



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS [TRINDADE]  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

Carlos Alexandre dos Santos Batista

**Um Mergulho na História Conceitual da Astronomia, da Cosmologia e da Física à Luz  
da Solução de Problemas Laudanianos: dos babilônios à gravitação newtoniana**

[Florianópolis]

[2020]

Carlos Alexandre dos Santos Batista

**Um Mergulho na História Conceitual da Astronomia, da Cosmologia e da Física à Luz  
da Solução de Problemas Laudanianos: dos babilônios à gravitação newtoniana**

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Educação Científica e Tecnológica da Universidade Federal de Santa Catarina como pré-requisito para a obtenção do título de Doutor em Educação Científica e Tecnológica.  
Orientador: Prof. Dr. Luiz O. Q. Peduzzi

[Florianópolis]

[2020]

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Batista, Carlos Alexandre dos Santos  
Um Mergulho da História Conceitual da Astronomia, da  
Cosmologia e da Física à Luz da Solução de Problemas  
Laudanianos : dos babilônios à gravitação newtoniana / Carlos  
Alexandre dos Santos Batista ; orientador, Luiz O. Q.  
Peduzzi, 2020.  
480 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas,  
Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica,  
Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Educação Científica e Tecnológica. 2. Ensino de  
Ciências/Física. 3. História Conceitual da Ciência. 4.  
Natureza da Ciência. 5. Solução de Problemas Laudanianos.  
I. Peduzzi, Luiz O. Q.. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e  
Tecnológica. III. Título.

Carlos Alexandre dos Santos Batista

**Um Mergulho na História Conceitual da Astronomia, da Cosmologia e da Física à Luz da Solução de Problemas Laudanianos: dos babilônios à gravitação newtoniana**

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Fábio Luís Alves Pena  
Instituto Federal da Bahia

Prof. Dr. Frederico Firmo de Souza Cruz  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Jenner Barretto Bastos Filho  
Universidade Federal de Alagoas

Prof. Dr. Elder Sales Teixeira  
Universidade Estadual de Feira de Santana  
(Suplente)

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de doutor em educação científica e tecnológica obtido pelo Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica.

---

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. Dr. Luiz O. Q. Peduzzi.  
Orientador

[Florianópolis], [2020].

Dedico esta tese à minha mãe Maria da Glória, ao meu pai João Mendes, aos meus irmãos e irmãs, amigos e amigas, pelo incentivo constante aos meus projetos de vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Expresso meus sinceros agradecimentos para com todas as pessoas que colaboraram direta e indiretamente com a realização desta tese de doutorado. Especialmente: meu professor e orientador Dr. Luiz O. Q. Peduzzi; meu grande amigo Maurício Silva Araújo; meus sobrinhos e sobrinhas Amanda, Anderson, Lidiane, Tiago; minhas irmãs Aparecida, Natalice, Vanusa, que não mediram esforços para me auxiliar ao longo desta jornada; minha companheira Bruna Cipriano, pelo amor, carinho, compreensão, cuidado e suporte fundamental; meus professores Dr. Jose De Pinho Alves Filho, Dr. Frederico Firmo De Souza Cruz, Dr. Eduardo Adolfo Terrazzan, Dr. Maxwell R. P. Siqueira, Dr. Fernando Tamariz Luna pelo compartilhamento de suas experiências profissionais e pessoais; todo corpo docente (professores e professoras) e profissional, representado pelos rapazes da secretaria, Leonardo Borges e Rodrigo Garcia, do Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica; o pessoal da secretaria, da segurança e dos serviços gerais dos Departamentos de Física e da Matemática da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC; colegas da turma de doutorado (2016.2); minha querida colega doutoranda Marinês Ferreira e ao seu filhinho Lorenzo; meu grande amigo Dr. Rodrigo Turcati; minhas colegas do Grupo de Pesquisa Dra. Anabel Raicik e a doutoranda Letícia Jorge; meus amigos/as de república João Vitor, Johnatan, Dinah, Aida, Carolzinha, Natanael, Murilo; e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior – CAPES, pela concessão de bolsa de estudos, na maior parte do curso, especialmente, acrescentando mais tempo de bolsa, mediante sua sensibilidade social, imprescindível para a finalização das pesquisas, frente à grave crise de saúde pública causada pela pandemia gerada pelo vírus da Covid-19, em todo mundo e, mais criticamente, no Brasil.

## *Uma Prosa Epistemológica<sup>1</sup>*

*Conhecimento, um alento para a alma dos famintos, qual o seu valor de verdade nos  
manuscritos?*

*Com Boaventura, caminhamos pela sociologia, na companhia de Fleck, quem diria!*

*Na filosofia da ciência, encontramos Lakatos todos os dias...*

*Na matemática, na química, na física, na biologia, na história da ciência, em sua própria  
filosofia...*

*Em Popper, encontramos o racionalismo, bem como o seu falsificacionismo...*

*Com Feyerabend, o anarquismo, o pluralismo, sendo forte seu relativismo...*

*Ah...! Bachelard, não podemos deixar de comentar, pois de seu perfil epistemológico nós  
vamos gostar!*

*Sem obstáculos, o contexto da descoberta e da Justificativa, o Hanson tem de explicar...*

*Em paradigmas, Kuhn deve nos alertar, pois sem método científico, Bacon não tem como  
falar!*

*Por fim, Larry Laudan vai nos mostrar que a ciência é uma atividade de solução de  
problemas que queremos enfrentar.*

---

<sup>1</sup>Autor: Carlos A. S. Batista. Poema inspirado nas discussões da disciplina: Fundamentos Epistemológicos da Educação Científica. Programa de Pós-graduação em Educação Científica e Tecnológica. Universidade Federal de Santa Catarina. Turma de Doutorado, 2016.2. Professor Ministrante: Dr. Luiz O. Q. Peduzzi.

## RESUMO

O objetivo desta tese residiu em investigar possíveis contribuições para o ensino de ciências/física e para o pensamento crítico sobre a natureza da ciência, promovidas por um amplo estudo da história conceitual da astronomia da cosmologia e da física, fundamentado na epistemologia da solução de problema de Larry Laudan. Suas justificativas se apoiaram nas contribuições que a história e a filosofia da ciência (HFC) têm fornecido ao ensino de ciências e de física, em vista de três necessidades fundamentais: a ressignificação dos conteúdos científicos; a elaboração de estratégias de ensino aportadas epistemologicamente pela HFC, como alternativas complementares para o campo investigativo da resolução de problemas; e a promoção do pensamento crítico sobre a natureza da ciência, no currículo e na formação científica e tecnológica de futuros professores de ciências/física e de cientistas. Teoricamente, esta tese fundamentou-se na perspectiva epistemológica da solução de problemas de Laudan, em função desta visão de ciência comportar um aspecto original do componente conceitual, na análise do complexo desenvolvimento científico. Além disso, esse aporte teórico tem auxiliado as investigações no ensino de ciências e de física, desde finais da década de 1980, principalmente: no aperfeiçoamento dos modelos de ensino-aprendizagem; na fundamentação das pesquisas; na compreensão das concepções epistemológicas dos estudantes; na produção de analogias entre a atividade científica e a atividade estudantil; e na investigação de episódios da história da ciência. Metodologicamente, foram desenvolvidos amplos estudos sobre: a importância didática e educacional da pergunta no ensino de ciências e de física; a história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, dos babilônios à gravitação universal newtoniana, operacionalizando os conceitos e pressupostos laudanianos para construir uma narrativa histórica atenta ao objetivo geral. Como resultados, esta tese fornece ao ensino de ciências/física, as seguintes contribuições: **(i)** a ressignificação, mediante uma relevante contextualização histórica, de diversos assuntos/temas da astronomia, da cosmologia e da física, estabelecidos pelos documentos oficiais e a literatura brasileira como imprescindíveis para a compreensão estudantil da relação Terra-Universo; **(ii)** uma proposta de ensino alternativa complementar para o campo investigativo da resolução de problemas, que proporciona uma profunda experiência estudantil crítica-reflexiva focada na pergunta, na indagação e na curiosidade, em sala de aula, frente ao conteúdo da instrução didática e a realização das atividades de elaboração, avaliação e de solução das próprias perguntas dos/as estudantes; e **(iii)** a promoção do pensamento crítico sobre a natureza da ciência, no currículo e na formação de professores de física e futuros cientistas, por meio da construção de vinte e um vínculos epistemológicos entre o conteúdo da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física e os diversos aspectos, características, princípios da natureza da ciência referendados pela literatura do ensino de ciências e do ensino de física, de modo especial. Em face dessas relevantes contribuições, esta tese conclui/defende que: o estudo da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, fundamentado na epistemologia da solução de problemas de Larry Laudan é um dos caminhos profícuos para uso didático da história e filosofia da ciência.

