

Capítulo 5

Sistema de Epiciclo e Deferente

Este novo mecanismo matemático, cujo objetivo era unicamente explicar o movimento planetário com respeito à esfera das estrelas, é composto, na sua forma mais simplificada, de um pequeno círculo (o epiciclo) que gira uniformemente ao redor de um ponto situado sobre a circunferência de um segundo círculo em rotação (o deferente). Cada planeta percorreria a circunferência do epiciclo, cujo centro se movimenta ao longo da circunferência do deferente, que por sua vez está centrada, segundo a versão mais simplificada, na Terra (ver Figura 7).

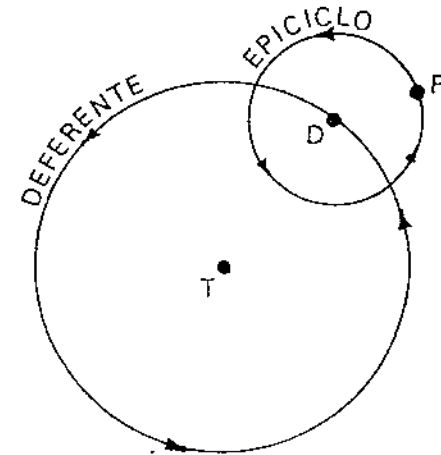


FIGURA 7 - Esquema básico da hipótese do epiciclo-deferente. Onde o planeta *P* gira ao longo de um epiciclo cujo centro *D* descreve um deferente centrado na Terra.

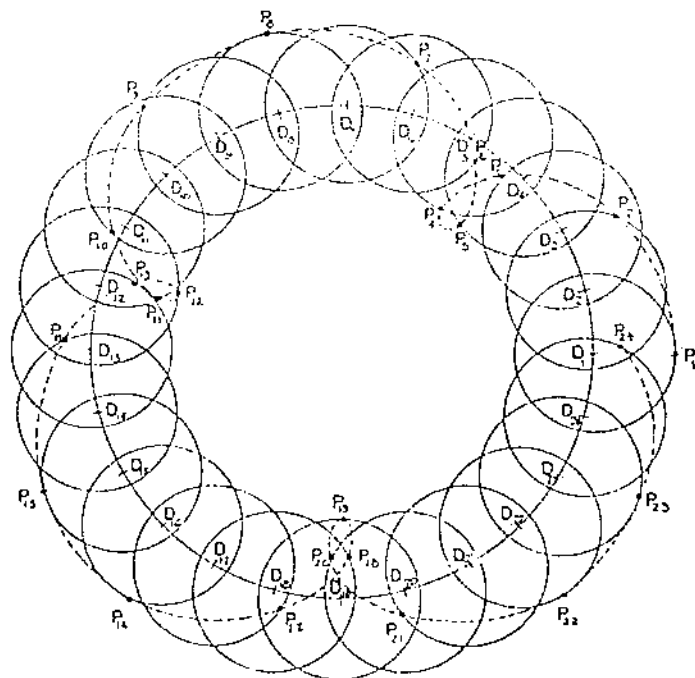


FIGURA 8 – Onde P_n corresponde às diversas posições do planeta P que é carregado sobre o epiciclo cujo centro D descreve um deferente, ocupando as posições D_n , ao redor de um centro onde encontra-se um observador.

Figura extraída de COHEN & DRABKIN, 1966, p. 129.

O movimento do epiciclo, quando visto a partir do centro do deferente, ora parece como acelerado, ora como retardado. Além disso, em alguns momentos, como mostra a Figura 8, ele aparece como um movimento retrógrado.

Um deslocamento de 50° pelo planeta sobre o epiciclo [como mostra a Figura 8] corresponde a um deslocamento de 15° por D . A partir do centro, P parecerá mover-se rapidamente ou lentamente, para trás e para frente, dependendo de sua posição sobre o epiciclo⁵⁸.

Porém, o sistema de um só epiciclo associado a um só deferente não deu conta de todos os movimentos observados dos planetas. A concepção inicial do sistema em questão, proposta por Apollonios, resolvia as irregularidades planetárias mais importantes – movimento retrógrado, variação de brilho, desigualdade entre os períodos de tempo requeridos para as sucessivas trajetórias ao longo da eclíptica. Algumas outras irregularidades secundárias foram explicadas pelo sistema de Hipparchos, que introduziu no sistema de Apollonios epiciclos secundários e excêntricos com centro fixo⁵⁹. Porém ainda restavam alguns resultados observacionais que não se ajustavam à teoria.

