre as constelações do zodíaco. A cada nascente e poente pode-se identificar a constelação diametralmente oposta a que ele ocupa, mantendo-se aproximadamente um mês em cada constelação. A constelação diametralmente oposta é identificada como sendo a última a desaparecer ao fim da noite, ou a primeira a surgir ao final do dia. Também oscila no horizonte leste, com um extremo mais ao norte e outro mais ao sul, esta é a causa dos solstícios, sendo o equinócio a metade deste caminho.

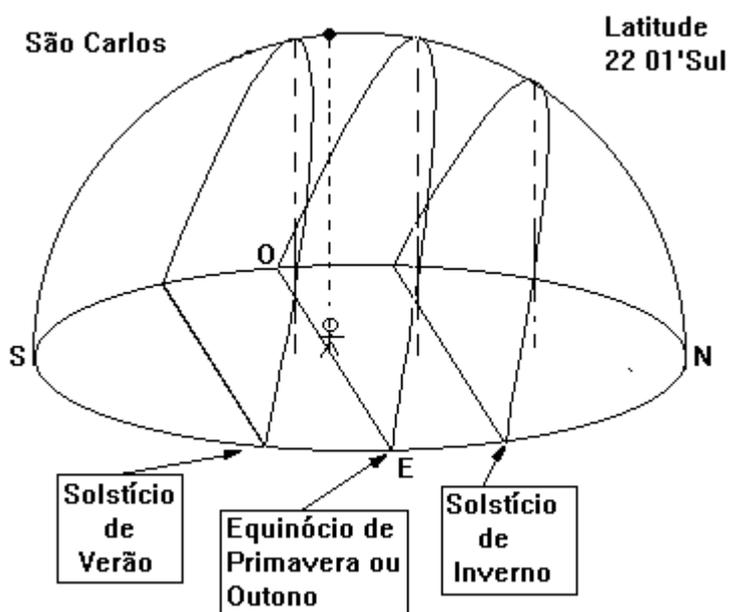


Figura 3 - Trajetórias observadas durante o ano para o movimento do Sol (Fonte: <http://www.cdcc.usp.br/cda/aprendendo-basico/estacoes-do-ano/estaca04.gif>)

Estes movimentos são bem descritos traçando um círculo no plano do centro terrestre e inclinado ao equador celeste, chamado de eclíptica. Os caldeus já tinham concluído que a velocidade do Sol ao percorrer a eclíptica não é constante (MARTINS, 2003. In: COPÉRNICO, Introdução ao *Commentariolus*, p. 42). A velocidade constante resultaria em períodos iguais de permanência em cada casa do zodíaco e divisão igualitária dos períodos entre solstícios e equinócios, e ambos não acontecem⁹.

⁹ Há outro movimento muito mais lento, a chamada precessão dos equinócios. O polo do plano do equador terrestre faz um movimento circular em relação ao polo da eclíptica, parecido com o de um pião. Isso faz com que os pontos equinociais se movam com relação ao equador celeste. Este movimento foi descoberto por Hiparco em 128 a.C. comparando observações de 160 anos antes (MARTINS, 2003. In: COPÉRNICO, Introdução ao *Commentariolus*, p. 43).

O maior problema para a descrição dos céus eram alguns astros errantes, mais precisamente cinco, os planetas. O movimento majoritário é oposto ao das estrelas, portanto viaja para o leste. E mais, o movimento não parece nem ser circular, nem uniforme, pois o planeta sobe e desce com relação à eclíptica e algumas vezes o planeta avança mais rapidamente, algumas vezes mais lentamente, ainda parando e retrocedendo e avançando novamente, o laço retrógrado (Figura 4).

As concepções da época envolviam a utilização de círculos para as descrições celestes. Os movimentos mais regulares, dominantes no céu, eram bem explicados dentro desta concepção, pode-se induzir a generalidade da utilização dos círculos. Para os movimentos mais complicados a resposta foi composição de movimentos circulares¹⁰. Esta era a perfeição buscada, acreditando ou não na real existência de tais esferas que continham os movimentos.

Martins (2003) resume bem os estratagemas usados, usualmente ainda mantendo a velocidade angular constante,

Para explicar os movimentos planetários, os astrônomos criaram sistemas de círculos (ou esferas) que se movem sobre outros círculos (ou esferas). O círculo principal associado a cada astro, que serve de base para o movimento dos outros círculos menores, é chamado *deferente* (ou seja: *transportador*). O centro do deferente podia coincidir com o centro da Terra ou ele poderia ser *excêntrico*. Os círculos ou esferas menores, que se apoiam sobre o deferente, são chamados *epiciclos*. [...]

[...] O astro estudado está colocado sobre a circunferência do último epiciclo [...] (MARTINS, 2003. In: COPÉRNICO, Introdução ao *Commentariolus*, p. 52).

¹⁰Atualmente as séries de Fourier dão aval matemático para a possibilidade de qualquer movimento periódico ser descrito pela superposição de movimentos circulares adequados.

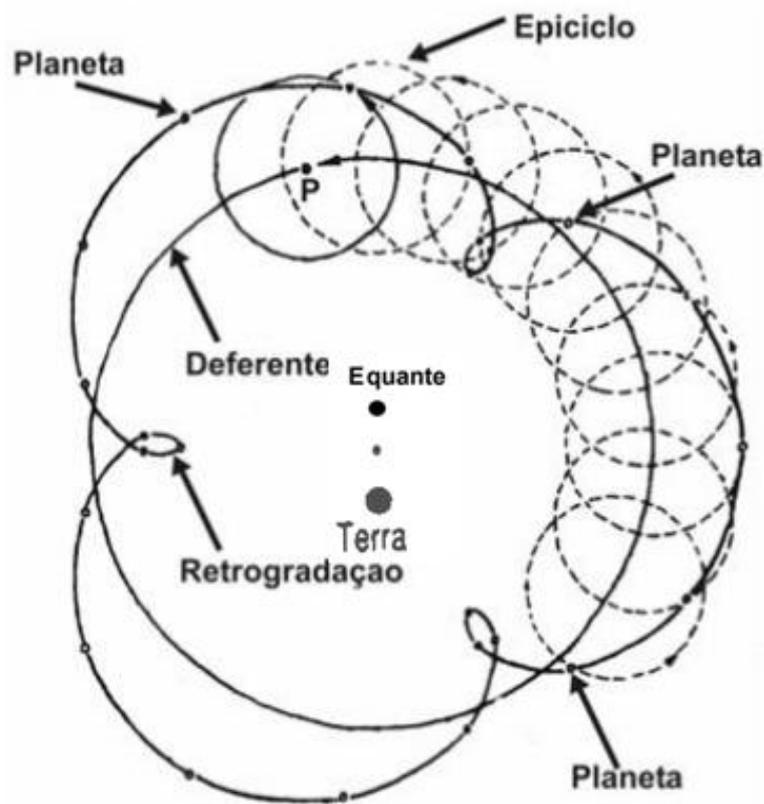


Figura 4 - Sistema de deferente excêntrico, ponto equante e epiciclo para a trajetória de um planeta satisfazendo o laço retrógrado. (Fonte (modificada):

http://www.conexaoprofessor.rj.gov.br/downloads/cm/cm_69_5_1S_1.pdf)

Parte da crença de perfeição também requeria a velocidade angular constante. Em alguns casos foi necessário acrescentar um novo ponto, o *equante*. Este ponto é simétrico à posição da Terra com relação ao centro do deferente.

Cada ciclo de movimento para o retorno ao ponto de marcação inicial demora vários anos, no caso de Júpiter e Saturno são necessários séculos de observação (MARTINS, 2003. In: COPÉRNICO, Introdução ao *Commentariolus*, p. 58). É importante lembrar ainda que, pela complexidade dos movimentos, a representação exigia círculos em diferentes planos de rotação.

Quanto às distâncias, pouco se podia dizer. Além das distâncias até a Lua e ao Sol, as quais houve tentativa de estimar com método válido, para os planetas não havia necessidade da distância real. A razão geométrica é simples:

[...] em figuras semelhantes os ângulos correspondentes são iguais. Se ampliarmos ou reduzirmos todas as dimensões de todos os círculos de um modelo, todos os seus ângulos correspondentes permanecerão iguais. Ora, as únicas coisas que os astrônomos podiam medir eram ângulos: assim sendo, o valor atribuído aos

tamanhos dos círculos era irrelevante (MARTINS, 2003. In: COPÉRNICO, Introdução ao *Commentariolus*, p. 63).