**Palavras-chave:** Ensino de Ciências/Física. História da Ciência. Natureza da Ciência.

## ABSTRACT

The aim of this thesis was to investigate possible contributions to science/physics education and critical thinking about the nature of science, promoted by a wide study of the conceptual history of astronomy in cosmology and physics, based on the epistemology of problem solving by Larry Laudan. Their justifications were based on the contributions that history and philosophy of science (HFC) have provided to the science education and physics education, in view of three fundamental needs: the signification of scientific content; the development of teaching strategies contributed epistemological by HFC, as complementary alternatives for the investigative field of problem solving; and the promotion of critical thinking about the nature of science, in the curriculum and in the scientific and technological formation of future science/physics teachers and scientists. Theoretically, this thesis was based on the epistemological perspective of Laudan's problem solving, due to the fact that this view of science includes an original aspect of the conceptual component, in the analysis of the complex scientific development. In addition, this theoretical contribution has helped research in science and physics education, since the late 1980s, mainly: in the improvement of teaching-learning models; on the substantiation of research; in understanding students' epistemological conceptions; in the production of analogies between scientific activity and student activity; and in the investigation of episodes in the history of science. Methodologically, extensive studies were developed on: the didactic and educational importance of the question in science and physics education; the conceptual history of astronomy, cosmology and physics, from the Babylonians to Newtonian universal gravitation, operationalizing the Laudanian concepts and assumption to build a historical narrative attentive to the general objective. As a result, this thesis provides science/physics education with the following contributions: (i) the signification, through a relevant historical context, of various subjects/themes in astronomy, cosmology and physics, established by official documents and literature Brazilian as essential for student understanding of the Earth-Universe relationship; (ii) a complementary alternative teaching proposal for the investigative field of problem solving, which provides a deep critical-reflexive student experience focused on the question, the inquiry and the curiosity, in the classroom, in face of the content of the didactic instruction and the carrying out the activities of elaboration, evaluation and solution of the students' own questions; and (iii) the promotion of critical thinking about the nature of science, in the curriculum and in the formation of physics teachers and future scientists, through the construction of twenty-one epistemological articulation between the content of the conceptual history of astronomy, cosmology and physics and the various aspects, characteristics, principles of the nature of science endorsed by the literature of science teaching and physics teaching, in a special way. In view of these relevant contributions, this thesis concludes/defends that: the study of the conceptual history of astronomy, cosmology and physics, based on the problem solving epistemology of Larry Laudan is one of the useful paths for didactic use of the history and philosophy of science.

**Keywords:** Science and Physics Education. History of Science. Nature of Science.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Movimento de retrogradação planetária. ....	70
Figura 2 – Modelo Cosmológico de Pitágoras. ....	76
Figura 3 – Modelo Cosmológico de Filolau de Crotona. ....	80
Figura 4 – Esquema da invisibilidade do fogo central. ....	81
Figura 5 – Movimentos do mesmo e do outro na cosmologia platônica. ....	87
Figura 6 – As fases da Lua. ....	91
Figura 7 – Movimento retrógrado do planeta Marte. ....	95
Figura 8 – Imagens de Vênus e Mercúrio surgindo como estrelas da tarde. ....	96
Figura 9 – A explicação da teoria de Eudoxo para o movimento da Lua. ....	105
Figura 10 – A explicação do movimento retrógrado planetário. ....	107
Figura 11– Modelo cosmológico de Aristóteles. ....	112
Figura 12 – O Primeiro Motor de Aristóteles. ....	118
Figura 13 – Modelo cosmológico de Heráclides. ....	129
Figura 14 – O mecanismo do epiciclo. ....	130
Figura 15 – Ilustração do método de Aristarco ....	133
Figura 16 – Medida do diâmetro aparente do Sol ....	135
Figura 17 – Hipátia de Alexandria. ....	139
Figura 18 – Iluminação de um poço profundo na cidade de Assuã. ....	140
Figura 19 – Elementos envolvidos nos cálculos de Eratóstenes ....	141
Figura 20 – Esquema do epiciclo-deferente. ....	144
Figura 21 – Os <i>loopings</i> no esquema do epiciclo-deferente. ....	144
Figura 22 – Explicação de Apolônio para o movimento planetário retrógrado. ....	145
Figura 23 – Modelo epiciclo-deferente para o movimento da Lua. ....	145
Figura 24 – Modelo epiciclo-deferente para o movimento dos planetas externos. ....	146
Figura 25 – Teorema de um ponto estacionário para os planetas externos. ....	147
Figura 26 – Esquema do deferente para um ponto estacionário H. ....	147
Figura 27 – Fragmento de texto do Almagesto. ....	151
Figura 28 – Movimento do Sol pela eclíptica ....	159
Figura 29 – Modelo Excêntrico para o movimento do Sol. ....	160
Figura 30 – Equivalência dos modelos epiciclo-deferente e o modelo excêntrico. ....	161
Figura 31 – Modelo equante para o movimento dos planetas externos. ....	162

Figura 32 – Modelo epiciclo-deferente para o movimento de Mercúrio. ....	163
Figura 33 – Esquema para o movimento do Sol e os planetas internos e externos. .	164
Figura 34 – Modelo do epiciclo para o movimento da Lua. ....	165
Figura 35 – As cinco zonas climáticas da Terra.....	170
Figura 36 – A ideia da Antiperistasis de Aristóteles. ....	178
Figura 37 – Atuação da força impressa de Hiparco. ....	179
Figura 38 – Força sobre um objeto movendo-se em direção ao solo. ....	179
Figura 39 – Eclipses solares e os eclipses lunares.....	203
Figura 40 – Inclinação do plano orbital da Lua em torno da Terra.....	204
Figura 41 – Eclipse lunar ou anelar.....	205
Figura 42 – Ordenamento dos planetas no sistema astronômico copernicano.....	206
Figura 43 – O problema empírico das estações do ano. ....	207
Figura 44 – A máquina de Eames. ....	209
Figura 45 – Equivalência explicativa geocêntrica <i>versus</i> heliocêntrica.....	210
Figura 46 – A solução de Copérnico para o movimento retrógrado de Marte. ....	211
Figura 47 – Alguns instrumentos astronômicos de Tycho Brahe. ....	218
Figura 48 – Ilustrações sobre o aparecimento da estrela nova e do cometa.....	219
Figura 49 – Modelo cosmológico híbrido de Brahe.....	222
Figura 50 – Imagens de dois telescópios de Galileu. ....	236
Figura 51 – Representação artística de Galileu da superfície lunar. ....	236
Figura 52 – Imagem de Galileu sobre a Nebulosa de Órion. ....	237
Figura 53 – Observação de Galileu das quatro luas de Júpiter .....	238
Figura 54 – Ilustração do modelo cosmológico de Otto von Guericke de 1672. ....	239
Figura 55 – Aparência de Vênus nas predições de Ptolomeu (a) e Copérnico (b)...	240
Figura 56 – Ilustração dos anéis de Saturno vistos da Terra. ....	242
Figura 57 – As manchas solares observadas por Galileu em 1612. ....	243
Figura 58 – As câmeras escuras e telescópicas de Fabricius e Scheiner.....	244
Figura 59 – Registro das manchas solares de Scheiner no ano de 1611. ....	245
Figura 60 – Gráficos primitivos de velocidade em função do tempo. ....	254
Figura 61 – Representação artística da experiência de Galileu.....	259
Figura 62 – Diagrama explicativo de Galileu. ....	262
Figura 63 – O movimento de um objeto abandonado do mastro de um navio.....	266
Figura 64 – O movimento parabólico de um projétil. ....	267

Figura 65 – O modelo cosmológico dos sólidos regulares de Kepler. ....	271
Figura 66 – Modelo equante da teoria planetária ptolomaica. ....	275
Figura 67 – Esquema ilustrativo da lei das áreas de Kepler.....	277
Figura 68 – Posições da órbita de Marte vistas da Terra.....	278
Figura 69 – Distância planetária ao Sol igual ao semieixo maior da órbita elíptica.	279
Figura 70 – O movimento dos planetas no modelo cosmológico de Descartes. ....	286
Figura 71 – Ilustração da explicação mecânica da gravidade. ....	288
Figura 72 – A órbita kepleriana de um planeta e a órbita galileana de um projétil.	297
Figura 73 – Modelos geométricos das hipóteses de Hooke e de Newton. ....	303
Figura 74 – Ilustração geométrica da Proposição I de Newton.....	307
Figura 75 – Síntese das soluções dos problemas-Proposições VII a XIII.....	312