⁵⁸ COHEN & DRABKIN, 1966, p. 130.

⁵⁹ Os epiciclos secundários são círculos complementares cuja finalidade é oferecer pequenos ajustes quantitativos entre a teoria e a observação (ver Apêndice Técnico). Outro dispositivo usado para corrigir discrepâncias secundárias é a introdução de excêntricos que correspondem a um deferente cujo centro se encontra deslocado com respeito à Terra. Este sistema é geometricamente equivalente ao sistema de epiciclo e deferente. O movimento do Sol pode ser explicado tanto por meio de um epiciclo secundário (epiciclo menor) associado a um deferente, quanto por meio de excêntricos, como o fizeram Hipparchos e Ptolomeu, desde que sejam escolhidos – para o deferente, o epiciclo e o círculo excêntrico – raios, direções e velocidades apropriados.

Tornou-se então necessária a introdução de novas modificações geométricas que ajustassem o esquema de um epí-ciclo – um deferente – aos movimentos observados. Várias tentativas, neste sentido, foram feitas na antigüidade; entre elas destaca-se aquela feita por Ptolomeu no século II d.C.

Capítulo 6

Astronomia Ptolomaica

“Aristóteles foi o último grande cosmólogo da antigüidade, e Ptolomeu, que viveu quase cinco séculos mais tarde, o último grande astrónomo. A obra de ambos dominou o pensamento ocidental nos campos da astronomia e cosmologia até depois da morte de Copérnico, ocorrida em 1543; Copérnico parece ser seu herdeiro direto” (KUHN, T. The Copernican Revolution, cap. 4).

O sistema astronômico de Ptolomeu, exposto na sua principal obra *Hè Mathématique Syntaxis* – a compilação matemática – (mais tarde chamada, pelos gregos, de *Hè Magiste Syntaxis* – a maior compilação – e que os árabes traduziram sob o título *Al Majisti*, cuja contração deu *Almagesto*, que corresponde à forma como esta obra tornou-se conhecida até hoje), foi a base do pensamento astronômico dominante até o começo do século XVII, sendo o mais exato e o mais amplamente aceito entre aqueles conhecidos na antigüidade clássica e no mundo árabe.

Nos seus conceitos físicos o sistema ptolomaico era, basicamente, aristotélico. Quanto aos aspectos matemáticos, Ptolomeu os derivou a partir de princípios atribuídos a Platão, tentando mostrar todos os fenômenos celestes como produtos de movimentos regulares e circulares.

Além dessas duas influências, o trabalho de Ptolomeu está baseado, em grande medida, sobre o trabalho de Hipparchos⁶⁰, cujo importante tratado astronômico não existe mais.

⁶⁰ Apenas um livro sem importância de Hipparchos foi preservado, e nosso conhecimento do seu trabalho é derivado quase que inteiramente

Freqüentemente se tem interpretado o sistema astronômico de Ptolomeu, exposto no *Almagesto*⁶¹, como apenas um algoritmo geométrico bem elaborado por meio do qual pretendia-se dar conta dos fenômenos observados, ou "salvar as aparências". Interpretações deste tipo foram defendidas, por exemplo, por Heath e Duhem⁶².

Thomas Kuhn, comentando a astronomia matemática desenvolvida por astrônomos como Hipparchos e Ptolomeu, pertencentes à tradição helenística⁶³, afirma que "os cientistas helenísticos aceitavam sem nenhum mal-estar apa-

dos escritos de seu grande admirador e discípulo, Ptolomeu. A maior de todas as descobertas de Hipparchos talvez seja a da precessão dos equinócios (ver nota 20, cap. 2).

⁶¹Segundo T. Kuhn, o *Almagesto* foi o "primeiro trabalho matemático sistemático que dava uma explicação completa, detalhada e quantitativa a todos os movimentos celestes" (1957, cap. 2, p. 72).