Ptolomeu teve o sistema mais completo e acurado na concordância entre teoria e observação. Graças ao “uso totalmente livre de todos os tipos de recursos matemáticos sem qualquer limitação de princípio em relação a simplicidade dos movimentos básicos” (MARTINS, 2003. In: COPÉRNICO, Introdução ao *Commentariolus*, p. 64). Veremos que futuramente esta liberdade absoluta causará desalento em Copérnico.

Martins (2003) deixa bem claro outro aspecto da dificuldade encontrada pelo sistema posterior,

Não se pense que Copérnico substituiu por sua teoria científica uma proposta idiota de um astrônomo obtuso. A proposta de Ptolomeu é ciência, do mais alto nível. Os astrônomos que o seguiram não eram também idiotas dobrados sob o jugo da autoridade do passado. Eram pessoas que adotavam a proposta geocêntrica de Ptolomeu por perceberem seu enorme valor e por não conhecerem uma alternativa que estivesse a seus pés (MARTINS, 2003. In: COPÉRNICO, Introdução ao *Commentariolus*, p. 65).

Talvez não “estivessem dobrados sob o jugo da autoridade”, e claro que não eram idiotas, mas veremos alguns dogmas que dobravam muitos, inclusive o próprio Copérnico.

2 CONTEXTO HISTÓRICO – MUDANÇA DO MUNDO

Os gregos haviam empregado duzentos e cinquenta anos para progredir de Pitágoras ao sistema heliocêntrico de Aristarco; a Europa precisou de mais de duas vezes esse tempo para completar o correspondente progresso de Gerberto a Copérnico. Os gregos, uma vez reconhecido o fato de ser a terra uma bola flutuante no espaço, tinham-lhe quase imediatamente imprimido um movimento. A Idade Média, apressadamente, a imobilizou no centro de uma rígida hierarquia cósmica. Não foi a lógica da ciência, não foi o pensamento racional que determinou a forma do desenvolvimento seguinte, mas um conceito mitológico que simbolizava as necessidades da época: o universo tabernacular¹¹ foi substituído pelo universo da Corrente de Ouro (KOESTLER, 1989, p. 59).

É interessante discutir o intervalo entre as publicações de Copérnico, o *Commentariolus* e *De Revolutionibus orbium coelestium*, em torno de 1512 e 1543, respectivamente. Usualmente é propagado que esta demora foi devido ao clima repressivo às ideias que eram dominadas pela Igreja. Porém, o *De Revolutionibus* foi incluído no *Index Librorum Pohibitorum* setenta e três anos depois de publicado.

O século XVI, durante os papados de Leão X, Clemente VII e Paulo III, à época de Copérnico, ao contrário do que usualmente é propagado, foi marcado por relativa liberdade de pensamento e tolerância intelectual. Desde que não se desafiasse o papa abertamente, como fez Lutero, havia a livre repercussão em discussões, principalmente com o aumento da popularidade devido à expansão da imprensa. Inclusive Nicolau Schoenberg, cardeal de Cápua, encorajou e pediu a Copérnico para mandá-lo uma cópia, às custas do cardeal, de todo material acerca da teoria heliocêntrica (KOESTLER, 1989, p. 101).

A demora seria melhor atribuída à personalidade e aos traumas de infância de Copérnico. O culto ao segredo dos pitagóricos, de que o conhecimento só seria aproveitado se fosse repassado às pessoas já conscientemente puras e preparadas, o fez imaginar que seria como “(...) derramar água limpa e fresca num poço cheio de imundice; nada lucraríamos, a não ser agitar a mundície e estragar a água”¹². Essa foi uma forma de racionalizar seu medo de “se sujar” ao publicar suas ideias sem aporte teórico profundo, partindo de axiomas que deveriam ser aceitos, mas que contrariavam profundamente as ideias vigentes. Bastava a ele ter sido órfão aos dez anos, com um leproso por irmão, e de um sombrio tirano como tutor. O risco de ser ridicularizado foi grande empecilho à publicação. Portanto, o temor ao ridículo

¹¹ Aproximadamente o formato de uma tenda.

¹² Trecho da carta de Lísis a Hiparco traduzida por Copérnico.

superava o da excomunicação, sabendo que “não seria capaz de provar aos ignorantes, nem defendê-lo dos peritos” (KOESTLER, 1989, p. 102).

Desde a Antiguidade era parte da concepção de mundo o aparente comportamento em busca da simplicidade da natureza, de que as soluções naturais com o mínimo de trabalho são as que mais agradam a natureza. Para Burt (1991, p. 31-32), esse fato talvez tenha diminuído a repulsa pelo sistema de Copérnico, já que ele próprio buscava maior simplicidade. A próxima seção deixará claro que esta análise não deve ser muito relevante, visto que no modelo finalizado no *De Revolutionibus* houve na realidade aumento da quantidade de círculos, sendo que o único elemento eliminado foi o equante (KOESTLER, 1989; MARTINS, 2003. In: COPÉRNICO, Introdução ao *Commentariolus*). A simplicidade de Copérnico era uma reinterpretação platônica.

Algumas mudanças sociais ocorridas durante cerca dos cem anos antecedentes a ele devem ter sido mais relevantes para a repercussão de mudança tão drástica como nos tirar do centro do universo e mudar por completo os pontos de referência e seus significados.

Acontecia a Renascença, retomando a literatura e pontos de vista da Antiguidade; borbulhava o comércio de longas distâncias, com culturas se encontrando e se descobrindo profundamente; a descoberta das Américas, o Novo Mundo; rebeliões religiosas criaram e espalharam novos centros diferentes. Burt (1991) analisa que “os limites do conhecimento humano tradicional repentinamente pareceram pequenos e pobres; os pensamentos dos homens passaram a acostumar-se com a ampliação constante de seus horizontes” (BURTT, 1991, p. 32) e ainda afirma que o próprio Copérnico apontou com ênfase esta ampliação de horizonte intelectual da época sendo um fator decisivo para a própria formação.

Quando encontramos a disposição para a precisão enraizada em Kepler, vem acompanhado da emergência desta atitude, além da concepção pessoal pitagórica. Os navegadores e engenheiros, os instrumentos e teorias, sendo estimulados pela expansão e da indústria da ciência, trariam melhores resultados quanto mais precisas e “de acordo com a realidade” as produções fossem:

O lento crescimento da segurança, do comércio e das comunicações, o desenvolvimento de cidades e a evolução de novas artes e técnicas, a invenção da bússola magnética e do relógio mecânico, os quais proporcionaram uma sensação mais concreta do espaço e do tempo, a utilização da força hidráulica, e até o melhoramento do arrego dos cavalos, forma alguns dos fatores que apressaram e intensificaram o pulso da vida e conduziram a uma gradativa mudança do clima intelectual (KOESTLER, 1989, p. 68).

3 ASTRONOMIA COPERNICANA

3.1 Metafísica e motivações copernicanas

Diz Koestler que “de Aristarco¹³ a Copérnico, [há] só um passo [...]”, tal passo demorou mais de um milênio e meio.

Platão não contribui muito à astronomia por avanços concretos. Porém lançou conclusões gerais, obtidas por um processo metafísico, sobre o movimento e a forma do mundo, as quais tiveram enorme importância no que seguiu dentro dos esforços dos astrônomos matemáticos, para que encaixassem as aparências no sistema e as conclusões metafísicas de Platão. As conclusões “eram que a forma do mundo devia ser a de uma perfeita esfera, e que todo movimento devia realizar-se em círculos perfeitos e com velocidade uniforme” (KOESTLER, 1989, p. 30).