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1 PROBLEMÁTICA DE PESQUISA.....	17
1.2 PRESSUPOSTOS E DELINEAMENTO METODOLÓGICO.....	27
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA.....	32
1.4 OBJETIVOS.....	32
<b>1.4.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>32</b>
<b>1.4.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>32</b>
<b>2 A CIÊNCIA COMO UMA ATIVIDADE DE SOLUÇÃO DE PROBLEMAS.....</b>	<b>34</b>
2.1 A VISÃO EPISTEMOLÓGICA DE LARRY LAUDAN.....	34
2.2 A TAXONOMIA DOS PROBLEMAS CIENTÍFICOS.....	37
2.3 O CONCEITO DE TRADIÇÃO DE PESQUISA.....	41
2.4 AS CONCEPÇÕES DE LAUDAN NO ENSINO DE CIÊNCIAS E DE FÍSICA.....	42
<b>3 A IMPORTÂNCIA DA PERGUNTA NO ENSINO DE CIÊNCIAS E DE FÍSICA ..</b>	<b>47</b>
3.1 A LONGEVIDADE DA PERGUNTA NO CONTEXTO EDUCACIONAL.....	49
3.2 A TAXONOMIA DOS OBJETIVOS EDUCACIONAIS DE BLOOM.....	51
3.3 ANÁLISE DAS PERGUNTAS DE PROFESSORAS E PROFESSORES.....	56
3.4 AS PERGUNTAS DAS E DOS ESTUDANTES NO FOCO DAS PESQUISAS.....	58
<b>3.4.1 As Perguntas das e dos Estudantes a Partir da Leitura de Textos Científicos.....</b>	<b>61</b>
<b>4 O NASCIMENTO DA TRADIÇÃO DE PESQUISA GREGA ANTIGA – TPGA.....</b>	<b>67</b>
4.1 OS FATOS CELESTES NO CONTEXTO ASTRONÔMICO BABILÔNICO.....	67
4.2 OS COMPROMISSOS METODOLÓGICOS E ONTOLÓGICOS DA TPGA.....	72
<b>4.2.1 A Cosmologia Pitagórica.....</b>	<b>72</b>
<b>4.2.2 O Modelo Cosmológico de Pitágoras e a Esfericidade da Terra.....</b>	<b>75</b>
<b>4.2.3 O Modelo Cosmológico de Filolau e Suas Influências Sobre Platão.....</b>	<b>78</b>
4.3 A FORMALIZAÇÃO DOS PROBLEMAS EMPÍRICOS DA TPGA.....	83
<b>4.3.1 A Cosmologia de Platão e a Origem da Astronomia Matemática Instrumentalista..</b>	<b>83</b>

4.3.2 Os Problemas Empíricos Astronômicos e Cosmológicos da TPGA.....	90
<b>5 A ORIGEM DOS PROBLEMAS CONCEITUAIS INTERNOS E EXTERNOS DA TPGA.....</b>	<b>99</b>
5.1 A TEORIA PLANETÁRIA DAS ESFERAS CONCÊNTRICAS DE EUDOXO.....	99
5.1.1 Os Relatos de Aristóteles e de Simplicio Sobre a Teoria Planetária de Eudoxo....	101
5.1.2 Os PCI Implicados na Teoria Planetária de Eudoxo.....	104
5.2 A COSMOLOGIA DE ARISTÓTELES E SUA MALHA CONCEITUAL.....	111
5.2.1 As Explicações de Aristóteles Para os Problemas Empíricos da TPGA .....	114
5.2.2 Os PCE Implicados na Visão de Mundo Aristotélica .....	116
<b>6 NOVAS COSMOLOGIAS DA TPGA E TAMANHO DA TERRA .....</b>	<b>127</b>
6.1 A COSMOLOGIA DE HERÁCLIDES DE PONTO.....	127
6.2 A COSMOLOGIA DE ARISTARCO DE SAMOS.....	131
6.3 A MEDIDA DO TAMANHO DA TERRA POR ERATÓSTENES DE CIRENE.....	138
<b>7 AS NOVAS TEORIAS PLANETÁRIAS E O APOGEU DA TPGA.....</b>	<b>143</b>
7.1 A TEORIA PLANETÁRIA DO EPICICLO-DEFERENTE DE APOLÔNIO.....	143
7.2 AS CONTRIBUIÇÕES ASTRONÔMICAS DE HIPARCO DE NICÉIA .....	148
7.3 ALGUNS ASPECTOS SOBRE O ALMAGESTO DE PTOLOMEU .....	151
7.4 AS CORRENTES DE PENSAMENTO INSTRUMENTALISTA E REALISTA....	155
7.5 PTOLOMEU E A SOLUÇÃO DOS PROBLEMAS EMPÍRICOS DA TPGA.....	158
<b>8 OS FATORES EXTERNOS E INTERNOS À CIÊNCIA NO CONTEXTO EUROPEU MEDIEVAL.....</b>	<b>168</b>
8.1 OS FATORES EXTERNOS À CIÊNCIA DE PTOLOMEU A COPÉRNICO.....	169
8.1.1 A Fase do Lento Declínio da Atividade Científica Europeia Medieval.....	169
8.1.2 A Fase do Desaparecimento do Saber da Tradição de Pesquisa Grega Antiga ....	172
8.2 OS FATORES INTERNOS À CIÊNCIA NOS ANTECEDENTES DA ASTRONOMIA COPERNICANA.....	175
8.2.1 O Problema Conceitual Interno Entre a Astronomia de Ptolomeu e a Cosmologia de Aristóteles .....	175

<b>8.2.2 Os Problemas Conceituais nas Críticas à Dinâmica de Forças de Aristóteles.....</b>	<b>177</b>
<b>8.2.3 O Resgate da Discussão sobre a Possibilidade do Movimento da Terra.....</b>	<b>184</b>
<b>8.2.4 A Discussão Sobre a Cosmologia Medieval .....</b>	<b>186</b>
<b>9 O ADVENTO DA ASTRONOMIA COPERNICANA SOB A LENTE DA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS .....</b>	<b>191</b>
9.1 A INFLUÊNCIA FILOSÓFICA DA ESCOLA DE PENSAMENTO NEOPLATÔNICO. ....	191
9.2 A INFLUÊNCIA METAFÍSICA NEOPLATÔNICA DE CULTO AO SOL.....	195
9.3 OS PROBLEMAS CONCEITUAIS NO CONTEXTO DE COPÉRNICO.....	199
9.4 O SISTEMA COPERNICANO E UMA NOVA SOLUÇÃO DOS PROBLEMAS EMPÍRICOS DA TPGA.....	202
<b>10 A NATUREZA DAS CRÍTICAS CONTRA O SISTEMA COPERNICANO.....</b>	<b>213</b>
10.1 AS CRÍTICAS CONTEXTUAIS A COPÉRNICO.....	214
10.2 AS CRÍTICAS DE TYCHO BRAHE AO TRABALHO DE COPÉRNICO .....	216
10.3 AS CRÍTICAS DE CUNHO RELIGIOSO CONTRA O SISTEMA COPERNICANO.....	225
<b>11 A DEFESA DO SISTEMA COPERNICANO POR BRUNO E GALILEU.....</b>	<b>229</b>
11.1 GIORDANO BRUNO E SUA DEFESA DO SISTEMA COPERNICANO.....	230
11.2 GALILEU GALILEI O DEFENSOR MAIS PROEMINENTE DO SISTEMA COPERNICANO.....	234
<b>11.2.1 As Observações Telescópicas de Galileu a Partir do Ano de 1609.....</b>	<b>236</b>
<b>11.2.2 Alguns Argumentos de Galileu em Defesa do Sistema Copernicano.....</b>	<b>245</b>
<b>12 AS CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS DE GALILEU PARA UMA NOVA FÍSICA.....</b>	<b>251</b>
12.1 A SOLUÇÃO DE GALILEU PARA OS PROBLEMAS FOMENTADOS PELO SISTEMA COPERNICANO.....	251
<b>12.1.1 Os Aportes Teóricos que Alicerçaram as Soluções de Galileu .....</b>	<b>252</b>
<b>12.1.2 As Soluções dos problemas Apresentadas por Galileu.....</b>	<b>256</b>
<b>13 JOHANNES KEPLER E A CONSTITUIÇÃO DE UMA NOVA ASTRONOMIA .</b>	<b>269</b>

13.1 OS LIMITES ÀS ESPECULAÇÕES FILOSÓFICAS DE KEPLER.....	270
13.2 AS LEIS DE KEPLER E SUAS MUDANÇAS MODOLÓGICAS.....	274
13.3 SOLUÇÕES DE KEPLER PARA A CAUSA DO MOVIMENTO PLANETÁRIO..	280
13.4 A EXPLICAÇÃO MECÂNICA DA GRAVIDADE POR RENÉ DESCARTES.....	284
13.5 OS PROBLEMAS EMPÍRICOS E CONCEITUAIS ENFRENTADOS POR NEWTON.....	289
<b>14 A TEORIA DA GRAVITAÇÃO NEWTONIANA E A SOLUÇÃO DOS PROBLEMAS NO FOCO DE UMA NOVA TRADIÇÃO DE PESQUISA.....</b>	<b>296</b>
14.1 OS PASSOS INTELECTUAIS NEWTONIANOS RUMO À TG.....	297
14.2 OS PASSOS INTELECTUAIS NEWTONIANOS NO LIVRO I DO PRINCIPIA.....	307
14.3 O SIGNIFICADO DA SÍNTESE NEWTONIANA POR ALEXANDRE KOYRÉ ....	315
<b>15 A UNIDADE DE ENSINO SOBRE A HC DA ACF FUNDAMENTADA NA SP.....</b>	<b>319</b>
15.1 A EMENTA DA UNIDADE DE ENSINO .....	324
15.2 OBJETIVO GERAL DA UNIDADE DE ENSINO .....	325
15.3 OS OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM DA UNIDADE DE ENSINO.....	325
15.4 ASPECTOS METODOLÓGICOS DA UNIDADE DE ENSINO.....	327
15.5 A AVALIAÇÃO DOS/AS ESTUDANTES NA UNIDADE DE ENSINO.....	327
<b>16 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>329</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>346</b>
<b>APÊNDICE – PLANO DE AULAS DA UNIDADE DE ENSINO .....</b>	<b>363</b>
<b>ANEXO 1 – OPINÁRIOS DE SONDAÇÃO .....</b>	<b>411</b>
<b>ANEXO 2 – APRESENTAÇÃO EM POWER POINT DA EPISTEMOLOGIA DE LAUDAN .....</b>	<b>420</b>
<b>ANEXO 3 – APRESENTAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE ENSINO.....</b>	<b>438</b>
<b>ANEXO 4 – CONJUNTO DE PERGUNTAS RELATIVAS AOS CONTEÚDOS DOS TEMAS/AULAS DA UNIDADE DE ENSINO .....</b>	<b>439</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em uma era da ciência, da tecnologia e da informação, dentre os diversos fatores substantivos que afetam o ensino de ciências/física, esta tese tem como principais motivações as necessidades para com: a resignificação dos conteúdos científicos<sup>2</sup>; o desenvolvimento de estratégias de ensino alternativas complementares ao campo de investigação da resolução de problemas e; a promoção do pensamento crítico sobre a natureza da ciência, por diferentes perspectivas.

