



Subdeterminação na construção das teorias dos modelos planetários

Resumo

A pesquisa qualitativa aqui apresentada foi de cunho bibliográfico e natureza explicativa, fazendo reflexões e inferências sobre os modelos planetários, o surgimento dessas teorias e a subdeterminação relacionada à suas aceitações no meio científico da época. Priorizou-se utilizar fontes bibliográficas primárias para consultar sobre o tema proposto e artigos científicos atuais, produzidos por especialistas com reconhecida autoridade sobre o tema. Conseguimos observar que a subdeterminação está presente em todo o percurso de evolução e construção de uma teoria científica. Os sistemas astronômicos copernicano e ptolemaico eram teorias compatíveis com as observações a olho nu do movimento dos astros celestes, mas os cálculos das trajetórias destes corpos eram muito diferentes. Percebemos que a transição de um modelo planetário para o outro se deu de forma longa e gradativa a partir de discussões, questionamentos e críticas às hipóteses das teorias e ainda a partir de observação dos dados experimentais da época, ou seja, as hipóteses a respeito do movimento dos corpos celestes foram colocadas à prova com novos dados (teóricos e experimentais, a partir de observações astronômicas instrumentalizadas e precisas) levando a novas constatações e subdeterminando a escolha do modelo planetário mais compatível à realidade.

Palavras-chave: Subdeterminação, Ptolomeu, Copérnico, Transitória, Teoria.

Abstract

The qualitative research presented here was bibliographic and explanatory, making reflections and inferences about planetary models, the emergence of these theories and the underdetermination related to their acceptance in the scientific environment of the time. Priority was given to using primary bibliographic sources to consult on the proposed topic and current scientific articles, produced by experts with recognized authority on the topic. We were able to observe that underdetermination is present throughout the evolution and construction of a scientific theory. The Copernican and Ptolemaic astronomical systems were theories compatible with naked eye observations of the movement of celestial bodies, but the way in which the trajectories of these bodies were calculated was very different. We realized that the transition from one planetary model to the other took place still and gradually, based on reflection, perception and criticism of the hypotheses of the theories and from the observation of the experimental data of the time, that is, the theories about the movement of the celestial bodies were designed in a model compatible with new experimental data, based on astronomical observations and specifying the astronomical choice to the reality.

Keywords: Underdetermination, Ptolemy, Copernicus, transiente, Theory.

Introdução

O nascimento e transição de uma teoria científica para outra é um processo de construção longo e gradativo que acontece a partir do momento em que o ser humano precisa resolver um determinado problema. Conforme Bachelard (1996) a resposta a uma pergunta é o que inicia o conhecimento científico. Essas indagações geralmente estão ligadas à necessidade de melhorias da vida, por exemplo, obter resultados mais favoráveis nas plantações e colheitas por meio do estudo das estações do ano e épocas próprias ao plantio (ROONEY, 2018).

As etapas de formação desse conhecimento partem do questionamento e observação do problema, indicando o aspecto empírico ou do senso comum que induz o questionamento. Ele impulsiona o ser humano para a aplicação racional de hipóteses plausíveis, formuladas com o objetivo de ajudar a solucionar o problema identificado. Para isso, utiliza-se procedimentos metódicos e sistemáticos que ao final do processo poderão confirmar ou infirmar as suas hipóteses. Esta seria a descrição de um método lógico que também é apresentado por Popper (1972): o método hipotético-dedutivo.

Este trabalho discorre sobre hipóteses utilizadas para afirmar ou infirmar algumas das explicações sobre o movimento dos corpos celestes ao redor da Terra e do Sol, que foram empregadas respectivamente para sustentar as teorias dos sistemas astronômicos Copernicano e Ptolemaico no século XVI. O estudo é construído a partir de uma sequência discursiva com base no ponto de vista de que o nascimento e morte ou dormência de uma teoria está totalmente ligada à ideia de subdeterminação a qual têm objetivos direcionados a dois fatores principais que são: a escolha de uma teoria em detrimento de outra e o reconhecimento de tais teorias como compatíveis com a realidade dos fatos observados.

A ideia de subdeterminação compartilhada neste trabalho está alinhada a discussão de Gräf Schüller e Severo (2020) os quais pontuam que existem várias classificações para a subdeterminação e que todas elas proporcionam apontamentos de como conseguir escolher ou não uma teoria, observando a realidade dos fatos por meio da observação, da experimentação e da verificação. Segundo algumas destas classificações de subdeterminação, pode-se refutar, por meio da verificação e falseabilidade uma hipótese, avaliando sua veracidade, podendo assim afirmar ou infirmá-la mantendo a teoria original intacta. Outras categorizações sinalizam a impossibilidade de escolha entre uma teoria e outra a qualquer tempo e mesmo com novas provas empíricas.

Para defender esta ideia no texto produzido discutimos sobre o ponto de vista da subdeterminação prática, transitória e empiricamente equivalentes não intertraduzíveis a evolução das teorias científicas dos modelos planetários, fazendo reflexões, diálogos e inferências sobre a aceitação do geocentrismo e heliocentrismo pelos componentes da comunidade científica da época.

E em toda a discussão utiliza-se a síntese da pesquisa qualitativa de cunho bibliográfico e natureza explicativa. Além disso, priorizou-se utilizar fontes

bibliográficas primárias para consultar informações sobre o tema proposto e artigos científicos atuais, produzidos por especialistas com reconhecida autoridade sobre subdeterminação e a transição do modelo planetário geocêntrico para heliocêntrico.

A subdeterminação de teorias científicas

A ideia de subdeterminação de teorias científicas, resumidamente, trata da evolução de uma teoria científica. A teoria científica que consiste em “[...] *uma construção humana passível de revisão [...]*” (LINDEMANN, 2016, p.55) que passa por questionamentos em torno de sua construção, que são resolvidos com base em considerações epistêmicas, empíricas e pragmáticas. Levando em conta hipóteses estabelecidas depois de colocadas à prova após observação dos fatos reais e as análises pragmáticas de cunho, cultural, histórico, ideológico, político e epistemológico que juntos subdeterminam (determinam parcialmente) a escolha de uma teoria em detrimento de outra (SILVA, 2021; PERES, 2020, LINDEMANN, 2016).