E ele deu ao universo a figura correta e natural... Fê-lo, como que num torno, redondo e esférico, com as extremidades equidistantes, em todas as direções, do centro, dentre todas as figuras a mais perfeita e mais igual a si própria, pois julgou o igual mais belo do que o desigual. Ao todo deu, no exterior redondo, uma superfície perfeitamente acabada e lis, por muitos motivos. Não precisava de olhos, pois fora dele não havia nada visível; não precisava de ouvidos, pois fora dele não havia nada audível; e fora dele não havia ar que precisasse ser aspirado... Imprimiu-lhe o movimento adequado a sua forma corporal, dos sete movimentos aquele mais ligado à compreensão e inteligência. Girando-o sobre si próprio num mesmo lugar, fê-lo mover-se com rotação circular; os outros seis movimentos (isto é, reto, para cima e para baixo, para frente e para trás, direita e esquerda) tirou-os dele, e livrou-o dos seus desvios. E visto que, para tal revolução não precisava de pés, fê-lo sem pernas e sem pés... Liso e nivelado em toda parte equidistante do centro, um corpo inteiro e perfeito, feito de corpos perfeitos... (PLATÃO, *Timeu*. In: KOESTLER, 1989, p. 30)

Tais esforços, como o de reduzir as irregularidades aparentes pelo uso de círculos perfeitamente regulares, ocuparam os dois mil anos seguintes, graças a Aristóteles que promoveu a concepção lançada por Platão a dogma dentro da astronomia. O dogma, sendo aceito, ocasionou esta insistência, no que hoje chamamos de erro, e que é colocado como responsável por um emperramento do desenvolvimento da astronomia (KOESTLER, 1989, p. 31).

¹³Aristarco de Samos (310 – 230 a.C.) foi um dos filósofos astrônomos que desenvolveu seu trabalho em bases pitagóricas e proclamou um sistema heliocêntrico. Durante a Antiguidade teve grande reconhecimento que se esvaiu por mais de um milênio e meio (KOESTLER, 1989, p. 24).

Copérnico se encaixa perfeitamente nestas características levantadas. A escolha do heliocentrismo como sistema de mundo se dava pela insatisfação da descrição ptolomaica não obedecer por completo o dogma instaurado por Aristóteles e retomado na análise neoplatônica pitagórica dele. Havia a necessidade de a velocidade ser uniforme para as órbitas circulares, e não mais com relação ao equante, um ponto vazio, de Ptolomeu, que varia de órbita para órbita. Copérnico acusa o uso deste artifício não parecer absoluto e nem suficientemente agradável ao espírito. Isto era levar o dogma instaurado ao extremo. Diz ele sobre os equantes:

Assim tal especulação não parecia nem bastante absoluta, nem bastante racional. Portanto, como percebi isso, muitas vezes pensei se era possível encontrar um sistema mais **racional de círculos** dos quais dependesse toda irregularidade aparente, **movimentando-se todos eles uniformemente** em torno de si [dos seus centros], como **exige** a regra do movimento absoluto (COPÉRNICO, *Commentariolus*, 2003, p. 113) [Grifo meu].

Copérnico retomou a importância e dignidade atribuída ao Sol. Um dos argumentos metafísicos para a posição central do Sol:

No meio de todos [os planetas] 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 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, governando a sua família de astros, que giram à volta dele (COPÉRNICO, *As Revoluções dos Orbes Celestes*, 1984, Livro I, Capítulo X – A ordem das esferas celestes, p. 52-53).

A frase final é algum começo para uma explicação física. Além da imponência, que garante o lugar central ao Sol, ele ainda é responsável pelo comando do movimento dos planetas ao seu redor.

Há algumas referências aos antigos gregos pioneiros no movimento da Terra e no heliocentrismo. Hécetas, Filolau, Heráclides do Ponto e Ecfanto, precursores de Aristarco, o qual, na obra final, diferentes dos manuscritos, não foi atribuído importância (KOESTLER, 1989, p. 137-138).

Além da leitura dos antigos gregos, a época precedente a Copérnico presenciou ideias da Terra móvel, como planeta ou astro comum, de movimentos dependentes do Sol, e elaborações que rompiam com o universo medieval.

Por exemplo, Nicolau de Cusa elaborou um mundo sem limitações, portanto sem extremos e sem centro, em que os movimentos não deveriam ser nem circulares nem a velocidades constantes, mas estando tudo em movimento. Um universo sem hierarquias e de livre mutabilidade.

Johann Mueller, chamado Regiomontano, aparentemente planejava uma revolução na astronomia, com influência de Aristarco. Brudzewski, em Cracóvia, e Maria Novara, em Bolonha, principais mestres de astronomia de Copérnico, se diziam discípulos de Regiomontano. Célio Calcagnini, que conheceu Copérnico, escreveu um tratado sobre o movimento da Terra, externalizando algumas ideias da época.

Percebe-se que Copérnico não foi original nem único. Tem mérito pela elaboração de um sistema completo, tão detalhado quanto o de Ptolomeu (MARTINS, 2003. In: COPÉRNICO, Introdução ao *Commentariolus*, p. 79) abrindo caminho para uma construção mais sólida das ideias da época. Talvez o mais inusitado tenha sido um astrônomo tão preso aos dogmas ser o ponto de partida claro de uma revolução, mesmo que não intencional. Imagina-se que nenhum outro antes dele tenha feito uma elaboração tão extensa, visto ser a insatisfação desencadeante um pormenor metafísico pessoal. Para qualquer insatisfação profunda fazia-se necessário a reconstrução da física para a validação de tamanha mudança.

O trabalho de Copérnico, segundo Martins (2003, p. 78) “poderia ter sido feito sem jamais olhar para os céus, pois foi essencialmente uma tarefa de *reinterpretação de dados*”. Assim como os dados depois da releitura, Copérnico apenas reinterpretou a física que impedia a elaboração bem coerente.

3.2 Aspectos e características da astronomia copernicana

As grandes distinções com relação a teoria ptolomaica são:

- (1) O universo tem por centro o sol, (mais precisamente, é heliostático e centrado próximo ao sol).
- (2) A terra move-se.
- (3) A terra é um planeta e move-se de acordo com os mesmos princípios dos outros planetas.
- (4) Existe mais do que um centro verdadeiro do movimento celeste: o sol, em redor do qual os planetas se movem, e a terra em torno da qual se move a lua.
- (5) As órbitas traçadas pelos planetas são fechadas, circulares em sua maior parte e heliocêntricas.
- (6) Os movimentos aparentes do sol e dos planetas, incluindo os de oriente para ocidente, são explicados a partir de uma combinação dos seus movimentos com os da terra (LACEY, 1979, p. 117).

A teoria de Copérnico subvertia as ideias de movimento e das esferas, partindo de uma contradição dos sentidos, como assinala Koestler (RÉTICO, *Narratio prima*. In: KOESTLER, 1989, p. 105).

A seção anterior afirmou que a busca de simplicidade, advinda da metafísica pitagórica, fazia parte dos anseios do sistema copernicano de mundo. Durante séculos, essa afirmação foi confundida com a diminuição de esferas necessárias para explicações dos movimentos, informação obtida na conclusão ao final do *Commentariolus*, de 80 para 34.

De acordo com Peurbach (KOESTLER, 1989; MARTINS, 2003. In: COPÉRNICO, Introdução ao *Commentariolus*), o modelo ptolomaico exigia 40 esferas ao invés das 80 ditas por Copérnico. Precisa-se ter em vista que o *Commentariolus* não foi a construção definitiva de Copérnico, na verdade foi um esboço, sem pormenorizações, visando a ambientação da nova teoria. No *De Revolutionibus*, houve a necessidade de acrescentar algumas esferas, totalizando 48. O resultado então foi um aumento da quantidade de esferas.¹⁴

A simplicidade buscada por Copérnico na verdade se encontra na possibilidade, de, levando-se em conta apenas um ponto central para as rotações, conseguir um sistema movimentando-se com velocidade constante. O movimento retrógrado dos planetas também seria simplificado¹⁵. E alguma aproximação da realidade, como as distâncias da Lua. Em Ptolomeu, a distância da Lua, alterava em quase 100%, em Copérnico não havia isto. No entanto, se lembrarmos a dicotomia vigente entre física e astronomia, tal fato não teve repercussão considerável (MARTINS, 2003. In: COPÉRNICO, Introdução ao *Commentariolus*, p.85).