Nessa direção, a literatura aponta que, sem querer apresentar todas as soluções para o ensino de ciências, em geral, e o ensino de física, em particular, o aporte epistemológico da história e da filosofia da ciência, sob um olhar integrativo, tem contribuído substantivamente para auxiliar os/as investigadores/as e a ação docente, em sala de aula, a suprir tais necessidades (MATTHEWS, 1995; SILVA Cibelle, 2006; TEIXEIRA; FREIRE JR; EL-HANI, 2009; FORATO; PIETROCOLA; MARTINS André, 2011; PEREIRA Giulliano; MARTINS André, 2011; PRAXEDE, 2011; JUNIOR; CUNHA; LARANJEIRAS, 2012; PEDUZZI; MARTINS André; FERREIRA Juliana, 2012; TEIXEIRA; GRECA; FREIRE JR., 2012; CORDEIRO; PEDUZZI, 2016).

A partir dessa literatura, destaca-se que o uso didático desse aporte epistemológico tem contribuído para transformar as aulas de ciências, em situações didáticas mais desafiadoras e reflexivas. Especialmente, por fornecer significados a forte ênfase dada à linguagem matemática operacionalizada por estudantes e professores/as em sala de aula (MATTHEWS, 1995; PIETROCOLA, 2002); fundamentar propostas de ensino alternativas e complementares para o campo investigativo da resolução de problemas (PEDUZZI, 1998; SANTOS; INFANTE-MALACHIAS, 2008); e permitir a contextualização das práticas didáticas de laboratório, via reconstrução de experimentos históricos (MEDEIROS Alexandre; MONTEIRO JR., 2001; JARDIM; GUERRA, 2017).

Em conformidade, afirma-se que essas contribuições se materializam no ideal educativo denominado de *abordagem contextual do conteúdo científico pela história e filosofia da ciência* (MATTHEWS, 1995; SANTOS; INFANTE-MALACHIAS, 2008; TEIXEIRA; FREIRE JR; EL-HANI, 2009). Por essa perspectiva educativa, tanto o currículo como as situações didáticas, no ensino de ciências, deve abordar, para além dos conteúdos da

---

<sup>2</sup>Destaca-se que essa resignificação vai muito além da simples e superficial “contextualização histórica” abordada, por exemplo, nos livros didáticos de ciências/física da educação básica e do ensino superior.

ciência/física (leis, modelos, princípios, sistemas, teorias, etc.), aspectos culturais, éticos, morais, sociais, históricos, filosóficos, tecnológicos, dentre outros, que influenciam e são influenciados pela atividade científica. Assim como, marcam a natureza da ciência e do conhecimento científico, ao longo do dinâmico e complexo processo de produção, comunicação e validação desse conhecimento.

Nessa perspectiva, a história e a filosofia da ciência, de maneira integrada, têm auxiliado na promoção de um ensino-aprendizagem mais contextualizado, em relação ao entendimento *em e sobre a ciência*. Em termos epistemológicos, a história e a filosofia da ciência garantem uma construção de uma abordagem *não* positivista lógica das ciências, pela qual é possível evidenciar diversos *fatores externos, porém inerentes à própria ciência como atividade intrinsecamente humana*.

Por exemplo, uma imagem de ciência caracterizada por questões subjetivas, controversas, não elitistas, de gênero, ambientais, culturais, econômicas, históricas, políticas, sociais e até religiosas, contextualmente localizadas (HESSEN Boris, 1984; KUHN, 1990; FREIRE JR, 1993; ZANETIC, 1998; MASSONI, 2010; FORATO; PIETROCOLA; MARTINS André, 2011; PEREIRA Giulliano; MARTINS André, 2011; CORDEIRO; PEDUZZI, 2016).

Ademais, inclui-se, também, que a evidência da coexistência da pluralidade metodológica de produção de conhecimento científico, como regra e não exceção (FEYERABEND, 1977; LAUDAN, 2011), condiciona a comunidade do ensino de ciências/física a aceitar, reconhecer e compartilhar democraticamente da diversidade de alternativas e estratégias didáticas, guiadas por diferentes correntes pedagógicas e orientações teóricas e metodológicas (GURGEL, 2020; VIDEIRA, 2007).

Por outro lado, no que cabe às investigações acadêmicas, a literatura também aponta para a existência de algumas dificuldades teóricas e metodológicas das pesquisas, que precisam ser observadas ao se trabalhar na perspectiva da história e filosofia da ciência. Dentre essas dificuldades, encontram-se o problema da conversão dos projetos de currículo em intervenção prática de sala de aula (MATTHEWS, 1995; 1997); a necessidade de novas orientações para a prática docente, produção e avaliação de materiais didáticos bem fundamentados (SCHIRMER; SAUERWEIN, 2014); bem como a inclusão de cursos adequados para a formação de professores e professoras de ciências e de física (PEREIRA Giulliano; MARTINS André, 2011).

Atentando para essa formação, Pereira e Martins André (2011, p. 234) reiteram acerca do problema relativo aos equívocos sobre a natureza da ciência e do seu uso na educação, bem como “a falta de professores/as com formação específica na área em que possam ministrar as disciplinas de conteúdo histórico e filosófico”. Adjacente a isso, Damásio e Peduzzi (2017, p. 4) constataam que, no contexto brasileiro, 34% (14) das teses e dissertações analisadas, nessa área, não apresentam fundamentos epistemológicos; e “26 (63%) desses trabalhos não declararam qual teoria de aprendizagem orientou o desenvolvimento da pesquisa” (Idem).

Partindo dessas motivações e do enfrentamento das dificuldades pontuadas, na próxima seção, procura-se equacionar a problemática desta tese, atentando-se para sua importância no processo de ressignificação dos conteúdos científicos, do desenvolvimento de estratégias de ensino alternativas para o campo investigativo da resolução de problemas, e da promoção do pensamento crítico sobre a natureza da ciência.

## 1.1 PROBLEMÁTICA DE PESQUISA

Em razão da pluralidade metodológica existente no ensino de ciências/física, nesta investigação toma-se como referência a importância e a longevidade do campo investigativo da *resolução de problemas*, cujas perspectivas, ao longo do tempo, têm procurado incorporar os significados atuais da concepção construtivista (ESCUDEIRO; FLORES, 1996; PEDUZZI, 1998; GRECA; MOREIRA, 2002; SOUZA; DE BASTOS, 2006; VASCONCELOS et al., 2007; SANTOS; INFANTE-MALACHIAS, 2008; CSAPÓ; FUNKE, 2017; OSMAN, 2017). Por exemplo, estabelecendo, por um lado, a integração entre a construção de significados pelos educandos e o papel dos conteúdos científicos e metacientíficos; e, por outro, a integração individual e social dos sujeitos na resolução de problemas (ESCUDEIRO; GONZALEZ; GARCIA, 1999; CSAPÓ; FUNKE, 2017; OSMAN, 2017).

Para o ensino de física, a resolução de problemas é vista como uma atividade de aprendizagem complexa, que envolve um grande esforço cognitivo do pensamento estudantil, em diferentes níveis de escolaridade (COSTA; MOREIRA, 1996). Contudo, do ponto de vista metodológico, a resolução de problemas ficou restrita, por muito tempo, a um ensino fundamentado “na transmissão e aquisição de conhecimentos”, constituindo-se tanto em “um conteúdo educativo quanto em um modo de conceber as atividades educativas” (COSTA; MOREIRA, 1997, p. 7).

Consequentemente, dada a prioridade sobre as investigações de mecanismos específicos (diferenças nas formas de resolução de problemas e/ou exercícios) utilizados por novatos e especialistas; e as estratégias didáticas que facilitam essa resolução (COSTA; MOREIRA, 1997), não houve superação nem fracasso, nem da desmotivação da maioria dos/as estudantes de física, na educação básica e no nível superior (PIETROCOLA, 2002).

Nessa perspectiva, Gil-Pérez et al. (1999) questionam o sentido de algumas pesquisas, por exemplo, continuarem distinguindo a aprendizagem de conceitos, da resolução de problemas/exercícios a lápis e papel e da realização de práticas de laboratório. Uma vez que muito pouco foi obtido para sanar o problema da aprendizagem no ensino de ciências, nessas três perspectivas.