Entendemos como subdeterminações, contextos capazes de influenciar direta ou indiretamente a escolha de uma teoria científica como mais condizente a realidade: hipótese com plausibilidade individual, que afirmam apenas parte da teoria, não sendo por si só suficiente para promover a mudança da teoria total; evidências não ponderadas no momento de construção da teoria; teorias com hipóteses que deixavam questões por resolver; conhecimento prévio teórico do proponente da teoria, também conhecido como “*peso teórico*” (PERES, 2020, p.20) e “*heranças científicas*” (LINDEMANN, 2016, p.55) e ainda a incerteza epistêmica deste estudioso; e outros indícios, como questões econômicas, ambientais, sociais, epistemológicas (SILVA, 2021; PERES, 2020; SCHÜLER E SEVERO, 2020; DUHEM 2014).

Esses são alguns pontos a se analisar no momento de entender as conjecturas por trás da aceitação de uma ideia como teoria científica ou selecionar entre duas teorias que são capazes de representar um fenômeno em questão. Esses contextos de subdeterminação são utilizados para determinar classificações de subdeterminações, e estas são apontadas por autores, como por exemplo, Silva (2021), Peres (2020), Schüller e Severo (2020), Duhem (2014), Bortolotti (2008) e Quine (1963).

Neste trabalho utilizaremos a subdeterminação prática, a transitória, e a empiricamente equivalente não intertraduzível, para analisar o cenário de mudança e escolha das teorias geocêntrica para heliocêntrica. Essas classificações são apresentadas por Schüller e Severo (2020). Para Schüller e Severo (2020) a subdeterminação de equivalência aparece quando:

Para qualquer teoria científica que postule entidades não observáveis ou princípios teóricos, teorias rivais empiricamente equivalentes (isto é, que predizem as mesmas observações) podem ser construídas.[...] subdeterminação em questão seria de tipo permanente: teorias rivais continuam rivais mesmo que novos indícios observacionais (confirmatórios ou desconfirmatórios) se tornem disponíveis (SCHÜLER e SEVERO, 2020, p.302).

Essa classificação mostra que quando há duas teorias rivais que prevêm os mesmos fenômenos, bem como todas as hipóteses antigas e novas e suas

confirmações empíricas, então sempre haverá evidências que as manterão concorrentes entre si, ou vindo por outro entendimento, quando temos finitas observações empíricas temos infinitas teorias correspondentes (FOUREZ, 1997, p.65). Schüller e Severo (2020) ainda delineiam a “subdeterminação transitória” afirmando que esta:

[...] pode ocorrer mesmo em casos em que as teorias rivais não são empiricamente equivalentes. Trata-se, portanto, de um caso de subdeterminação de escolha de teorias. Dadas as observações disponíveis em um dado momento, os indícios favoráveis a uma teoria podem ser igualmente fortes aos indícios favoráveis a alguma teoria rival não considerada pela comunidade científica. (SCHÜLER e SEVERO, 2020, p.313).

Essa subdeterminação propõe que pode haver evidências não ponderadas pelos cientistas naquele momento em questão, dessa forma não é possível novamente escolher entre duas teorias rivais, pois as hipóteses poderão sempre favorecer ambas. Por fim tem-se a Subdeterminação prática que Schüller e Severo (2020) apontam que:

Casos de subdeterminação prática são aqueles nos quais a escolha entre duas teorias diferentes e conhecidas não são determinadas pelos indícios observacionais que estão disponíveis no momento. [...] Em geral, portanto, trata-se de teorias de escopo reduzido (diferentemente das teorias de que se ocupam os proponentes das outras formulações de subdeterminação vistas nas seções anteriores) (SCHÜLER, G. G. & SEVERO, R. P., 2020, p.31).

Neste caso a análise das teorias em questão é realizada com base em outros indícios, questões econômicas, ambientais, sociais, por exemplo. Por isso a denominação de subdeterminação prática.

Os modelos planetários

No trabalho, relatamos sobre as teorias mais conhecidas dos modelos geocêntrico e heliocêntrico, mas esclarecemos o ponto de vista de que não estamos atribuindo a formulação dessas teorias a um único cientista, apenas não é nosso interesse discorrer sobre as diferentes contribuições que resultaram na visão cosmológica tal como a concebemos atualmente, pois o trabalho ficaria demasiadamente grande. Compartilhamos do entendimento de que o desenvolvimento da ciência, especialmente dos modelos explicativos do sistema planetário, resulta de um processo lento e que contou com a contribuição de muitos estudiosos de diferentes contextos.