Alguns aspectos, “valiosos e mais simples” (MARTINS, 2003. In: COPÉRNICO, Introdução ao *Commentariolus*, p. 85), é a facilitação dos cálculos ao usar movimentos circulares uniformes, os epiciclos ptolomaicos são relativamente maiores, assim a aparência geométrica dos pequenos epiciclos de Copérnico é mais simples, e maior semelhança no tratamento entre os planetas, não havia estruturas dissociadas para cada orbe.

¹⁴ Uma explicação plausível para que este erro fosse reiterado durante quase toda história é a de que as ideias do sistema final de Copérnico não compensam a dispendiosidade para analisá-lo em pormenores. O *De Revolutionibus* é um livro denso. Uma pequena sinopse, onde estão as consequências mais importantes, ocupa cerca de 40 páginas.

¹⁵ Durante o livro há várias incongruências com a concepção inicial. Koestler deixa claro algumas dessas contradições (p. 128-131).

Vantagem significativa é a possibilidade de comparar as distâncias planetárias. A explicação é: o epiciclo principal dos planetas exteriores e os deferentes dos planetas inferiores, usados na teoria geocêntrica, são substituídos pela órbita da Terra, já que é o reflexo deste movimento. Assim, todos os epiciclos principais dos externos e os deferentes dos internos, podem ser abolidos, e desse modo o deferente dos externos e o epiciclo dos internos seriam a representação das órbitas em torno do sol.

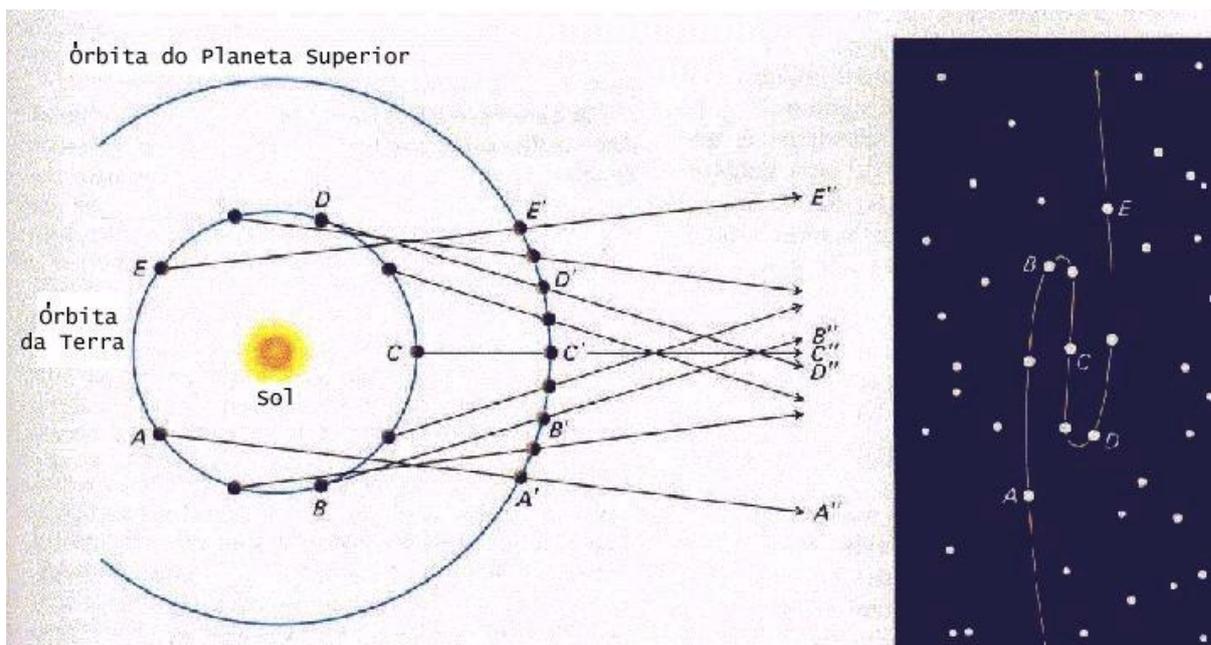


Figura 5 - Laço retrógrado para um planeta além da órbita terrestre no sistema heliocêntrico (Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/p.jpg>)

Martins (2003, p. 79) assinala termos dois aspectos epistemológicos distintos em Copérnico. A tentativa de dar conta das observações (salvar os fenômenos) e de tentar descrever uma realidade física.

Infelizmente o máximo de física que Copérnico usou para explicar seu sistema de mundo - os próximos três parágrafos - foi uma releitura da física aristotélica, mantendo a essência de estruturação como organismo vivo, tudo sendo impulsionado naturalmente por sua constituição.

Com relação à gravidade, ele argumenta que deva ser a inclinação, por vontade natural, de as partes de mesma constituição se juntar em busca da esfericidade. Acontecendo na Terra, na Lua, no Sol, etc.

Para a rotação da Terra, ele utilizou os mesmos conceitos de movimento *natural* e *violento*. Assumindo-se a naturalidade da rotação terrestre, consequência de sua esfericidade, não haveria repercussão na superfície, portanto a Terra não seria despedaçada devido à rotação. Assim, também a noção de que um objeto em queda deva ficar para trás é descartado, pois o movimento da Terra, sendo *natural*, seus efeitos não são os mesmos dos conhecidos pelo movimento *violento* vivenciado e compreendido.

Argumenta também que a Terra tem uma esfera de rotação muito menor do que a das fixas, portanto o efeito disruptivo seria menor, assim, a rotação da esfera das fixas é menos provável ainda. Note-se que o argumento para a rotação da Terra é aplicável à rotação da esfera das fixas.

Como dentro do modelo copernicano a Terra faria uma volta gigantesca em torno do Sol, as estrelas deveriam apresentar paralaxe quando observadas dos extremos da trajetória. Todas as observações apontavam no sentido oposto. Ou a Terra não se moveria, ou as estrelas fixas estariam a uma distância a ponto de tornar insignificante a trajetória da Terra em volta do Sol. A propósito, se as estrelas fixas estão tão distantes assim, também se cria um espaço vazio entre a esfera de Saturno e a esfera das fixas, Martins (2003, 91-92) esclarece que “esse vazio imenso, sem utilidade, pesava contra o heliocentrismo”, lembrando que o atomismo, e sua consequência mais relevante, o vácuo, não tinha sido aceito ainda. Burt (1991) ressalta que “os empiristas contemporâneos, se tivessem vivido no século XVI, teriam sido os primeiros a expulsar, às gargalhadas, a nova filosofia do universo” (BURTT, 1991, p. 31).

Até o surgimento de Kepler, Galileu, Newton e outros, dentro da sociedade física o sistema copernicano foi menosprezado, embora os astrônomos o classificassem como matematicamente genial e adequado (MARTINS, 2003, p.92-93). A Igreja, a princípio uma apoiadora da iniciativa, tomou parte apenas em 1616, setenta e seis anos depois da publicação, como vimos. Já os protestantes pouco protestaram, com exceção de Lutero que fez comentários rejeitando e Melanchton que provara a imobilidade da terra.

O impacto da produção de Copérnico foi se alastrando nas considerações sobre os efeitos na base e alicerces da estrutura.

O universo medieval tinha a finitude definida em todos os aspectos. O tempo de existência dos humanos, começado há 5 mil anos, duraria mais alguns, quando Cristo

retornasse. No espaço estava tudo contido pela última esfera apoiada sobre o reino divino. As posições hierárquicas bem definidas eternamente. E as respostas, mais essenciais, as quais eram únicas, pois a verdade é apenas uma, já haviam sido esclarecidas pelas Sagradas Escrituras, por Euclides e por Aristóteles. Estabelecia-se um universo cômodo.

Copérnico não tentou arrebentar com as concepções mais fundamentais, até porque ele próprio era um conservador. Entretanto, o pensamento da Terra girando abria espaço para abandonar a necessidade de estabelecer uma esfera bem definida aos astros, que poderiam ser colocados a qualquer distância, inclusive individualmente diferentes. Um novo centro para os movimentos dos planetas foi estabelecido, porém não mais era necessariamente o centro do universo. E como se orientar em um universo de movimentos naturais para diversas direções? Como a hierarquia seria restabelecida? A expansão, descentralização e mutabilidade não faziam parte das reflexões de Copérnico, contudo permeavam as consequências de seu sistema.