Em conformidade Greca e Moreira (2002, p. 53) observam que, em relação a aprendizagem conceitual, o cenário também não é animador, quando se leva em conta “os pobres resultados da linha mais desenvolvida, que é a da mudança conceitual”. Linha que se preocupa em investigar as concepções epistemológicas estudantis, em diferentes áreas, associando-as às dificuldades de aprendizagem de determinados conceitos (GRECA; MOREIRA, 2002).

Em contraponto, Vasconcelos et al. (2007, p. 242) afirmam que a resolução de problemas não ficou restrita a essas perspectivas, pois “aparece articulada com outras linhas de investigação, por exemplo, de orientação ciência, tecnologia e sociedade, do desenvolvimento de competências e com o ensino não formal”.

Nessa direção, Souza e De Bastos (2006) pontuam que a orientação (ciência, tecnologia e sociedade) se alinha, também, com o componente ambiental, mostrando que a resolução de problemas, como amplo campo de investigação, não se restringe à perspectiva investigativa das atividades a lápis e papel e das práticas didáticas de laboratório. Porém, para o ensino de física, esses autores reconhecem que o ensino médio, historicamente, tem sido guiado pela clássica resolução de problemas, devido às demandas dos exames nacionais de avaliação para o ingresso nas universidades (SOUZA; DE BASTOS, 2006).

Por outro lado, Santos e Infante-Malachias (2008, p. 563) revelam que a interdisciplinaridade e a resolução de problemas “são os dois construtos que sustentam não apenas o curso de licenciatura, mas também todos os dez cursos da escola de artes, ciência e humanidades da universidade de São Paulo”. Além disso, essas autoras apontam que essa proposta curricular impacta significativamente sobre o fazer didático dos/as futuros/as professores/as de ciências. E isso se deve à construção dos elos curriculares entre esses dois

construtos (resolução de problemas e interdisciplinaridade), ser articulada por meio do papel desempenhado pela história da ciência, quando esta convida o/a estudante para:

Uma verdadeira viagem no tempo, a fim de aprender, dentro do contexto histórico, como surgem e são refutadas as teorias científicas; tratar do nascimento da ciência moderna pela leitura de “O método, de Descartes”; estudar as leis do movimento desenvolvidas por Newton, bem como os fundamentos do cálculo. (SANTOS; INFANTE-MALACHIAS, 2008, p. 564-565)

Na instância global, Osman (2017) afirma que o programa internacional de avaliação dos estudantes (PISA) publicou um relatório em 2005, *Problem Solving for Tomorrow's World* – Solução de problemas para o mundo de amanhã, tradução livre –, que identifica a resolução de problemas como componente chave para a avaliação futura. Segundo esse autor, nos argumentos deste relatório, aplicados igualmente aos estudos no domínio da ciência cognitiva, “o valor e a importância de avaliar a capacidade de resolução de problemas é, pois, uma habilidade prática” (OSMAN, 2017, p. 48).

Nesse contexto, a obra “*The Nature of Problems Solving: using research to inspire 21st century learning*” – em português, “*A Natureza da Solução de Problemas: usando pesquisa para inspirar a aprendizagem no século XXI*” – revela que, em 2012, o PISA estabelece a resolução de problemas como a base fundamental de sua avaliação. Por conseguinte, em 2015, o PISA avaliou as habilidades individuais e coletivas dos estudantes e mostrou que: “em uma consistente resolução de problemas, as habilidades não são automáticas, como produto de conhecimentos e habilidades disciplinares resultantes” (CSAPÓ; FUNKE, 2017, p. 4).

Em face disso, Csapó e Funke (2017) afirmam que, apesar de muitos currículos escolares destacarem a importância das habilidades individuais e coletivas de resolução de problemas, surpreendentemente, pouco se sabe como os sistemas educacionais oferecem essas habilidades. Para esses autores, dois fatores justificam esse problema. Primeiro, “porque as disciplinas escolares continuam a ser moldadas por contextos disciplinares tradicionais” (CSAPÓ; FUNKE, 2017, p. 4). Segundo, “porque os educadores têm poucas métricas confiáveis para observar as habilidades de resolução de problemas de seus estudantes” (Idem).

Diante desses desdobramentos, pode-se afirmar que a resolução de problemas constitui-se como uma perspectiva investigativa e metodológica muito importante para o ensino de ciências/física. Especialmente, por suas características principais estarem intimamente ligadas às atividades cognitivas, procedimentais e psicomotoras dos/as

estudantes, em diferentes níveis de ensino e campos de conhecimentos. O que justifica as investigações com as mais diversas orientações teóricas possíveis, para fornecer subsídios bem fundamentados para o problema da aprendizagem *em e sobre as ciências* e a superação da obsolescência dos contextos disciplinares tradicionais.

Por essa razão, se aposta, aqui, em uma investigação orientada epistemologicamente pela história conceitual da ciência, que permita vislumbrar contribuições didáticas alternativas ao campo investigativo da resolução de problemas. Em vista de instrumentalizar a formação de professores/as do ensino de ciências/física e de futuros/as cientistas na área de física.

Coadunando com essa preocupação, é importante situar, a seguir, as discussões em torno da temática *natureza da ciência*, posto que a ressignificação dos conteúdos científicos e das estratégias de ensino, perpassa também pela visão epistemológica de ciência adotada e operacionalizada em qualquer empreendimento acadêmico-científico.

Sobre a temática *natureza da ciência*, por diferentes perspectivas, ela se constitui de *saberes metacientíficos* originados por meio de diversos questionamentos acerca de: o que é a ciência; como funciona interna e externamente, produz, avalia, comunica e valida o conhecimento científico; valores inseridos na prática científica; implicações das relações complexas entre a ciência, a tecnologia, a sociedade e o meio ambiente, dentre outros (CLOUGH, 2008; VÁZQUEZ et al., 2008).

Nesse sentido, acrescenta-se que o próprio conhecimento científico revela uma natureza associada a diferentes aspectos: ideia de conhecimento empírico, histórico, holístico, humanístico, probabilístico, provisório, público, replicável, tentativo, teórico, dentre outros (MEICHTRY, 1999). Portanto, nesta tese, acredita-se que a aprendizagem significativa desses saberes é um “preceito fundamental para a formação de alunos e professores críticos e integrados com o mundo e a realidade em que vivem” (MOURA, 2014, p. 32).

Por conseguinte, pressupõe-se que para interagir criticamente no enfrentamento dos problemas e da realidade do mundo, neste século XXI, em âmbito local, regional e global, é preciso se instrumentalizar suficientemente para ser capaz de entender, entre outras coisas, o que se segue. O papel da criatividade e da colaboração na ciência para solucionar problemas importantes. A função dos modelos científicos. A distinção entre hipóteses, leis e teorias. A relação entre experimentação e construtos teóricos. A não neutralidade das observações. O significado de uma explicação científica, em seu contexto histórico. E que, hipótese e teorias não são verdades absolutas (PEDUZZI; RAÍCIK, 2020). Por esse ideal, resgata-se o bom e

velho argumento de que o ensino e a aprendizagem devem focar simultaneamente *em e sobre a ciência* (MATTHEWS, 1995).

No entanto, por esse ideal estar imerso em uma atmosfera truncada de disputas entre diferentes correntes pedagógicas e orientações teóricas, “a comunidade de educadores em ciências reconhece a importância do saber sobre a ciência para o ensino [...], porém esse tema permanece um desafio a ser enfrentado” (MARTINS André, 2015, p. 704). Por exemplo, “todos os educadores de ciências, interessados na natureza da ciência e na sua relevância para a educação científica, observam que questões relativas à natureza da ciência não estão resolvidas” (CLOUGH, 2008, p. 31). Em função disso, três questões permanecem em aberto, a saber: *Por que é relevante ensinar sobre a natureza da ciência? O que ensinar? Como ensinar?* (MARTINS André, 2015).

Consequentemente, na delimitação para investigar essa problemática, a questão: *O que ensinar?* – em materialidade de conteúdo –, sem perder de vista as outras duas, apresenta-se como a que mais tem dividido as pesquisas realizadas, por exemplo, pelos críticos e adeptos da denominada *visão consensual* sobre a natureza da ciência. Isso porque, se para seus adeptos existe “uma lista de princípios claros e objetivos do que está em foco na construção do conhecimento científico” (MOURA, 2014, p. 33), para seus críticos, essa lista pode ser questionada por diferentes motivos.

Com efeito, Martins André (2015, p. 707) afirma que existem “diversos caminhos/rotas para se construir um entendimento em relação à pergunta, o que ensinar?” – sobre natureza da ciência. Mas, na mesma proporção, existem também divergências em relação a diferentes terminologias, pontos de partidas e conclusões.

Por exemplo, alguns trabalhos exploram a temática natureza da ciência, identificando visões inapropriadas que são compartilhadas por professores, estudantes, livros didáticos e disseminadas pelos meios de comunicação (DINIZ; REZENDE JÚNIOR, 2017). Tais visões correspondem às concepções de uma ciência: empírico-indutivista; rígida, algorítmica, exata e metodologicamente infalível; cumulativa e linear na produção do conhecimento; descontextualizada e socialmente neutra; bem como individualista, elitista e masculinizada (GIL-PÉREZ et al., 2001).