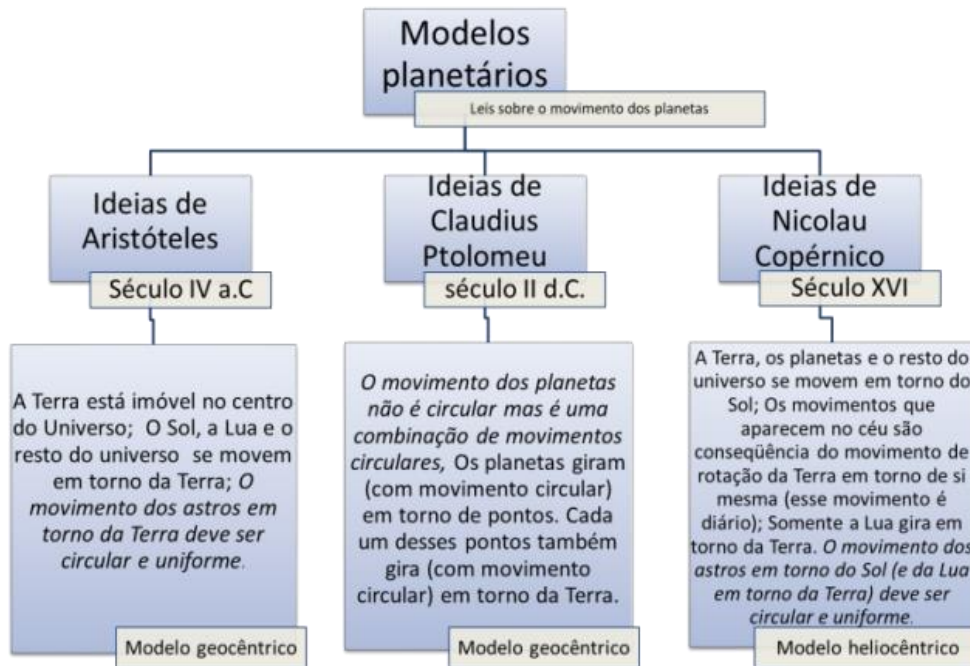
Embora a apresentação formal de um modelo geralmente é atribuída a um único autor, principalmente em livros didáticos, ele se baseou em um conjunto de informações oriundas de observações de vários outros estudiosos anteriores e até mesmo contemporâneos que estudaram o mesmo tema.

Considerando este entendimento indicamos na Figura 1 os nomes daqueles que são apontados na história contada, em muitos livros didáticos de ciências, como os principais responsáveis pela formulação dos modelos planetários. Indicamos o

recorte que será apresentado neste trabalho sinalizando as ideias de Aristóteles (VII – V a.C.), Ptolomeu (II d.C) e Copérnico (XVI d.C) sobre o movimento dos planetas.

A seguir faremos a discussão das ideias de cada estudioso dos modelos planetários apresentado na FIGURA 1, bem como o contexto histórico e cultural em que viviam, além das subdeterminações envolvidas nesta conjuntura.

FIGURA 1: Modelos planetários.



Fonte: Elaborado pela autora.

a) O modelo planetário segundo as ideias de Aristóteles

Iniciamos ressaltando que antes do primeiro modelo formal do sistema solar, modelo segundo as ideias de Aristóteles, já havia diversas discussões sobre os astros celestes e sua formulação espacial, as quais não caberiam discorrer neste trabalho, pois o deixaria muito extenso. Algumas dessas ideias eram mais antigas que as de Aristóteles e oriundas de proposições místicas e religiosas onde se personificava os astros celestes como deuses e outras mais próximas de Aristóteles, contudo não organizadas e formalizadas.

Segundo a teoria geocêntrica cuja proposição é atribuída ao filósofo Aristóteles de Estagira (384-322 a.C.), os corpos celestes constituintes do Universo tinham movimentos circulares ao redor da Terra, a qual representava o seu centro. A proposição de um modelo geocêntrico primeiramente e não um heliocêntrico se deve a nossa percepção cotidiana do movimento dos astros. Quando observados os astros a partir da Terra percebe-se o movimento dos corpos fora e ao redor dela, pois o observador está exatamente sobre referencial de observação. Portanto para Aristóteles a terra estava imóvel neste centro e era formada pelo elemento corruptível terra, sendo que ela e poderia sofrer transformações diferentes dos

outros corpos eram imutáveis (formados pelo elemento incorruptível éter). Depois da Terra havia nove esferas que giravam em torno dela, sendo a primeira a Lua, a segunda, Mercúrio, a terceira Vênus, a quarta o Sol. Depois estavam os três planetas externos à órbita do Sol e que são visíveis no céu a olho nu que são Marte, Júpiter e Saturno. Por último, viria a esfera que delimitava o próprio universo, na qual se encontravam as estrelas. (ARISTÓTELES, 2014, ROONEY, 2013, 2018).

Aristóteles defendia a ideia de que os corpos celestes eram esféricos e ficavam em esferas cristalinas centradas na terra, movendo-se circularmente em relação a ela de forma a gerar um complexo conjunto de esferas. Essa ideia sobre a composição do Universo evidenciava aspectos das noções apresentadas por Empédocles na teoria cosmogênica composta pelos quatro elementos clássicos: terra, água, ar e fogo, os quais também foram anteriormente considerados por Platão. Ele os concebia como calor, frio, umidade e secura, além de acrescentar o éter para o céu (ARISTÓTELES, 2014, ROONEY, 2013, 2018).

Especificamente sobre seu movimento verificamos, no trecho transcrito abaixo a sua visão sobre a esfericidade da terra, sua órbita com trajetória circular e sua centralidade em relação ao Universo.

Ademais, como pelo que parece, e admitimo-lo, o universo gira num círculo, e foi demonstrado que fora da circunferência mais extrema não existe nem vazio nem lugar, dispomos de uma razão suplementar para concluir necessariamente a favor de sua própria esfericidade. [...] resulta claramente que de todos os movimentos, o mais célere é o movimento do céu. [...] Consequentemente, se o céu executa um movimento circular da maior celeridade, conclui-se necessariamente que é esférico. [...] Acontece, porém, de um mesmo centro ser da terra e do universo; de fato, os [corpos] realmente dirigem-se também para o centro da terra, ainda que incidentalmente, considerando-se que ela possui seu centro no centro do universo. [...] Daí ficar claro que a posição da terra é necessariamente no centro e imóvel (ARISTÓTELES, 2014, p. 110, 111, 142).

Esse arranjo de corpos celestes em uma esfera e seus movimentos circulares em torno da terra deixava lacunas no entendimento do movimento dos corpos celestes destacando-se três principais anomalias que por muito tempo ficaram sem explicação: O modelo geocêntrico não esclarecia a velocidade dos planetas no céu variando ao longo do tempo, o brilho dos planetas variando com o tempo e ocasiões quando o sentido do movimento dos planetas temporariamente se invertia (PORTO E PORTO, 2009; ROONEY, 2018).