4 KEPLER E O INÍCIO DA FÍSICA HELIOCÊNTRICA E MODERNA

Johannes Kepler pinta um autorretrato sofrido. Nascido em família decadente e acometido por muitas enfermidades quando criança e adulto, despertou reações variadas entre as pessoas. Nascido em Weil-der-Standt, atual sudoeste da Alemanha. Filho de um mercenário aventureiro, que escapou da forca, e de uma acusada, já na velhice, de bruxaria, que escapou da fogueira. Diferente da tia-avó que criara a mãe, esta sim queimada acusada de bruxaria.

Foi agraciado por ter nascido em local com sistema educacional bem desenvolvido e de fácil acesso. A inteligência precoce levou-o automaticamente da escola, ao seminário e até a universidade.

Kepler é caracterizado por Koestler (1989) como “um Jó que envergonhou o Senhor, fazendo dos furúnculos crescerem árvores”.

Após completar a Faculdade de Artes da Universidade de Tuebingen, mas antes de terminar os estudos de Teologia, recebeu a oferta do cargo de professor de matemática e astronomia em Gratz, capital da Estíria, província austríaca. Após alguma hesitação, aceitou a oferta.

Além das aulas, em que enfrentava dificuldade em achar estudantes, era obrigação do matemático oficial publicar calendários de previsões astrológicas. A visão de Kepler sobre astrologia diferia da contemporânea a ele. Menospresava a que seus pares faziam, mas acreditava sim no poder que a astrologia tem. Nossas explicações atuais para comportamentos se tornaram mais complexas conforme mais áreas do conhecimento foram se dedicando a tal. Mas em um mundo dominado pela rigidez e determinações sociais, algo deveria também determinar a personalidade das pessoas. Que mais seria tão grandioso e complexo como o universo inteiro no qual a própria pessoa é parte deste organismo?

As posições dentro do universo, as harmonias ou desarmonias geométricas seriam ressoadas pela alma propiciando uma configuração geral da vida. Assim o universo e a pessoa teriam uma ligação baseada em propriedades matemáticas. Mescla-se na astrologia as concepções pitagóricas.

Tais concepções pitagóricas se encarregam de muitas conclusões na astronomia de Kepler, aprofundando-se matematicamente mais que Copérnico.

O “Primeiro Mistério” solucionado por Kepler foi acerca da quantidade de planetas: porque seis planetas¹⁶ em vez de vinte ou cem, e qual o motivo para as distâncias e velocidades dos planetas?

Começou por tentar razões simples entre as órbitas, inclusive acrescentando planetas pequenos demais para serem vistos esperando achar uma sequência lógica, e mais outros artifícios, porém nenhum levou a resultados satisfatórios.

Um lampejo surgiu para ele em meio a alguma aula em que precisou circunscrever e inscrever círculos em um triângulo. Percebeu que a razão entre os círculos se aproximava da razão entre as órbitas de Saturno e Júpiter. A partir disso tentou inscrever nos outros intervalos um quadrado, um pentágono, um hexágono, e assim por diante. Mesmo ainda não dando certo, acreditou ser um avanço. “Avancei mais uma vez. Por que procurar formas bidimensionais para adaptar órbitas no espaço? É preciso procurar formas tridimensionais, e, olha, caro leitor, tens agora em mãos o meu descobrimento!” escreveu Kepler (KOESTLER, 1989, p. 169).

Existem apenas cinco sólidos regulares tridimensionais, número igual ao de intervalos dos planetas! A concepção pitagórica afirma a matemática harmoniosa como descrição da realidade. Neste aspecto em específico da matemática, possibilidade finita de sólidos tridimensionais regulares, e da realidade, número de intervalos entre as esferas que contém planetas, então a estrutura, o suporte, a ligação entre as esferas planetárias são os sólidos regulares. Kepler resolvera um dos mistérios! Esta crença pessoal obstinada foi de grande importância nas direções assumidas para os estudos de Kepler.

¹⁶ Até aquele momento os companheiros de rotação em torno do Sol conhecidos, do mais próximo ao mais distante, eram Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter e Saturno.

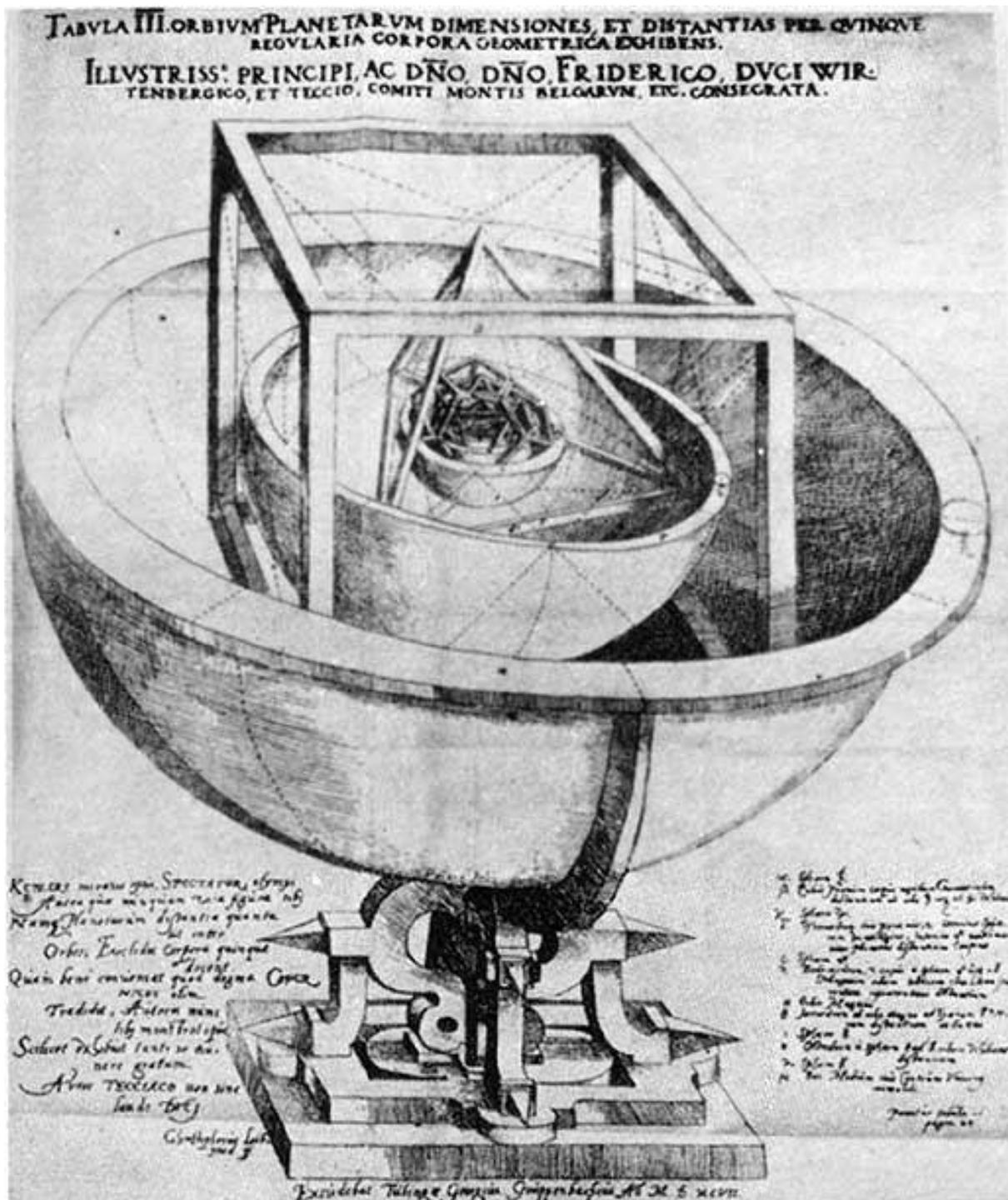


Figura 6 - Sólidos geométricos regulares que, para Kepler, definiriam a proporção entre as órbitas planetárias (Fonte: http://4.bp.blogspot.com/_-PiGe87t-Ow/S-QMWvCDIvI/AAAAAAAAAs8/JwYWvSCxRKI/s1600/spheres_Euclids5solidsKepler.jpg).