Juntamente com essas concepções, acrescentam-se as ideias de que o trabalho científico é isolado; que o principal propósito da ciência é prover soluções apenas para problemas técnicos; bem como a falta de percepção do papel das teorias e modelos matemáticos nas explicações científicas (DRIVER et al., 1996). Como ponto positivo, essa

identificação “representou um avanço importante das pesquisas na área e um entendimento daquilo que não deve ser ensinado” (MARTINS André, 2015, p. 705) sobre a natureza da ciência. E como resposta à pergunta – *O que ensinar?* –, foram desenvolvidos diversos estudos pelos adeptos e críticos da visão consensual.

Adeptos à visão consensual, McComas e Olson (1998) analisaram alguns documentos oficiais da educação científica de países estrangeiros, Estados Unidos (quatro documentos), Canadá (um documento), Austrália (um documento), Nova Zelândia (um documento) e Inglaterra/País de Gales (um documento), focando-se nas ideias vinculadas à filosofia, história, psicologia e sociologia da ciência ocidental.

Contudo, o trabalho desses autores foi criticado, devido à visão de ciência extraída desses documentos não incorporar a perspectiva de outros povos, latinos americanos, africanos, asiáticos e árabes (MARTINS André, 2015). Não obstante, esses autores consideram que “existe claramente consenso sobre a natureza das questões que devem informar a educação científica” (MCCOMAS; OLSON, 1998, p. 48). Com essa possibilidade, McComas, Almazroa e Clough (1998) listaram diversos *princípios* sobre a natureza da ciência e do conhecimento científico, a saber:

O conhecimento científico, enquanto durável, tem um caráter provisório; o conhecimento científico depende fortemente, mas não inteiramente, da observação, evidência experimental, argumentos racionais e ceticismo; não há uma maneira de fazer ciência (portanto, não há um método científico universal passo a passo); a ciência é uma tentativa de explicar fenômenos naturais; leis e teorias desempenham papéis diferentes na ciência, portanto, os alunos devem observar que as teorias não se tornam leis (sic) mesmo com evidências adicionais; pessoas de todas as culturas contribuem para a ciência; o novo conhecimento deve ser relatado clara e abertamente; os cientistas exigem manutenção de registros precisos, revisão por pares e replicabilidade; as observações são carregadas de teoria; cientistas são criativos; a história da ciência revela tanto um caráter evolucionário quanto revolucionário; a ciência faz parte das tradições sociais e culturais; ciência e tecnologia impactam-se mutuamente; e as ideias científicas afetam e são afetadas por seu meio social e histórico. (MCCOMAS, ALMAZROA; CLOUGH, 1998, p. 513, tradução própria).

Por outra via, Abd-El-Khalick, Bell e Lederman (1998, p. 417) desenvolveram um estudo para “delinear os fatores que mediatizam a tradução das concepções de professores, acerca da natureza da ciência, no planejamento instrucional e na prática de sala de aula”. Com isso, problematizam o debate afirmando que, embora o objetivo explícito de ajudar a classe estudantil a desenvolver concepções apropriadas sobre a natureza da ciência, ter sido chancelado na virada do século XIX para o XX, essa meta não foi alcançada.

Por conseguinte, esses autores/as também delinearão alguns princípios, que são considerados as proposições mais aceitáveis sobre a natureza do conhecimento científico (CLOUGH, 2008), a saber: seu caráter experimental e sujeito a mudanças; empírico (baseado e/ou derivado da observação do mundo natural); subjetivo (carregado de pressupostos teóricos); em parte, produto da inferência humana, da imaginação e da criatividade (envolve a invenção da explicação); social e culturalmente incorporado (ABD-EL-KHALICK; BELL; LEDERMAN, 1998). Não obstante, algumas críticas foram lançadas sobre a ideia desses *princípios*. Clough (2008, p. 31) afirma que, apesar existir um nível apropriado de consenso para a educação científica, “qualquer lista de ideias-chave pode ser facilmente distorcida por pesquisadores, professores e alunos”. Por isso, destaca que:

[...] o problema é que os princípios, como conhecimento científico estabelecido, tornam-se algo a ser transmitido, em vez de investigados em uma sala de aula de ciências. Para os alunos, os princípios tornam-se algo para conhecer, em vez de entender. (CLOUGH, 2008, p. 32, tradução própria)

Esse autor considera que dizer que o conhecimento científico é experimental reflete as mudanças no conhecimento científico que ocorrem ao longo da história. Contudo, tal princípio ignora o caráter duradouro do conhecimento científico bem fundamentado (CLOUGH, 2008). Dessa forma, para quem afirma que a ciência é experimental, sem reconhecer esse caráter, dificilmente compreende em profundidade a natureza da ciência e do conhecimento científico. Clough acrescenta que:

Claramente, a maioria, senão todas as declarações sobre a natureza da ciência são contextuais, com importantes exceções. Mesmo onde existe consenso, a chave é explorar a natureza da ciência como questões, de modo que os professores de ciências e os estudantes entendam profundamente a natureza da ciência e sua natureza contextual. (CLOUGH, 2008, p. 33, tradução própria)

Portanto, Clough (2008) acredita na investigação da natureza da ciência por meio de questões, em matéria de conteúdo, no sentido de transformar os princípios em perguntas, para que os estudantes possam confrontar diretamente suas visões ingênuas sobre a natureza da ciência e do conhecimento científico. Esse autor defende que tais questões, ao serem investigadas, ao invés de promovidas como princípios, dariam oportunidades para abordar o contexto, a compreensão conceitual e as diferentes posições filosóficas. Desse modo, evitaria o que Clough (2008, p. 40) considera como três perigos iminentes: “a percepção de que todas as alegações sobre o conhecimento científico podem ser tratadas igualmente”; “que essas

afirmações são retiradas do contexto”; e que, “quando a estrutura e o papel das teorias são simplificados demais, há pouca necessidade de retratar com precisão os processos de mudanças teóricas” (Idem).

Seguindo essa abordagem, Martins André (2015) aprofundou a discussão, em outras dimensões filosóficas e pedagógicas, para apresentar uma proposta curricular, “formato guarda-chuva”, visando trabalhar a natureza da ciência com “temas e questões”, amparadas por dois eixos, o eixo-1: sociológico e histórico e eixo-2: epistemológico (MARTINS André, 2015, p. 718-724).

Para Martins (2015), sua proposta ajuda a superar as críticas direcionadas à visão consensual, pois: os temas e questões não utilizam conhecimentos declarativos ou afirmações curtas sobre a ciência; o conjunto de questões é de caráter investigativo; contempla assuntos ausentes ou negligenciados pela visão consensual; incorpora diálogos entre a ciência e outras formas de conhecimento; aproxima-se de uma prática educativa próxima de outras propostas existente na literatura (IRZIK; NOLA, 2011), por exemplo. Em última análise, esses autores ressaltam que sua “abordagem pode ser considerada uma espécie de inventário que pode funcionar como um *checklist* curricular para rever a completude da temática NdC” (MARTINS André, 2015, p. 726) – NdC é uma expressão para a natureza da ciência, consoante a encontrada em inglês, *Nature of Science*.

Seguindo com as críticas, Irzik e Nola (2011, p. 591) argumentam que, embora exista um consenso de que “os estudantes devem aprender não apenas o conteúdo da ciência e sua natureza, pouco também é o consenso sobre o que é essa natureza”. Uma vez que as tentativas “feitas por filósofos, historiadores, sociólogos da ciência e teóricos da educação científica falharam em definir a ciência rigorosamente, no sentido de fornecer um critério preciso de demarcação” (Idem).

Em razão disso, esses autores declaram que, sobre a natureza da ciência, existem violentas disputas entre orientações realistas, empiristas, construtivistas, feministas, multiculturalistas e pós-modernistas (IRZIK; NOLA, 2011). Além desses problemas, Irzik e Nola (2011, p. 593) consideram que “a visão consensual retrata um quadro muito monolítico da ciência e é cega para as diferenças entre as disciplinas científicas”. Conseqüentemente, esses autores afirmam que “a natureza da ciência aparece como fixa e atemporal, transmitindo uma ideia aos estudantes, de que a ciência não tem história e não há espaço para mudanças em sua natureza” (Idem). Quando, pelo contrário, a história e a filosofia da ciência ensinam que a natureza da ciência muda com o tempo e evolui.

Na contemporaneidade, esse processo pode ser observado tanto pela evolução dos critérios de cientificidade, com a introdução do computador na pesquisa, quanto pelas evidentes transformações disciplinares implicadas na incorporação da matemática, ao longo do tempo, e das novas regras metodológicas adicionadas ao estoque da ciência (IRZIK; NOLA, 2011).

Como alternativa esses autores propõem uma nova concepção denominada de *family resemblance* – *semelhança familiar* – “para a qual não existe uma definição, mas um conjunto de noções relacionadas” (Ibid., p. 594).

Na perspectiva desses autores, a *semelhança familiar* gira em torno da ideia de que os membros de uma família podem se assemelhar uns aos outros somente em alguns aspectos. Em outras palavras, eles tentam observar de que maneira a rede de características pode formar uma família, com base em semelhanças pertencentes às seguintes categorias: *atividades, objetivos e valores, metodologias e regras metodológicas e produtos* (IRZIK; NOLA, 2011).