A necessidade de elucidar tais anomalias provavelmente impulsionou muitos outros estudos sobre o movimento dos corpos celestes e dos objetos terrestres sobre os quais hoje temos conhecimentos de que as explicações não poderiam ser obtidas apenas por meio das observações da natureza realizadas a olho nu. Essas lacunas só foram preenchidas com medições experimentais utilizando aparatos construídos ao longo dos anos, desenhando a trajetória de forma mais simples e menos precisa até os instrumentos que se tem hoje.

Apesar das questões não resolvidas citadas anteriormente, o modelo geocêntrico perdurou por muito tempo, pois por um lado não havia muita abertura para questionamentos por parte dos estudiosos de autoridade, por outro lado o

modelo estava pareado aos interesses da igreja que mantinha também grande influência nas áreas sociais.

A visão cósmica presente nas ideias de Aristóteles era de que os corpos observados acima da terra eram pertencentes aos céus, elementos do reino do divino e que eram inacessíveis à mente humana. Isto explicava os aspectos incorruptíveis e inalteráveis destes elementos. Neste modelo os astros celestes eram esquematizados pelas esferas aristotélicas, elementos de natureza sólida, com essência divina e postas em movimento por Deus, aspectos estes que não abriam brechas para o questionamento do homem, a quem restava apenas considerá-las como geométricas para efeito de cálculo.

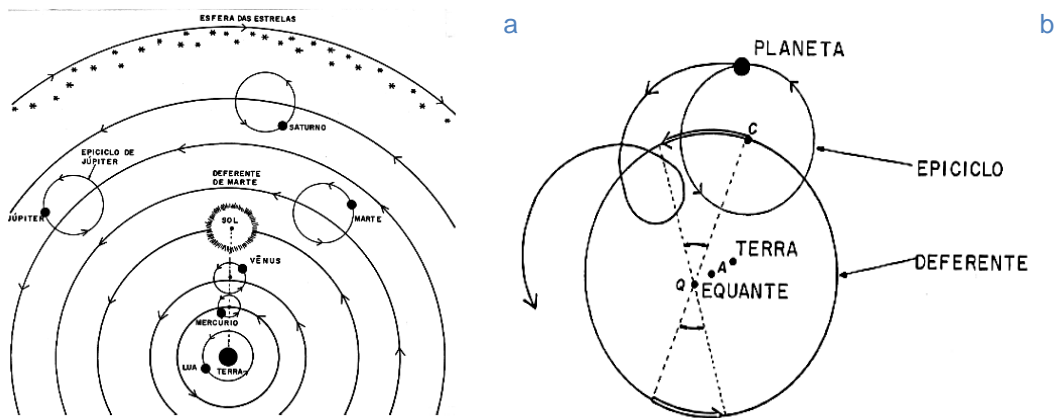
Aristóteles, muito se debruçou a entender as causas de tudo que observava. Usar a lógica e a razão foram essenciais para o nascimento da física experimental, contudo ele ainda carregava ideias religiosas, devido a cultura da época. Prova disso é que Aristóteles acreditava que todo o céu e Universo (os astros fora domínio da terra) eram formados a partir de um quinto elemento, chamado éter, o qual era supostamente leve e incorruptível, o que fazia com os astros se mantivessem fixos nos céus sem caírem para o centro da terra e este céu era parte do domínio dos deuses, imutável e incorruptível.

b) O modelo planetário segundo as ideias de Ptolomeu

As anomalias presentes no modelo construído por Aristóteles, mencionadas anteriormente, dentre outros fatores que poderiam ser considerados como uma situação problema em tempo posterior ao que viveu Aristóteles incentivou outros estudiosos a compreenderem os movimentos dos corpos celestes e terrestres, dentre os quais a história presente nos livros didáticos de física destaca Cláudio Ptolomeu. Ele no século II d.C. apresenta aos demais estudiosos do seu tempo uma releitura do sistema cosmológico relacionado a teoria geocêntrica proposta por Aristóteles em sua obra "Síntese matemática" (título da tradução árabe, "Almagesto"). Além deste livro outros dois complementam a contribuição de Ptolomeu para o desenvolvimento da visão cosmológica: tábuas práticas e hipóteses planetárias.

O Almagesto pode ser considerado a base teórica do modelo geocêntrico apresentado por Ptolomeu, refletindo as ideias de muitos outros estudiosos e os dados observacionais coletados conforme as possibilidades disponíveis nesta época. Como a explicação física e matemática da teoria geocêntrica apresentada por Aristóteles não era compreendida por estudiosos não tão especializados, Ptolomeu elaborou uma espécie de manual prático do Almagesto, conhecida como tábuas práticas (astronômicas ou verificadas) as quais eram usadas para orientar na determinação da posição dos cinco planetas, do Sol, da Lua e das estrelas. Completava sua obra um terceiro livro no qual apresentava uma discussão resumida dos princípios físicos de seu modelo e das relações matemáticas usadas para localização dos planetas e sua distância em relação à terra (VELÁSQUEZ-TORIBIO e OLIVEIRA, 2020).

FIGURA 2: a) Modelo geocêntrico de Ptolomeu; b) trajetória circular dos planetas.



Fonte: CANALE, 1998, p. 83-84.

Em sua grande síntese, o *Almagesto*, Ptolomeu mantinha a terra em posição de destaque em relação ao universo, conforme ilustrado na FIGURA 2a, fixando-a, no centro e em torno da qual orbitavam Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno, os cinco planetas ao alcance da visão humana, a lua, o sol e as estrelas (PTOLEMAEUS, 1948). Neste livro identificamos uma explicação do modelo geocêntrico em detalhes:

E assim, em geral, devemos afirmar que os céus são esféricos e se movem esféricos; que a terra, em figura, é sensivelmente esférica também quando considerada como um todo; em posição, fica bem no meio dos céus, como um centro geométrico; em magnitude e distância, tem a proporção de um ponto em relação à esfera das estrelas fixas, não tendo ela própria nenhum movimento local. (PTOLEMAEUS, 1948, p.7, tradução nossa).