Essas reflexões levantadas no parágrafo anterior foram escritas por Kepler em seu primeiro livro *Mysterium Cosmographicum*¹⁷. Mais especificamente se encontram na

¹⁷Aqui Kepler assume publicamente sua crença no heliocentrismo.

Introdução ao Leitor. Em uma primeira parte¹⁸ Kepler expõe a principal prova da necessidade das esferas planetárias inscreverem e circunscreverem os sólidos geométricos regulares.

Em essência, a prova exposta por ele é de que o mundo criado pelo poder de deus é perfeito, assim como são as simetrias entre os sólidos regulares, que existem em mesmo número de intervalos entre os planetas. Obviamente, para Kepler, esses sólidos então foram criados para estruturar as esferas dos planetas. Indo além, ele explica as relações e simpatias entre os sólidos e os planetas, e o motivo de a Terra ser o terceiro planeta, pois marca a separação entre os sólidos de primeira ordem, os quais conseguem ficar “de pé”, nas órbitas externas (cubo entre Saturno e Júpiter, tetraedro entre Júpiter e Marte e dodecaedro entre Marte e a Terra) e os de segunda ordem, os quais devem “flutuar”, nas órbitas internas (icosaedro entre Terra e Vênus e octaedro entre Vênus e Mercúrio). Se fosse diferente a organização seria indigna e feia. Os outros argumentos desta primeira parte seguem estas deduções apriorísticas da harmonia da criação.

Ao começar a segunda parte, surpreendentemente Kepler classifica suas certezas divinas em “argumentos de probabilidades”, sendo confirmados ou refutados pelos dados. “Sem transição, num único surpreendente salto, atravessamos a fronteira entre a especulação metafísica e a ciência empírica” (KOESTLER, 1989, p. 174).

Os sólidos não se encaixaram como Kepler confiante anunciara. Para Júpiter, disse para “ninguém o estranhar, em virtude da grande distância” e para Mercúrio inscreveu a esfera no cubo formado pelas quatro arestas medianas do octaedro. Usou outros métodos também para resolver as discrepâncias com a Lua e as diferentes distâncias durante o ano. Também criticou os dados de Copérnico por não serem de confiança para determinação absoluta. De grande importância foi a procura de um centro para os seus sólidos um pouco afastado do Sol, o que futuramente seria o centro da elipse.

Seguindo o livro, foi pioneiro e começou a procurar uma razão matemática entre o período de revolução do planeta e sua distância ao Sol. Sabia-se com exatidão a duração da revolução dos planetas desde a Antiguidade, e a relação de quanto mais longe mais longo o

¹⁸ Estas “partes” são separações feitas por Koestler e se justificam por serem uma divisão das épocas de pensamento. “O primeiro é medieval, apriorístico e místico; o segundo moderno e empírico. O *Mysterium* é o símbolo perfeito do divisor de águas” (KOESTLER, 1989, p. 174).

“ano” do planeta. A relação entre os períodos e distâncias não é tão simples. Além de ser maior a órbita do planeta, sua velocidade também diminui conforme se afasta.

Kepler retomou a unicidade da astronomia com a física ao atribuir a diminuição da velocidade a alguma força emanando do Sol que conduz o planeta nas suas órbitas e esta diminui de acordo com a distância. “Pela primeira vez desde a Antiguidade, fazia-se uma tentativa não somente para a **descrição** dos movimentos celestes em termos geométricos, senão também para lhes atribuir uma **causa física**” (KOESTLER, 1989, p. 176).

Devemos ter especial cautela na afirmação de que a ciência moderna, a partir da Renascença, ou em algum momento específico até o Iluminismo, tenha renegado suas superstições e pensamentos medievais, de forma abrupta. Encontramos algo mais próximo de uma reconfiguração de seus símbolos, sendo sutis as mudanças em seu cerne.

Kepler abre duas possibilidades dentro de sua explicação na primeira edição do *Mysterium*, “[...] ou as almas (II) que movem os planetas são menos ativas quanto mais distantes está o planeta do sol, ou existe apenas uma alma motor (III) no centro de todas as órbitas, [...] mas cuja força quase se esgota quando age nos planetas exteriores, em virtude da grande distância [...]” (KOESTLER, 1989, p. 176).

Vinte e cinco anos depois, na segunda edição, acrescentou:

(III). Se substituirmos a palavra “alma” pela palavra “força”, chegaremos precisamente ao princípio sobre o qual se apoia a minha física dos céus na **Astronomia Nova**... Noutros tempos, acreditei firmemente ser a força motriz dos planetas uma alma... Mas, refletindo que tal causa de movimento diminui proporcionalmente à distância do sol, cheguei à conclusão de ser tal força alguma coisa substancial – não **substancial** no sentido literal, mas... do mesmo modo como afirmamos ser a luz alguma coisa substancial, significando com isso uma entidade insubstancial emanando de um corpo substancial (In: KOESTLER, 1989, p. 177).

Pode-se até dizer, pensando no contexto, que a substituição, de “alma” por “força”, foi em direção a algo mais impreciso ou pelo menos tão ambíguo quanto. A “alma” era algo “entendido”. A substituição coloca no lugar algo sem substância, mas com interações de substâncias. Agora não intrínseco a quem sofre, mas lançado pelo responsável¹⁹. Continua com o gasto por ter de percorrer a distância, não passou ao enfraquecimento da interação

¹⁹Parece um estágio anterior a ideia de “campo”, posterior.

devido as propriedades geométricas do espaço. Não houve um salto do pensamento medieval às concepções da física moderna. Temos um abandono gradual.

Para reforçar a reflexão do parágrafo anterior, o *Mysterium* termina discutindo as constelações no primeiro e último dia do mundo.

As motivações de Kepler seguiram a construção pitagórica iniciada por Copérnico. Durante o *Mysterium*, expõe diversas “razões físicas ou metafísicas” (KOESTLER, 1989, p. 178), principalmente o retorno do motor do mundo ao centro do universo. Explica Koestler (1989, p. 178) “o Sol deve estar no centro do mundo por ser símbolo de Deus Pai, fonte de luz e calor, gerador da força que move os planetas nas órbitas, e por ser o universo heliocêntrico geometricamente mais simples e satisfatório”. Diferentemente de Copérnico em que o Sol não tinha nenhum atributo divino nem influência no movimento dos planetas. Esta atribuição trilhou o caminho da gravitação.

Kepler se valeu de uma “síntese pitagórica de misticismo e ciência”, as eternas e últimas verdades representadas pela geometria, sua obstinada busca científico-religiosa de um universo harmonioso governado por formas cristalinas perfeitas, possibilitando toda sua construção de mundo:

Johannes Kepler se apaixonou pelo sonho pitagórico, e sobre tal fundamento da imaginação por métodos de raciocínio igualmente inseguros, construiu o sólido edifício da astronomia moderna. Trata-se de um dos mais assombrosos episódios da história do pensamento, e antídoto para a piedosa crença de ser o Progresso da Ciência governado pela lógica (KOESTLER, 1989, p. 13).

Como não houve um bom encaixe dos sólidos regulares, também tentou a elaboração do universo em torno das harmonias musicais da escala pitagórica. A união das duas ideias, vinte anos depois, resultou na conhecida terceira lei publicada no *Harmonice Mundi* (*A Harmonia do Mundo*), em 1619.

30 DE PROPORTIONIBUS

CAP. III.

Ordo Proportionum Consonarum minorum in una dupla.

| | | | |
|---|---|---|--|
| 3 | 4 | 5 | Locus Termini maioris, seu gravissimi. |
| 4 | 5 | 6 | |
| 4 | 5 | 3 | Locus Termini minoris seu acutissimi. |
| 5 | 6 | 4 | |
| 5 | 3 | 4 | Locus Termini maioris, seu gravissimi. |
| 6 | 4 | 5 | |
| 5 | 4 | 3 | Locus Termini minoris seu acutissimi. |
| 6 | 5 | 4 | |
| 4 | 3 | 5 | Locus Termini maioris, seu gravissimi. |
| 5 | 4 | 6 | |
| 3 | 5 | 4 | Locus Termini minoris seu acutissimi. |
| 4 | 6 | 5 | |

Fasciculus binarum Medietatem Harmonicarum inter chordas Proportionis duplæ.