Para a categoria *atividade*, observar e experimentar são tipicamente atividades da ciência. Já a prática de observar, embora comum a quase todas as áreas, pode ser diferente em cada uma delas (MOURA, 2014). Por exemplo, enquanto as observações astronômicas antigas eram realizadas a olho nu, nos dias atuais, empregam-se telescópios espaciais.

Na categoria *objetivos e valores*, entende-se que as ciências (biologia, física, geologia, química), individualmente, podem ter um propósito diferente, de acordo com as mais variadas interpretações filosóficas realistas, empiristas, construtivistas, feministas, multiculturalistas e pós-modernistas (MOURA, 2014).

Na categoria *metodologias e regras metodológicas*, compreende-se que não é possível fazer ciência sem adotar métodos e regras, “o conhecimento científico não é construído de forma aleatória, todavia, empregam certos parâmetros, alguns comuns a todas as áreas da ciência” (MOURA, 2014, p. 36).

Por fim, na categoria *produtos*, a ciência busca cumprir seus objetivos, a partir de suas metodologias próprias, obtendo como produtos, hipóteses, leis, teorias, modelos, dados experimentais, dentre outros (MOURA, 2014).

Com base nesses parâmetros, Irzik e Nola (2011) argumentam que, em primeiro lugar, diferente da visão consensual, cada uma dessas categorias “é aberta, isto é, as características da ciência que se enquadra em cada categoria não são fixas, portanto, mais categorias podem ser adicionadas” (Ibid., p. 601). Além disso, eles acrescentam que, embora

pensem que “as categorias possam parecer bastante exaustivas, admitem que outras possam ser acrescentadas ou novas possam surgir à medida que a ciência se desenvolve” (Idem).

Para conhecedores da epistemologia contemporânea do físico e filósofo da ciência Larry Laudan, tais categorias podem ser compreendidas, claramente, como um resultado interessante para discutir a natureza da ciência, por meio do *modelo reticular de progresso científico* (LAUDAN, 1984). Uma relação triádica, sem hierarquias, entre objetivo e metas da ciência, metodologias, regras metodológicas e teorias, que pode ser ilustrado metaforicamente pelos vértices de um triângulo equilátero que se ajusta ao longo do tempo, em vista do progresso científico. Esse modelo foi desenvolvido por Laudan em uma de suas obras epistemológicas, *Science and values* (LAUDAN, 1984) – Ciência e valores – tradução livre.

Por outra vertente, Matthews (2012), em seu artigo “*Changing the Focus: From Nature of Science (NOS) to Features of Science*” – Mudando o Foco: de natureza da ciência para características da ciência –, apresentou uma crítica à visão consensual chamando-a de *Programa de Lederman*.

Segundo esse autor, esse *programa* consiste em uma lista composta de alguns elementos, que Lederman et al. (2002) propuseram para caracterizar a natureza da ciência, a saber: a natureza empírica da ciência; os papéis das teorias e leis científicas; a natureza criativa e imaginativa do conhecimento científico; a natureza carregada de teoria do conhecimento científico; a inserção cultural do conhecimento científico; o mito do método científico; a natureza provisória do conhecimento científico (MATTHEWS, 2012).

Na visão Matthews (2012, p. 11), esses elementos “funcionam amplamente no ensino de ciências, como uma lista de verificação” de aspectos sobre a natureza da ciência, que:

[...] aparece nas paredes da sala de aula um pouco como os Sete Mandamentos da NOS; e informa a série extremamente popular do grupo de testes VNOS (Views of Nature of Science) que são usados em dezenas de trabalhos de pesquisa publicados para medir a eficácia do ensino da NOS [...] e graus de compreensão da NOS [...] (MATTHEWS, 2012, p. 11, tradução própria).

Nessa direção, ele considera que o ponto forte dessa lista é que ela coloca a natureza da ciência nas salas de aula e fornece instrumentos para avaliar a aprendizagem sobre essa temática. Por outro lado, o ponto negativo é que ela “pode, apesar dos desejos de seus criadores, funcionar como um mantra, como um catecismo, como mais uma coisa a ser aprendida” (Ibid., p. 11). Quando, pelo contrário, o desejável é que professores e estudantes possam analisar e inferir com suas próprias opiniões os aspectos da natureza da ciência.

Além disso, Matthews (2012, p.11) afirma que a lista geralmente causa um “curto-circuito” em tudo isso e, à medida que o faz, “é diretamente antiética aos próprios objetivos da reflexão e do pensamento crítico que a maioria considera a razão de ser da natureza da ciência no currículo de ciências”.

Por conta disso, esse autor defende que esses elementos devem ser filosoficamente e historicamente refinados e desenvolvidos, para que sejam úteis aos professores e estudantes. Uma vez que possuem consideráveis sutilezas filosóficas e são cercados por longas tradições de debates que não devem ser perdidos de vista.

Segundo Matthews (2012, p.12), se esse for o caso, uma afirmação mais séria a esse respeito é que, em pontos cruciais, “existe uma ambiguidade que mitiga a utilidade da lista como objetivos curriculares, critérios de avaliação e objetivos da ciência e cursos de formação de professores”. Como alternativa, ele também defende uma mudança de foco, isto é, de natureza da ciência para características da ciência, por uma via contextual e heterogênea, que evitaria algumas armadilhas educacionais e filosóficas, associadas à pesquisa sobre essa temática:

Uma mistura confusa de características epistemológicas, sociológicas, psicológicas, éticas, comerciais e filosóficas, numa única lista de natureza da ciência; um privilégio de um lado daquilo que envolve argumentos controversos e muito debatidos sobre a metodologia ou ‘natureza’ da ciência; um pressuposto de soluções particulares do problema da demarcação; e um pressuposto de que a aprendizagem da natureza da ciência pode ser julgada e avaliada pela capacidade dos estudantes de identificar algumas afirmações declarativas sobre a natureza da ciência. (MATTHEWS, 2018, p. 389, tradução própria)

Considerando essa extensa problemática envolvendo a resolução de problemas e a temática da natureza da ciência, na próxima seção, são elencados alguns pressupostos e o delineamento metodológico, que auxiliam a estruturação dos caminhos pertinentes desta investigação, em vista do enfrentamento dos desafios relativos ao ensino de ciências/física.

## 1.2 PRESSUPOSTOS E DELINEAMENTO METODOLÓGICO

Para pensar a presente investigação, pressupõe-se que um dos caminhos mais relevantes para a ressignificação dos conteúdos científicos e das estratégias de ensino, bem como para a promoção do pensamento crítico sobre a natureza da ciência, perpassa por um

*estudo da história conceitual da ciência*, em vista de discutir a solução de seus problemas, isto é, de suas perguntas mais importantes, que fomentaram o pensamento científico ocidental.

Ao atentar-se para esse pressuposto, sua pertinência é logo amparada pela ideia epistemológica de Bachelard, que afirma: “o conhecimento científico é construído por meio das perguntas. Se não há perguntas, não pode haver conhecimento científico. Nada é evidente, nada é gratuito. Tudo é construído” (BACHELARD, 1996, p. 18).

Em conformidade com essa sustentação, a visão epistemológica de Larry Laudan (2011), que vê a ciência, acima de tudo, como uma atividade de solução de problemas, isto é, de perguntas da ciência, o foco do pensamento científico torna-se um aporte fundamental para investigar um extenso recorte temporal da história conceitual da ciência, mediante o estudo de fontes primárias e secundárias de obras fundamentais que marcam a história do pensamento científico ocidental. Com isso, é possível ter como meta principal a possibilidade de fornecer alguns subsídios a essa ressignificação e a promoção do pensamento crítico sobre a natureza da ciência, por essa perspectiva histórico-filosófica.

Substanciando essa possibilidade, o trabalho de Peduzzi e Raicik (2020) apresenta e propõe uma articulação de dezoito proposições comentadas sobre a natureza da ciência com a história da física. Em seus argumentos, “Promover reflexões sobre a natureza da ciência em diferentes níveis de ensino é, e sempre será, um desafio, mas necessário, na medida em que pode contribuir para uma formação mais crítica do aluno” (PEDUZZI; RAICIK, 2020, p. 47).

Nessa direção, o trabalho de Mendonça (2020), com título sugestivo – *De que Conhecimento sobre a Natureza da Ciência Estamos Falando?* –, aponta para a necessidade de inserir os/as estudantes, em diferentes níveis de ensino, no processo de avaliação das práticas científicas, mediante episódios da história da ciência, bem como convidá-los a refletir sobre os processos de justificação e validação dos conhecimentos produzidos pela ciência.

Por esse caminho, a epistemologia de Laudan (2011) apresenta uma taxonomia dos problemas científicos, que permite classificá-los como perguntas da ciência, que o epistemólogo conceitua como problemas empíricos, isto é, perguntas sobre os fenômenos do mundo natural; e como problemas conceituais, de modo geral, perguntas sobre as estruturas teóricas, metodológicas e sobre algum componente da visão de mundo pertencente a cada contexto histórico investigativo.