Na citação identificamos a ideia defendida por Ptolomeu sobre a terra estática quando ele sinaliza que, “[...] não tendo ela própria nenhum movimento local” e levando em conta a visão de mundo finito da época quando afirma que, “[...] em posição, fica bem no meio dos céus...” temos então a terra o centro daquele universo.

Destaca-se na obra de Ptolomeu os cálculos sobre a dimensão da Lua e a distância entre ela e o Sol, elaborados com base na geometria até então desenvolvida neste contexto, a qual foi utilizada também para formular uma explicação para o movimento dos planetas. Ele demonstrou suas ideias sobre como cada um dos cinco planetas mantinha um movimento de revolução (epiciclo), em torno de certo ponto (equante), que, por sua vez, descrevia uma trajetória circular (deferente) em torno de outro centro, ou seja, uma combinação de movimentos circulares ilustrados na FIGURA 2b (PTOLEMAEUS, 1948).

As obras de Ptolomeu foram aceitas em diferentes contextos científicos da época, sendo traduzidas para o árabe por incentivo do califa Al-ma'mun (786 - 833 d.C.) quem impulsionou à Casa da sabedoria em Bagdad e posteriormente do árabe para o castelhano pelo rei Alfonso X (1221-1284) um grande mecenas da ciência neste período (VELÁSQUEZ-TORIBIO e OLIVEIRA, 2020, p. 2). O contexto do século VII, marcado pela invasão árabe sobre o Império Romano do Oriente,

possibilitou traduções de obras originais da “herança cultural da civilização grega” que por muito tempo ficaram desconhecidas para o Ocidente cristão (PORTO, 2020, p. 7).

c) O modelo planetário segundo as ideias de Copérnico

A tradução e discussão crítica das obras de Ptolomeu, em diferentes contextos popularizaram suas ideias sobre o movimento dos corpos celestes e pode ser um dos fatores que contribuiu para o não questionamento do modelo geocêntrico por tanto tempo. O árabe Alhazen, por exemplo, teceu críticas sobre um possível artificialismo geométrico do modelo geocêntrico de Ptolomeu, na obra intitulada *Dúvidas relativas a Ptolomeu* (também conhecido como *Aporias contra Ptolomeu*). Nele afirmava que

[...] a configuração imaginada por Ptolomeu para os cinco planetas é falsa [hay'a bātīla] e ele a estabeleceu, sabendo que era falsa, porque não pode encontrar outra. Contudo, os movimentos dos planetas [reais] têm uma configuração correta para os corpos existentes [realmente], que Ptolomeu não capturou, nem pôde representar. Pois não é verdadeiro que possa haver um movimento uniforme, perceptível e perpétuo que não tenha uma configuração correta em corpos existentes [...] (PORTO, 2020, p. 8).

Assim como os pensadores islâmicos Nicolau Copérnico provavelmente fez esta leitura crítica das obras de Ptolomeu e outras produzidas com base nelas, como o livro *Epítome do Almagesto*. Também pode ter identificado problemas na descrição que buscava conciliar os “[...] *princípios fundamentais da cosmologia aristotélica e a complexidade cinemática dos mecanismos propostos por Ptolomeu para descrever os movimentos [...]*” (PORTO, 2020, p. 9). Apresenta suas primeiras considerações contra o modelo geocêntrico no livro *Commentariolus* (apresentadas mais adiante neste trabalho), mas apenas na obra *De Revolutionibus Orbium Coelestium* ou *Das Revoluções das Esferas Celestes*, assume seu ponto de vista a favor no modelo heliocêntrico (VELÁSQUEZ-TORIBIO e OLIVEIRA, 2020; ALVES, SALAZAR e OLIVEIRA, 2018).

É importante destacar que seu posicionamento não pode ser considerado um enfrentamento direto, no que tange a mudança de posição da Terra no sistema solar, como é possível identificar nas palavras apresentadas ao clérigo luterano responsável pela impressão do livro, o que hoje seria o editor:

Prezado leitor, quando você ler esse livro, pode parecer que o autor está dizendo que a Terra não está no centro do Universo. Na verdade, ele não acredita nisso. Veja, este livro é para matemáticos. Se você quiser saber onde Júpiter estará dois anos depois da próxima quarta-feira, você pode ter uma resposta precisa tomando como hipótese que o Sol esteja no centro. Mas isso é meramente ficção matemática. Isso não desafia nossa fé sagrada. Por favor, não fique inquieto ao ler este livro (ALVES, SALAZAR e OLIVEIRA, 2018 p.193).

Segundo as ideias de Copérnico o Universo continuava finito e sua extensão era o que conhecemos hoje como sistema solar. Para Copérnico a terra e os outros planetas (Mercúrio, Vênus, Terra e Lua, Marte, Júpiter, Saturno e Esfera móvel das estrelas fixas – FIGURA 3) giravam ao redor do sol em esferas que descreviam uma combinação de órbitas circulares perfeitas, também havia a configuração com