3. 4. 5. 6.

4. 5. 6. 8.

5. 6. 8. 10.

10. 12. 15. 20.

12. 15. 20. 24.

15. 20. 24. 30.

Ex his verò sex bigis medietantum harmonicarum, una sola, in numeris 10. 12. 15. 20. patitur definitionem veterum. Nam 12. est medium (illorum sensu) Musicum inter 10. & 15. sic 15. est medium Musicum inter 12. & 20. Excessus enim sunt 2. 3. 5. Ut verò extremi unus trigæ 20. ad 15. sic 2. ad 1. Et ut extremi alterius trigæ 12. ad 10. sic 3. ad 5.

De Trinitate concordantiarum.

Cum ergo Chordæ proportionis duplæ consonent identicè inter illas verò non possint esse una vice plures quam duæ medietates, consonantes & inter se & cum duplis ipsis: hinc orta est famosa illa Musicorum observatio, qui trinis vocibus omnes harmonias

absolvi mirantur. Nam quotcunq; voces præterea accumulentur, singulæ in trium unam redeunt per duplæ proportionis consonantiam identicam.

Quamvis enim existat una consonantia ex omnibus istis chordarum magnitudinibus 3. 4. 5. 6. 8. 10. 12. 16. 20. 24. at quicquid est post 3. 4. 5. chordarum, omne id in unam harum redit per identisonum: ut 6. in 3. & 8. in 4. & 10. in 5: sic 12. in 6. & 3: sic 16. in 8. & 4: sic 20. in 10. & 5: sic 24. in 12. 6. & 3.

Causam hujus rei frustra perunt aliunde, alij ex trina dimensione quantitatis perfectæ, seu corporis, ut quod pater in longum, latum & profundum: alij ex numeri ternarij perfectione: alij ab ipsa adoranda Trinitate, in Divinitate.

Frustra, inquam, omnes: Nam neq; solida quantitas hoc negotiû ingreditur, cum ortum harmonicarum proportionum ex figuris planis docuerimus, & longissimè diversa sit, causâ scientiæ: solida quantitas, à planâ, quippe illa duabus medijs proportionalibus utitur, quas sciri

Figura 7 - Página do *Harmonice Mundi* de Kepler (Fonte: <http://polegaropositor.com.br/wp-content/uploads/2009/02/0107-sm.jpg>).



Figura 8 - Partitura no *Harmonice Mundi* contendo a música executada pela proporção no movimento celeste

(Fonte: http://www.lpwalliance.com/storage/Publications/BriefHistory_of_Light_Photography/6597219fe844fb987316a71d563dd58d.jpg)

Após muitas dificuldades financeiras, excomunicação da Estíria, idas e vindas, Kepler trabalhou algum tempo com Tycho Brahe já em Praga e no castelo de Benatek. As motivações para o trabalho da parte de Kepler foram a possibilidade de manutenção financeira e acesso aos dados incomparavelmente precisos obtidos por Tycho, que por sua vez se interessa em ter uma mente imaginativa ao seu lado para completar e defender seu sistema de mundo²⁰, pedido que foi praticamente ignorado por Kepler.

Após a morte de Tycho em 1601, Kepler assumiu o posto de matemático imperial em Praga. Assim, dedicou-se a escrever e publicar sua obra mais significativa em 1609, *Astronomia Nova baseada nas causas ou Física do Céu derivada das investigações dos movimentos do astro Marte fundamentada nas observações do nobre Tycho Brahe*. Esta é a obra que contém as duas primeiras leis do movimento planetário de Kepler.

Analisando o título do livro podemos ver a diferenciada estrutura para sustentar suas conclusões, pois a física compactuará com a geometria celeste. Koestler (1989) deixa bem claro a mudança:

²⁰ O sistema tichoniano era um misto geo-heliocêntrico. A Terra seria o centro do universo e do movimento do sol e da lua enquanto os outros cinco planetas teriam o sol como centro da órbita.

Assim, a promulgação das leis de Kepler é um marco na história. Foram as primeiras “leis naturais” no sentido moderno: afirmações precisas, verificáveis, sobre relações universais governando fenômenos particulares, expressas em termos matemáticos. Separaram a astronomia da teologia e casaram a astronomia com a física. Finalmente, puseram cobro ao pesadelo que havia perseguido a cosmologia nos dois últimos milênios: a obsessão das esferas girando sobre esferas. E substituíram-na por uma visão de corpos materiais, semelhantes à Terra, flutuando livremente no espaço, movidos por forças físicas que agem sobre eles (KOESTLER, 1989, p. 214-215).

O ápice da modernidade vista em Kepler, e que teria sido ignorada por completo antes dele, foi a incapacidade de ignorar a discrepância de oito minutos de arco da teoria com os dados de Tycho. A necessidade da prática e da filosofia, dos fatos observados e princípios elaborados, os pormenores e a generalização, caminharem conjuntamente deu forma à nossa ciência moderna e sociedade atual. Koestler (1989) diz que “determinou o clima do pensamento europeu nos últimos três séculos, colocou a Europa moderna longe das demais civilizações do passado e do presente e permitiu-lhe transformar o ambiente natural e social tão completamente como se no planeta houvesse surgido uma nova espécie” (KOESTLER, 1989, p. 221).

É destacado o papel diferencial de Kepler introduzindo a causalidade física na geometria formal dos céus. Ele não poderia mais simplesmente acrescentar epiciclos, equantes, rodas ou outros artifícios aleatoriamente para salvar os fenômenos. Deveria haver coerência física.

Introduziu três inovações revolucionárias.

Em Copérnico o Sol era o centro da órbita terrestre, mas não do sistema. Passando a ser o Sol a fonte da força que move os planetas, haveria de ser o centro do sistema.

Estabeleceu, e calculou comprovadamente, que as órbitas de todos os planetas estão aproximadamente no mesmo plano e não oscilam como acreditavam anteriormente.

Koestler (1989) esclarece bem a terceira, atentando para a física,

A terceira inovação foi a mais radical. Para ter mais espaço, viu-se obrigado a libertar-se da camisa de força do “movimento uniforme em círculos perfeitos”, axioma fundamental da cosmologia, de Platão a Copérnico e Tycho. Provisoriamente, deixou que ficasse o movimento circular, mas eliminou a velocidade uniforme. Foi novamente guiado por considerações físicas: se o sol governa os movimentos, a sua força devia agir mais poderosamente no planeta quando este se encontra mais perto da fonte, menos poderosamente, quando distante; logo, o planeta se moverá mais depressa ou mais lentamente, de modo algo relacionado à distância do sol (KOESTLER, 1989, p. 217).

Com esta última mudança, colocou de lado a vontade de Copérnico de manter a simplicidade e ordem do sistema fazendo todos girarem com velocidade constante.

Copérnico tinha o espírito pitagórico, Tycho era um instrumentalista magnífico em busca da exatidão, Kepler oscilou entre os dois por mais vezes que se pode imaginar. Koestler (1989, p. 230) coloca bem, “a medida do gênio de Kepler é a intensidade das suas contradições, e o uso que delas fez”.

Apesar da relação do Sol com o movimento dos planetas ser algo próximo a um turbilhão na visão de Kepler, em alguns momentos ele toca no conceito de gravidade parecido com o de Newton. Koestler (1989) destaca uma parte da introdução da *Astronomia Nova*:

Se duas pedras fossem colocadas em qualquer lugar do espaço, uma perto da outra, e fora do alcance da força de um terceiro corpo cognato, unir-se-iam, à maneira dos corpos magnéticos, num ponto intermediário, aproximando-se cada uma da outra em proporção à massa da outra (KOESTLER, 1989, p. 231).

Em uma carta a Hewart, Kepler manifestou suas intenções com o livro que acabara de escrever:

O meu alvo é mostrar que a máquina celeste não é uma espécie de ser divino, vivo, mas uma espécie de relojoaria (e quem acreditar ter o relógio uma alma, atribui a glória do criador ao trabalho), tanto mais que quase todos os múltiplos movimentos são causados por uma força simplicíssima, magnética e material, precisamente como são causados por um simples peso os movimentos do relógio. E mostro também como a tais causas físicas se deve dar expressão numérica e geométrica (KOESTLER, 1989, p. 233).