⁶²Duhem, comentando a filosofia dos árabes, afirma que eles "quando tentaram examinar essas hipóteses (excêntricos e epiciclos), quando tentaram descobrir sua verdadeira natureza (...) quiseram transformar em realidade, em esferas sólidas rolando em meio aos Céus, os excêntricos e os epiciclos que Ptolomeu e seus sucessores declaravam artificios de cálculo" (DUHEM, P. Essai sur la Notion de Théorie Physique de Platon à Galilée. *Annales de Philosophie Chrétienne*, série 4, p. 79-156, 1908. Trad. por R.A. Martins, Salvar os fenômenos: ensaio sobre a noção de teoria física de Platão a Galileo, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, Supl. 3, p. 23, 1984. Para outros detalhes, ver o ensaio acima citado.

⁶³"A civilização helenística, surgida depois das conquistas guerreiras de Alexandre Magno, centrou-se em metrópoles comerciais e cosmopolitas, como Alexandria, onde a confluência de sábios de diferentes países e raças e o confronto de suas diversas culturas deu como produto uma ciência menos filosófica, mais matemática e mais numérica que sua predecessora, a ciência helênica" (KUHN, 1957, cap. 4, p. 103). Esta última, por sua vez, nascida na Grécia continental durante a época em que esta dominou o vale mediterrâneo, tinha um método essencialmente qualitativo e sua orientação era cosmológica, sendo Aristóteles seu maior e último representante.

rente uma tácita e parcial separação entre astronomia e cosmologia"⁶⁴.

E embora encontremos alguns tratados cosmológicos de autores helenísticos, como é o caso do *Hypotheseis tôn Planetonôn* de Ptolomeu, segundo Kuhn, este e todos os outros astrônomos helenísticos, quando elaboravam seus sistemas matemáticos para prever as posições planetárias, não se preocupavam com a realidade física de seus artificios geométricos.

Nós, por outro lado, acreditamos que não se pode dizer que o próprio Ptolomeu pretendesse apenas construir um artifício geométrico; isto pode ser evidenciado nas palavras de Ptolomeu, no livro 1, cap. 2 – Sobre a Ordem dos Teoremas – de seu livro *Almagesto* quando ele apresenta os seus objetivos ao compor tal livro:

Uma visão da relação geral entre toda a Terra e o todo dos Céus dará início a esta composição.

... e pretendemos encontrar aquilo que é evidente e aquilo que é aparente, a partir das observações feitas pelos antigos e por nós próprios, e aplicar as conseqüências destes conceitos por meio de demonstrações geométricas. E assim, de uma maneira geral, nós temos que afirmar que o Céu é esférico e se move esféricamente; que a Terra, em forma, é sensivelmente esférica; em posição, está exatamente no meio do Universo tal como um centro geométrico; em magnitude e distância, se comporta como um ponto em relação à esfera das estrelas fixas, não tendo qualquer movimento local⁶⁵.

A posição de Crombie com respeito ao trabalho de Ptolomeu é bastante similar àquela por nós defendida aqui. Ele afirma:

⁶⁴KUHN, 1957, cap. 4, p. 104.

⁶⁵PTOLOMEU. *Almagesto*. Livro 1, cap. 2. Trad. por R.C. Taliaferro. In: HUTCHINS, 1952, v. 16. Doravante as citações do *Almagesto* serão feitas a partir desta tradução.

A suposição com a qual ele [Ptolomeu] começa [o *Almagesto*] de que o Céu é esférico na forma e gira como uma esfera, de que a Terra é o centro desta esfera e é imóvel, de que os corpos celestes movem-se em círculos, não é certamente uma suposição arbitrária, pois, sem tentar prová-la absolutamente, ele tentou torná-la o mais plausível possível. De fato, na sua escolha de suposições e hipóteses, Ptolomeu foi guiado, parece, não por um critério arbitrário, mas antes por considerações físicas e metafísicas as quais ele via como empiricamente testadas⁶⁶.

Porém, conclui Crombie:

Deve-se admitir que na sua teoria planetária Ptolomeu usou artifícios geométricos que subordinavam questões das reais trajetórias físicas dos planetas e os princípios aceitos da física aristotélica à precisão dos cálculos. Esta é a fonte da sua reputação de um cientista convencionalista⁶⁷.

Um exemplo desta postura de Ptolomeu é o fato de que, embora seu sistema astronômico fosse basicamente aristotélico, o artifício do epiciclo e deferente não se adaptava muito bem às esferas cristalinas da cosmologia aristotélica.