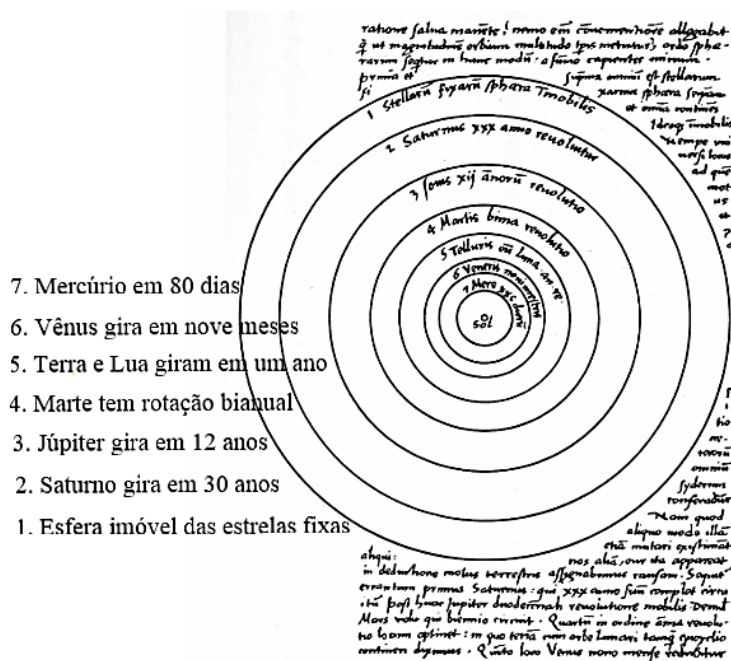
deferente e epiciclos como o último modelo geocêntrico, ele apenas eliminou o equante (COPÉRNICO, 2003).

Copérnico postulou alguns axiomas, por exemplo:

[...] O centro da terra não é o centro do universo, mas apenas o da gravidade e do orbe lunar. Todos os orbes giram em torno do sol, como se ele estivesse no meio de todos; portanto, o centro do mundo está perto do sol. [...] Qualquer movimento aparente no firmamento, não pertence a ela, mas a terra. Assim, a terra com os elementos adjacentes, giram em torno dos seus pólos invariáveis em um movimento diário, ficando permanentemente imóveis o firmamento e o último céu. Qualquer movimento aparente do sol não é causado por ele mas pela terra e pelo nosso orbe, com a qual giramos em torno do sol como qualquer outro planeta. Assim, a terra é transportada por vários movimentos (COPÉRNICO, 2003, p. 114-117).

O modelo heliocêntrico apresentado por Nicolau Copérnico ao discorrer sobre as revoluções das esferas celestes demonstrava que a terra não era o centro do Universo, mas sim o sol conforme visualizamos na FIGURA 3.

FIGURA 3: Modelo heliocêntrico de Copérnico, ordem dos planetas, Equante, deferente e epiciclos.



Fonte: adaptada de STEINER, 2006, p. 237.

O grande diferencial apontado por Copérnico está no posicionamento do sol e da terra, esta última saindo do centro do Universo e possuindo um conjunto de movimentos. Mas, ainda sim, a visão de Copérnico para o sistema solar continuava tão complexa quanto à visão de Ptolomeu no geocentrismo.

No total Copérnico eliminou dos céus treze orbes ptolomaicos (três deferentes e dois epiciclos que foram substituídos pelo movimento da terra em torno do sol e outros oito círculos que foram abolidos introduzindo-se a rotação da terra). No entanto, Copérnico introduziu outros vinte e um epiciclos, acabando por aumentar em oito círculos a complexidade do sistema ptolomaico (COPÉRNICO, 2003, p. 90).

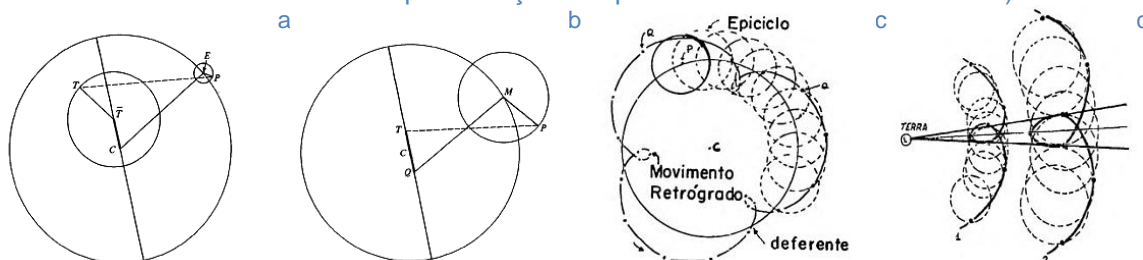
Além do fator de complexidade para se explicar o funcionamento dos movimentos dos corpos celestes, Copérnico não deixou claro como a terra se movia, não explicou o que era a gravidade e o movimento diferente de alguns corpos celestes. Esses fatores foram propulsores de várias pesquisas por anos, o próprio Copérnico tentou trazer novos olhares a sua teoria tempos depois em seu livro *Revolutionibus* (COPÉRNICO, 2003).

Algumas questões (Considerações contra o Modelo geocêntrico) levantadas por Copérnico foram essenciais para a mudança da visão cósmica Aristotélico-Ptolomaica para Copernicana, elas eram ausentes no primeiro sistema e, portanto, se tornaram vantagens para o copernicanismo:

- 1) A Terra não é o centro do universo e nem está estática, mas move se com os movimentos naturais. Esses movimentos eram a rotação e a translação;
- 2) O centro do sistema de movimentos passou a ser no Sol, ou nas proximidades do Sol (um sol médio, por isso poderia ser chamado de sistema heliostático), ou seja, a Terra era apenas mais um astro do sistema solar. (COHEN, 1967, p.50);
- 3) A previsão matemática (utilizando trigonometria) da escala do sistema solar (comprimento $TS = \text{sen } \alpha = VS/TS$) que permitiu determinar o tamanho médio do raio das orbitas dos planetas e o tempo de revolução em torno do Sol. (COHEN, 1967, p.47, 48).