Mas para ele próprio a alma não foi substituída por interações naturais entre corpos movidos por forças inanimadas, ponto que inclusive Newton se apegou, utilizando-se de modelos de éter e/ou deus para estabelecer algum “contato” entre fonte e efeito. Ainda remanesce em Kepler a utilização de um “espírito”, algum sentido desconhecido, em cada planeta que reconhece sua posição no espaço e desenvolvem-se os movimentos (KOESTLER, 1989, p. 233-235).

Mesmo nossas definições atuais de força carregam grande aporte metafísico²¹. Não é de surpreender que Kepler não completasse “a transição do universo animado por uma inteligência intencional a outro movido por forças ‘cegas’, inanimadas” (KOESTLER, 1989, p. 233).

²¹ Para esclarecimento ler *Conceitos de força: um estudo sobre os fundamentos da dinâmica* de Max Jammer.

Considerações Finais

Vimos que o neoplatonismo copernicano em seu sistema deixou de lado a importância da precisão empírica dos dados observacionais caso não concordasse com seu misticismo de simplicidade. O resgate das concepções pitagóricas em Kepler pelo contrário o exigiam entremear de geometria precisa da realidade a sua harmonia de mundo. O resultado desta influência está na concepção moderna mecanicista, dicotômica, e determinista das ciências e da sociedade. Aliás, para a sociedade, diria ainda ser contemporânea esta visão, começando a ceder na virada do milênio. Assim como surgiu em Kepler, e também alguns outros filósofos anteriores a ele, como os ockhamistas, Buridan e Oresme, a integração dos vários aspectos sociais vão criando com o passar do tempo uma unidade ideológica predominante. O todo são as relações entre as partes, não apenas a soma. Analisamos a geometria, a física e o neoplatonismo pitagórico se relacionarem por meio de receios pessoais, perseguições metafísicas resultando em cegueira e amnésia parciais, saltos e retrocessos, darem bases para a ciência moderna. Nem um pouco linear e progressista.

Nota-se a derivação da ideia do universo mecânico advinda de aspirações da concepção religiosa. Algo estava defeituoso para Copérnico dentro da concepção puramente mística, ele precisava retomar uma unicidade simplista no seu sistema. Kepler achou que o sistema estava dessincronizado com a perfeição harmônica do criador, para retomar o ápice da perfeição do criador tudo deveria estar de tal modo entrelaçado e seguro por interações matemáticas racionais e ordenadas. O passo seguinte, estabelecer as engrenagens do sistema, foi finalizado por Newton.

Citando duas passagens de Koestler:

Copérnico malogrou. Tentou unir a tradição heliocêntrica ao aristotelismo ortodoxo e malogrou. Newton teve êxito pelo fato de já haver sido a astronomia ortodoxa desfeita por Kepler e a física ortodoxa por Galileu; percebendo uma nova configuração nos destroços, uniu-os numa nova estrutura conceitual (KOESTLER, 1989, p. 363).

É algo difícil de ser feito devido ao nosso apego à tranquilidade:

Todo ato criador – na ciência, na arte ou na religião – implica em regressão a um nível mais primitivo, a uma inocência de percepção libertada da catarata de crenças aceitas.

Outra pré-condição, para que se realizem descobrimentos fundamentais, e para que sejam aceitos, é o que poderíamos chamar de “amadurecimento” da época. É uma qualidade enganosa, visto que o “amadurecimento” de uma ciência para uma mudança decisiva não está determinado pela situação apenas nessa ciência particular, mas pelo clima geral da época (KOESTLER, 1989, p. 363).

Acrescento, ainda que satisfaça as necessidades técnicas desta época.

Hugh Lacey destaca que os estudos de Copérnico nos ensinam que “as provas e os dados não se constituem nos fatores cruciais para avaliarmos uma inovação científica. Mais do que os dados, são as ideias que estão por trás das conjecturas mais arrojadas. [...] A teoria aristotélico-ptolomaica não foi falsificada, mas morreu” (LACEY, 1979, p. 123).

Neste trabalho a análise começou na concepção de mundo medieval hierárquico e teleológico; passamos pela exposição de uma das, se não a maior, ideia revolucionária, desenvolvida a partir da insatisfação espiritual; e se encerrou em Kepler, que fundamentou os pilares da física newtoniana. Os aspectos levantados com maior enfoque são encontrados em estudos não comuns aos estudantes de nosso sistema de ensino, em qualquer grau.

Lacey (1979) afirma que para “compreender ciência – sua racionalidade e dinâmica – implica o estudo de seu crescimento, dos problemas e contextos nos quais teve origem” (LACEY, 1979, p. 111).

Referências

BURTT, Edwin Arthur. *As bases metafísicas da ciência moderna*. Brasília, Editora Universidade de Brasília, 1991.

COPÉRNICO, Nicolau. *Commentariolus: pequeno comentário de Nicolau Copérnico sobre suas próprias hipóteses acerca dos movimentos celestes*. Introdução, tradução e notas de Roberto de Andrade Martins. 2ª edição. São Paulo: Livraria da Física, 2003.

COPÉRNICO, Nicolau. *As Revoluções dos Orbes Celestes*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1984. Tradução de A. Dias Gomes e Gabriel Domingues. Introdução e notas de Luís de Albuquerque. Título original: *De revolutionibus orbium coelestium*.

ÉVORA, Fátima Regina Rodrigues. *A Revolução Copernicano-Galileana: Origem, significado e inserção na história do pensamento científico-filosófico antigo e medieval*. Dissertação de Mestrado. UNICAMP, 1987.

ÉVORA, Fátima Regina Rodrigues. Natureza e Movimento: um estudo da física e da cosmologia aristotélicas. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, série 3, v. 15, n. 1, p. 127-170, jan.-jun. 2005.

Disponível em: <http://www.cle.unicamp.br/cadernos/pdf/FatimaEvora-v15-n1.pdf>. Acesso em: 25/10/2014.

GIL-PEREZ, Daniel; MONTORO, Isabel Fernandez; ALIS, Jaime Carrascosa; CACHAPUZ, Antonio; PRAIA, João. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. *Ciência & Educação*, v.7, n.2, p.125-153, 2001.

KOESTLER, Arthur. *O homem e o Universo: como a concepção do Universo se modificou através dos tempos*. 2ª edição. São Paulo: IBRASA, 1989.

JAMMER, Max. *Conceitos de força: um estudo sobre os fundamentos da dinâmica*. 1ª edição. Rio de Janeiro: Contraponto, 2011.

KOYRÉ, Alexandre. *Do mundo fechado ao universo infinito*. Trad. Jorge Manuel Pereirinha Fernandes Pires. Lisboa: Gradiva, 1961.

KOYRÉ, Alexandre. *Estudos Galilaicos*. Lisboa: Publicações Dom Quixote, 1992.

LACEY, Hugh M. Lições de Copérnico. *Ciência e Filosofia*, n. 1, p. 111-124, 1979.

LANGHI, Rodolfo; NARDI, Roberto. Ensino de astronomia no Brasil: educação formal, informal, não formal e divulgação científica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 31, n. 4, 4402 (2009).

MARTINS, Roberto de Andrade. Introdução. A história das ciências e seus usos na educação, p. xxi-xxxiv. In: SILVA, Cibelle Celestino (ed.). *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino*. São Paulo: Livraria da Física, 2006.

MATTHEWS, Michael R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 12, n. 3, p. 164-214, dez. 1995.

SILVA, Cibelle Celestino. A natureza dos cometas e o escorregão de Galileu. *Scientific American Brasil*, n. 6, p. 20-25, 2006.

VILLANI, Alberto; PACCA, J. L. A.; HOSOUME, Y. Concepção Espontânea Sobre Movimento. *Revista Brasileira de Ensino de Física* v. 7 (1): 37-45, Junho 1985.

ZYLBERSZTAJN, Arden. Concepções espontâneas em física: exemplos em dinâmica e implicações para o ensino. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 5, n. 2, p. 3-16, dez. 1983.

Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol05a09.pdf>. Acesso em: 26/10/2014.