Porém esta incompatibilidade não parece ter sido um grande problema para os astrônomos helenísticos, para os quais a realidade física das esferas cristalinas e dos mecanismos que asseguravam o movimento dos planetas era um problema secundário. De um modo geral, as cascas esféricas tinham, para eles, uma realidade no mínimo metafórica⁶⁸. O *Almagesto*, segundo Kuhn, não indica clara-

⁶⁶ CROMBIE, 1979, v. 1, p. 96.

⁶⁷ CROMBIE, 1979, v. 1, p. 97.

⁶⁸ Maiores detalhes sobre a postura dos astrônomos ptolomaicos, diante das cascas esféricas de Aristóteles, ver KUHN, 1957, cap. 3 e 4; e DUHEM, P. *Salvar os Fenômenos*, citado na nota 62.

mente se Ptolomeu acreditava ou não em alguma forma de esferas cristalinas.

Seja como for, os astrônomos de um modo geral, até os tempos de Copérnico, acreditavam numa versão adaptada da cosmologia aristotélica, supondo a existência de uma casca esférica para as estrelas e uma para cada planeta, as quais estariam engrenadas entre si, e teriam uma espessura tal que fosse capaz de conter no seu interior o conjunto de epiciclo e outros círculos atribuídos a cada planeta.

Do ponto de vista matemático, os sistemas quantitativos desenvolvidos por Hipparchos, Ptolomeu e seus sucessores são demasiado complexos para serem abordados aqui⁶⁹. Porém alguns pontos destes sistemas devem ser notados, já que, como afirma Kuhn,

as dificuldades que levaram Copérnico a buscar um novo enfoque para o problema dos planetas e a superioridade que atribuía a seu novo sistema se encontram neste abstruso *corpus* teórico quantitativo⁷⁰.

Embora as irregularidades dos movimentos do Sol e da Lua já tivessem sido avaliadas quantitativamente por Hipparchos, no século III a.C., por meio de uma combinação de epiciclos secundários e excêntricos com centro fixo (ver nota 59), as regularidades e irregularidades quantitativas observadas nos movimentos aparentes dos sete planetas, tais como vistas a partir da Terra, só foram reproduzidas por Ptolomeu, que acrescentando excêntricos móveis (que já eram conhecidos por Apollonios, no século III a.C.) e

⁶⁹ Grande parte dos 13 livros que compõem o *Almagesto* consta de tabelas trigonométricas, diagramas, fórmulas, demonstrações, extensos cálculos ilustrativos e longas listas de observações.

⁷⁰ KUHN, 1957, cap. 2, p. 72.

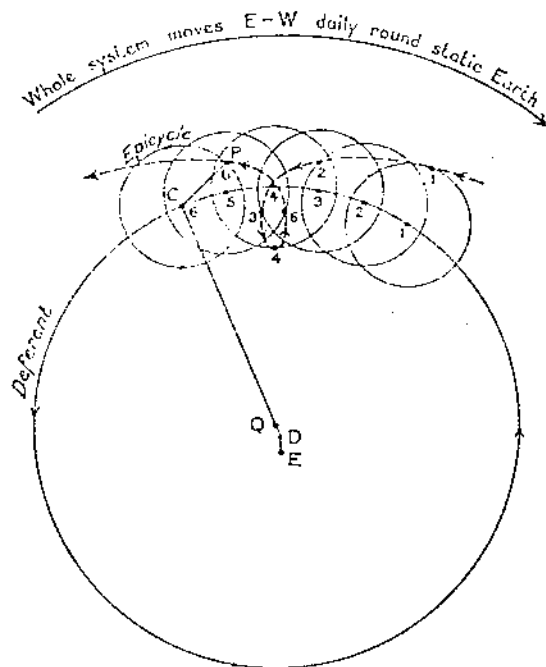


FIGURA 9 – Dispositivo geométrico do sistema de epiciclos de Ptolomeu para o movimento de um planeta *P*, segundo o qual o movimento diário de *P* é produzido pela rotação de leste para oeste, que ele compartilha com a esfera estelar. O movimento aparentemente irregular de *P* é produzido, de acordo com o sistema ptolomaico, pelo movimento de *P* através do epiciclo centrado em *C*, que por sua vez gira ao longo do deferente cujo centro *D* não coincide com o centro da Terra (*E*); e *C* não se move uniformemente nem em relação a *D* nem em relação a *E*, mas em relação a um terceiro ponto, o equante *Q*, ao redor do qual *C* tem velocidade angular uniforme, tal que *CQ* percorre ângulos iguais em tempos iguais.