Essas questões auxiliaram Copérnico a resolver os dois problemas mais gritantes da visão cosmológica Ptolomaica: O problema da retrogradação dos planetas e da unidade do sistema solar. Quando ele representou de forma realista (de forma mais simples que Ptolomeu) os movimentos de retrogradação e conseguiu visualizar que não ocorre retrogradação, mas variações nas velocidades e distâncias dos planetas entre si. Para isso foi preciso entender que os planetas com seus movimentos possuem unidade, isto é, integração entre si e com todo o sistema solar, algo não pensado até o momento e ia contra o princípio aristotélico de que a terra e os outros planetas eram formados de materiais diferentes e guiados por leis naturais diferentes. (COHEN, 1967; THOREN. e CHRISTIANSON, 1991; COPÉRNICO, 1953; ROONEY, 2013; 2018; FAUBER, 2019). A figura 4 mostra as duas órbitas para a Terra segundo Ptolomeu e Copérnico.

FIGURA 4: Órbita do Sol, do planeta Terra e movimento retrógado segundo Copérnico (figuras 4a com a Terra no ponto C) e Ptolomeu (figura 4b com a Terra no ponto C e realizando movimento circular simples; figuras 4c e 4d mostrando a Terra deslocada para o ponto Q e uma combinação de movimentos circulares após inserção do epiciclo em M ou P e do deferente).



Fonte: THOREN. e CHRISTIANSON, 1991, p.253; COHEN, 1967, p.34 e 49.

No entanto, mesmo com essas vantagens ainda havia problemas insolucionados, questões de observação e mecânicas. Não havia paralaxe, esse desvio ao observar corpos celestes em duas posições diferentes no céu não fora observada por Copérnico. Não havia explicação lógica para o movimento dos corpos na Terra agora que esta estava em movimento. (COHEN, 1967).

É possível visualizar nas Figuras 4a e 4b a mudança de centro do movimento do Sistema Solar e o acréscimo orbital da Terra. Também que os dois sistemas se parecem no quesito do uso de epiciclos e deferentes. Na Figura 4c observamos que o movimento retrógrado para Ptolomeu previa a combinação de movimentos um tanto complicados onde um planeta Q percorre um caminho ao redor de outro P fazendo vários círculos (linha pontilhada) em torno da trajetória de P (linha cheia). Em certos momentos o planeta Q acaba retrocedendo. Na Figura 4d temos a explicação de Copérnico para esse movimento de retrogradação. Segundo ele, se os períodos relativos de movimento forem os mesmos, as observações também seriam as mesmas independentemente da observação. Isso porque elas eram baseadas nas medidas de ângulos e não de distâncias.

Reflexões sobre a subdeterminação

É possível observar que entre a teoria do modelo planetário de Aristóteles e Ptolomeu há um espaço de tempo em que existiam muitos questionamentos, as dúvidas em partes de sua estrutura de hipótese, no caso, a explicação do movimento circular das esferas cristalinas em conjunto dos corpos celestes. Quando se adicionou epiciclos, equantes e deferentes, o modelo trouxe uma complexidade ao movimento circular simplório do modelo anterior, mas conseguia explicar mais fenômenos que antes. Essa crise de ideias foi o que promoveu o nascimento de uma nova teoria e neste momento percebemos que o novo modelo planetário de Ptolomeu trouxe novas hipóteses, mas não mudou toda a teoria de Aristóteles, pois além de sustentar a essência divina dos astros celestes, manteve a hipótese geocêntrica.

Esse fator, mudança de algumas hipóteses, mostra a subdeterminação empiricamente equivalente não intertraduzível presente: o novo modelo proposto por Ptolomeu trouxe novas hipóteses, explicações sobre o movimento dos corpos e suas orbitas, que foram afirmadas substituindo as anteriores, mas não mudou toda a teoria, pois manteve a Terra no centro e imóvel.

Verificamos também a subdeterminação transitória, no fato de que essas novas hipóteses não eram suficientes para promover a mudança total da teoria, havia fatores, provas substanciais necessárias que não estavam disponíveis na época, evidências também não ponderadas pelos estudiosos naquele momento em questão.

Observamos ainda que é notória a subdeterminação prática permeando o desenvolvimento das ideias do novo sistema planetário, para ele ser aceito no meio científico e pela igreja católica como o mais condizente com a realidade dos fatos: o fator social e cultural. Naquela época a igreja dominava em todas as áreas da sociedade, ela tinha poder material, religioso, intelectual e político. Pregava que as criações de Deus estavam centradas na Terra, e os escritos bíblicos, principalmente

do livro de Josué mencionando que o Sol parou, sustentavam à tese geocêntrica. Assim, facilmente as pessoas eram convencidas de que as hipóteses do modelo geocêntrico eram plausíveis, as evidências sociais e culturais subdeterminavam isso.

Neste contexto ainda temos a subdeterminação empiricamente equivalente não intertraduzível presente na dificuldade em escolher entre uma teoria e outra quando as hipóteses das duas deixavam questões por resolver, as duas teorias planetárias continham lacunas. Assim era mais fácil permanecer com uma teoria já consolidada e creditada por muito tempo do que se arriscar em algo novo.

Por fim, notamos subdeterminação nas contribuições de ideias e hipóteses construídas por pessoas em diferentes regiões do mundo que estavam estudando o sistema Ptolomaico (Itália, Alemanha, Dinamarca, França, Índia e regiões árabes) que chegaram de alguma forma até o autor final da teoria heliocêntrica (Copérnico). A subdeterminação está no fato de que de posse dessas informações, o estudioso que a carrega, no momento em que constrói novas hipóteses, de alguma maneira irá utilizar esse conhecimento prévio na composição da nova ideia. Suas observações carregadas de expectativas, de peso teórico e as incertezas epistêmicas são pontos capazes de contribuir para ampliar o efeito da subdeterminação em relação às teorias científicas.

Considerações Finais

A mudança do modelo planetário geocêntrico de Ptolomeu para o heliocêntrico de Copérnico foi uma grande revolução para a época. Foram 1500 anos de geocentrismo aceito, apoiado e defendido por muitos cientistas e pela sociedade e principalmente pela igreja. Tirar o homem do centro do Universo ia contra o egocentrismo humano e as passagens bíblicas apresentadas pela igreja e provocava problemas que fragilizavam as ideias de Copérnico.

No entanto, com contribuições de outros cientistas, o copernicanismo, após longos anos de debate no meio científico, e tempos depois da morte de seu idealizador, conseguiu se estabelecer como modelo cosmológico aceitável. Isso foi possível graças à subdeterminações científicas, a resolução das lacunas epistemológicas que foram minimizadas na medida em que a instrumentação se desenvolveu, como por exemplo, o telescópio, cálculos mais avançados, como a criação do cálculo diferencial e integral e por fim da descentralização de poder intelectual da igreja.

Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

Referências

ALVES, L. P., SALAZAR, A. V; OLIVEIRA, E. A. M. Bases da ciência moderna (Século XVII). In: **História e filosofia da ciência: apontamentos para auxiliar na**

contextualização de conteúdos a serem trabalhados em sala de aula / Sgarbi, A. D. et al (orgs.), Vitória : Edifes, 2018, (185 – 214), 2018.

ARISTÓTELES (384-322 a.C.). **Do céu**. Tradução de Edson Bini. 1. ed., São Paulo, Edipro, 2014.

BACHELARD, G. **A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento**. Tradução Esteia dos Santos Abreu. Tradução de: La Formation de l'esprit scientifique: contribution à une psychanalyse de la connaissance, ISBN 85-85910-11-9. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996. 316 p.

BORTOLOTTI, L. **Introdução à filosofia da ciência**. Lisboa, Gradiva, p. 110-114, 2008.

COHEN, I. B. **O nascimento de uma nova Física: De Copérnico a Newton**. Editora São Paulo, 1967.

COPÉRNICO, N. **Commentariolus: Pequeno comentário de Nicolau Copérnico sobre suas próprias hipóteses acerca dos movimentos celestes**. Introdução, tradução e notas Roberto de Andrade Martins, 2ª edição, Editora livraria da Física, 2003.

DUHEM, P. **A teoria física: seu objeto e sua estrutura**. Tradução de Rogério Soares da Costa. Eduerj. ISBN: 978-85-7511-322-6, 2014.

FAUBER, L. S. **Heaven on Earth, How Copernicus, Brahe, Kepler, and Galileo Discovered the Modern World**. Pegasus Books, New York, London, SBN: 9781643132044, 9781643132945, 1643132040, 2019.

FOUREZ, G. **A construção das ciências: introdução à filosofia e à ética das Ciências**. tradução de Luiz Paulo Rouanet. – São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1995.

GUTHRIE W. K. C. **Historia de la filosofía griega I**. Volume 1. Editorial Gredos, Madrid, ISBN 842490947X, 1984.

LINDEMANN, J. L. Os argumentos de Quine em “Dois Dogmas do Empirismo”. *Revista Urutágua - Revista Acadêmica Multidisciplinar*. Universidade Estadual de Maringá (UEM). N. 35, dezembro- maio. ISSN 1519.6178, 2016.

PERES, Joaquim Cerqueira Fortes. A tese Duhem-Quine é sustentável? Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Filosofia da Universidade Federal de Pernambuco, 2020.

POPPER, K. R. **A Lógica da Pesquisa Científica**. Tradução Mota O. e Hegenberg L. São Paulo: Cultrix, 1972.

PORTO, C. M. A Revolução Copernicana: aspectos históricos e epistemológicos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 42, 2020.

PORTO, C. M. e PORTO M. B. D. S. M. A. Evolução do pensamento cosmológico e o nascimento da ciência moderna. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n. 4, 4601, 2009.

PTOLEMAEUS, C. **The Almagest: I-V**. Translated by R. Catesby Taliaferro, Copyright, by Encyclopedia Britannica, Inc p.1. (Great books of the western world,

The Almagest, by Ptolemy, On the Revolutions of the Heavenly Spheres, by Nicolaus Copernicus, Epitome of Copernican Astronomy: IV and V. The Harmonies of the World: v, by Johannes Kepler. Copyright in the united states of America, 1952, BY encyclopedia BRITANNICA, INC.), 1948.

QUINE, W. V. O. **From a Logical Point of View: Nine Logico-Philosophical Essays**. Second Revised, Edition HARPER TORCHBOOKS, Harper & Row, Publishers New York, Hagerstown, San Francisco, London, 1963.

ROONEY, A. **A História da Astronomia: Dos planetas aos pulsares e buracos negros**. Tradução de Maria Beatriz de Medina, M.Books do Brasil Editora LTDA, São Paulo, ISBN 978-85-7680-299-0.

ROONEY, A. **A História da Física: Da filosofia ao enigma da matéria negra**. Tradução de Maria Beatriz de Medina, M. Books do Brasil Editora LTDA, São Paulo, ISBN 978-85-7680-217-4, 2013.

SCHÜLER, G. S; SEVERO, R. P. Quatro teses de subdeterminação de teorias pelos indícios observacionais: significados, plausibilidades e implicações. *PRINCIPIA* 24(2): 299–324, NEL—Epistemology and Logic Research Group, Federal University of Santa Catarina (UFSC), Brazil, 2020.

SILVA, B. M. Subdeterminação, realismo e objetividade. *COGNITIO Revista de Filosofia da PUC-SP*, Centro de Estudos de Pragmatismo, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 1-11, 2021. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/index.php/cognitiofilosofia/article/view/55778/38753>

STEINER J. E. A origem do universo e do homem. Estudos avançados, Revista USO, 2006.

THOREN V. E. e CHRISTIANSON J. R, The of Lord Uraniborg: a biography of Tycho Brahe. Cambridge University, 1991, ISBN: 0521351588, 780521351584, 2018.

VELÁSQUEZ-TORIBIO, A. M.; OLIVEIRA, M. Discutindo o modelo de Ptolomeu e sua equivalência com o modelo de Copérnico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 42, e20190293, DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0293>, 2020.