Figura extraída de CROMBIE, 1979, v. 1, p. 98.

o equante⁷¹ ao sistema de epiciclos e deferentes, explicou, além do movimento dos planetas, os movimentos do Sol e da Lua (ver Figura 9).

O movimento diário de todos os planetas é produzido, segundo o sistema ptolomaico, pela rotação da esfera estelar de leste para oeste, que é compartilhada por todo o sistema.

Ao introduzir os equantes, Ptolomeu afastou-se da máxima de Platão – segundo a qual somente movimentos circulares uniformes poderiam ser usados para explicar os movimentos celestes; fazendo os planetas moverem-se com velocidades não uniformes com respeito a seu centro e de maneira excêntrica. Embora, ao fazer o ponto equante girar com velocidade angular uniforme, de alguma forma, Ptolomeu tentasse preservar o princípio básico de Platão.

Copérnico, porém, não aceitou tal violação por parte dos ptolomaicos. Suas objeções estéticas aos equantes foram um dos pontos essenciais da crítica copernicana a Ptolomeu, como podemos sentir num pequeno resumo escrito por Copérnico, por volta de 1514:

... as teorias planetárias de Ptolomeu e de muitos outros astrônomos, embora consistentes com os dados numéricos apresentam, igualmente, dificuldades que não

⁷¹ O artifício dos excêntricos móveis supõe que cada um dos planetas se move em um círculo, cujo centro não é a Terra, mas sim um ponto situado entre a Terra e o Sol, e que, por sua vez, se move ao longo de um outro círculo ao redor da Terra. O equante foi outro dispositivo utilizado por Ptolomeu para tentar reconciliar a teoria dos epiciclos com os resultados observacionais. Segundo ele, cada um dos planetas se desloca ao longo de um epiciclo cujo centro se desloca ao longo de um outro círculo (o deferente) com velocidade variável, determinada pela condição de que a linha que vai do ponto equante ao centro do epiciclo em questão percorre ângulos iguais em tempos iguais. Assim, se a tal linha percorre 30° em 30 dias, então ela deverá percorrer sempre 30° a cada 30 dias. O ponto equante é escolhido precisamente para reproduzir a velocidade, aparentemente não uniforme, dos planetas.

são pequenas. Isto porque estas teorias não são adequadas, a não ser que se concebiam determinados equantes; parece então que um planeta não se move com velocidade uniforme nem no seu deferente, nem relativamente ao centro de seu epiciclo. Conseqüentemente, um sistema deste tipo não parece ser nem suficientemente absoluto, nem suficientemente agradável ao espírito⁷².

Apesar de seu não-platonismo, de algumas pequenas, porém reconhecidas, inexatidões, e de sua excessiva complexidade (contrastando com a simplicidade do Universo das duas esferas), o sistema de Ptolomeu gozou de grande credibilidade por quase quinze séculos, dominando o pensamento astronômico europeu até o começo do século XVII.

Entre os treze séculos que separam a morte de Ptolomeu e o nascimento de Copérnico, não foi produzida nenhuma mudança fundamental no sistema ptolomaico; alguns dos sucessores de Ptolomeu tentaram apenas aumentar a precisão nas predições das posições dos planetas, introduzindo novos epiciclos e excêntricos aos excêntricos, porém com isto aumentaram a complexidade do seu sistema.

Também o pensamento cosmológico associado ao sistema de Ptolomeu, a saber, a teoria aristotélica do Universo das duas esferas, constituiu parte fundamental do pensamento cosmológico dominante até as primeiras décadas do século XVII.

Muitos historiadores concluem, a partir desta constatação, que a ciência foi algo inexistente durante os séculos que separam as vidas de Ptolomeu e Copérnico. Kuhn, por outro lado, afirma que:

A atividade científica, embora intermitente, foi muito intensa durante esta época e desempenhou um papel

⁷²COPERNICO. *Commentariolus*. Trad. por E. Rosen. In: ROSEN, E. (ed.). *Three Copernican Treatises*. New York : Dover, 1959, p. 57.

essencial na preparação do terreno para o nascimento e posterior triunfo da revolução copernicana⁷³.

⁷³KUHN, 1957, cap. 4, p. 99.