Para Laudan, a atividade intelectual de solução de problemas é o modo mais básico pelo qual a ciência realiza, precipuamente, seu *progresso científico cognitivo*, isto é, “nada mais nada menos, que um progresso ligado às aspirações intelectuais da ciência” (LAUDAN,

2011, p. 11). O aprofundamento de seus conceitos e pressupostos epistemológicos será realizado no próximo capítulo.

Com efeito, por esse aporte seguro da história e da filosofia da ciência, Infante-Malachias (2008, p. 565) pontuam que “discutir arduamente que perguntas estavam sendo debatidas na comunidade científica, em seus contextos de debates, é a ponte de acesso para as condições materiais históricas, associadas à elaboração das ideias newtonianas”. Por certo, essa relevância recair também sobre muitas outras ideias científicas, que antecedem o contexto das ideias newtonianas. Por exemplo, por meio das perguntas da ciência, é possível acessar os contextos investigativos que marcaram o desenvolvimento conceitual da ciência moderna europeia, desde a Grécia Antiga, como se pretende demonstrar nesta tese (KOESTLER, 1989; KUHN, 1990; ÉVORA, 1993; DESCARTES, 1997; COHEN Bernard; WESTFALL, 2002; HEATH, 2004; KOYRÉ, 2006; BERTRAND, 2008; GINGERICH, 2008; GALILEU, 2011).

Considerando essas potencialidades para a formação de professores/as de física e futuros/as cientistas, este trabalho aposta em um extenso estudo da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, mediante a operacionalização dos conceitos e pressupostos da epistemologia de Larry Laudan. Uma vez que este epistemólogo fornece algumas pistas importantes, em sua principal obra “O Progresso e seus problemas: rumo a uma teoria do crescimento científico”, sobre a história conceitual dessas ciências, no ocidente, desde a Grécia Antiga até o século XVII.

Com isso, é possível delinear um estudo historiográfico sobre a origem e a solução dos problemas empíricos astronômicos, cosmológicos e físicos desde o séc., VI a. C até o séc., XVII da nossa era, que impulsionaram o pensamento científico ocidental na direção da unificação dessas ciências, a partir dos trabalhos de muitos personagens.

Dessa forma, ao se chegar a Newton, particularmente, é possível garantir um desfecho interessante para esse estudo, procurando apontar os passos intelectuais newtonianos na direção da concepção da teoria da gravitação universal. Destaca-se que esse esforço intelectual e coletivo representa uma expressão máxima e concreta de um substantivo crescimento cognitivo da ciência e do pensamento científico ocidental (KOYRÉ, 2002).

É importante ressaltar que esse longo recorte temporal é uma exigência natural do rigor da leitura empregada na compreensão dos conceitos e pressupostos epistemológicos laudanianos. Bem como da própria implicação de suas concepções para o ensino de ciências e

ensino de física, que estão refletidas em uma ampla revisão da literatura, no contexto brasileiro, realizada no âmbito desta investigação (BATISTA; PEDUZZI, 2019).

Além disso, ao fazer um mergulho na história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, situando os contextos investigativos que dão origem aos problemas e às suas soluções, isto é, a concepção intelectual de (conceitos, hipóteses, leis, modelos, princípios, sistemas, teorias, etc.), se aposta também na possibilidade de observar a pertinência epistemológica de alguns *aspectos, características e princípios da natureza da ciência* apresentados pela literatura aqui discutida.

Em conformidade com essa preocupação, no eixo didático-educacional, essa extensa incursão histórica conceitual permite preencher algumas lacunas recorrentes sobre várias distorções alarmantes na abordagem da astronomia, da cosmologia e da física nos livros didáticos do ensino médio, principal instrumento de trabalho docente (MEDEIROS Alexandre; MONTEIRO, 2002). Bem como contextualizar os diversos assuntos/temas, que os documentos oficiais da educação brasileira, especialmente, a vigente Base Nacional Comum Curricular (BRASIL, 2018) referenda como imprescindíveis ao desenvolvimento estudantil de competências e habilidades para interpretar leis, modelos e teorias científicas, a partir do principal objetivo de aprendizagem estabelecido pela necessária compreensão da relação Terra-Universo.

Esses assuntos/temas são: o sistema solar, o planeta Terra, o movimento de rotação terrestre, os fenômenos do dia e a da noite, o movimento de translação dos planetas, as estações do ano, os modelos cosmológicos geocêntricos e heliocêntricos, a confecção de calendários, o relógio solar, as fases da Lua, a esfera celeste, as constelações, as distâncias entre os corpos celestes, a gravidade e as galáxias (BRASIL, 2018).

Em conformidade, Langhi e Nardi (2007) apontam que dentre os diversos erros conceituais encontrados em livros didáticos das séries iniciais, ensino fundamental e ensino médio, encontram-se, justamente: sobre as fases da Lua; os movimentos e inclinação da Terra; a representação de constelações; as dimensões dos astros do sistema solar; os números de satélites e anéis de alguns planetas; os pontos cardeais; a Lua e as estações do ano, bem como envolvendo aspectos de ordens histórico-filosóficas.

Adjacente a essa constatação, Micha (2018) assinala que as concepções de senso comum de professores e estudantes de ciências, especialmente, sobre alguns fenômenos astronômicos, cosmológicos e físicos, são abundantes e persistentes.

Nessa direção, Geneci Medeiros (2005, p. 67) afirma que, dada sua experiência de vinte e cinco anos, como professora do ensino médio de física, “um dos temas de mais difícil compreensão por parte dos estudantes é o da Gravitação Universal”. Essa autora sustenta que esse tema é de extrema importância para a formação dos estudantes, justamente, por envolver “aspectos múltiplos da tomada de consciência cosmológica, entendimento de como se processam historicamente os avanços científicos e a ocorrência de conflitos religiosos e filosóficos” (MEDEIROS Geneci, 2005, p. 67).

Coadunando com essas justificativas, essa investigação procura também tecer um alinhamento entre a visão de ciência de Laudan – eixo epistemológico – e a importância da pergunta no ensino de ciência/física – eixo didático-educacional – que comporta o referencial da taxonomia dos objetivos educacionais de David Bloom (original e revisada,) no domínio cognitivo (MOREIRA, 2011; LÓPEZ; VEIT; ARAUJO, 2014; LIRA, 2015; HUANG; LEDERMAN Norman; CAI, 2017).

Esse alinhamento permitirá fundamentar uma proposta de ensino que preza pelo desenvolvimento do pensamento crítico dos estudantes, ao convidá-los para elaborar, avaliar e responder suas perguntas e de seus pares, mediante o estudo e a discussão de textos científicos informados pela história conceitual e filosofia da ciência (BLOOM et al., 1956; ANDERSON et al., 2001; KRATHWOHL, 2002; FERRAZ; BELHOT, 2010).

A importância da pergunta no contexto didático-educacional – que será aprofundada no terceiro capítulo – é um expediente tão importante que Marco Antônio Moreira, ao ampliar o alcance da teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel, considerou que a percepção crítica dos estudantes, sobre o papel epistêmico da pergunta, é uma das condições fundamentais para que ocorra a aprendizagem significativa crítica (MOREIRA, 2011). Por esse expediente, ele defende que “a pergunta é o principal instrumento intelectual disponível aos seres humanos” (POSTMAN, 1996, p. 173 apud MOREIRA, 2011, p. 79).

Em conformidade, a Taxonomia de Bloom – contemplada também no terceiro capítulo – suporta os processos de aquisição e operacionalização de conhecimentos gerais e específicos pelo aprendiz; o desenvolvimento intelectual por habilidades, competências e atitudes, nos procedimentos padrões e conceituais que estimulam o desenvolvimento intelectual contínuo (FERRAZ; BELHOT, 2010). Ela permite avaliar o pensamento crítico dos estudantes mediante critérios de aprendizagem apoiados em níveis cognitivos, isto é, do simples entendimento/compreensão de um assunto, informação, conteúdo, conceito, tarefa, etc., até o nível de criação e síntese intelectual que o aprendiz é capaz de desenvolver.

Nesse sentido, ela pode ser compreendida como uma estrutura que classifica as declarações dos objetivos ligados ao desenvolvimento cognitivo por aquisição de conhecimento, competência, habilidade e atitudes, pelos estudantes, no processo de instrução (BLOOM et al., 1956; KRATHWOHL, 2002; FERRAZ; BELHOT, 2010).

Portanto, considerando esses pressupostos investigativos e os delineamentos metodológicos apresentados, a seguir, são elencados o problema, o objetivo geral e os objetivos específicos desta tese.

### 1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

*Que contribuições um extenso estudo da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, fundamentado na epistemologia da solução de problemas de Larry Laudan, pode fornecer para o ensino de ciências/física e ao pensamento crítico sobre a natureza da ciência?*

### 1.4 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho acadêmico-científico.

#### 1.4.1 Objetivo Geral

*Investigar possíveis contribuições para o ensino de ciências/física e para o pensamento crítico sobre a natureza da ciência, promovidas por um amplo estudo da história conceitual da astronomia da cosmologia e da física, fundamentado na epistemologia da solução de problema de Laudan.*

#### 1.4.2 Objetivos Específicos

1. Apresentar os principais conceitos e pressupostos epistemológicos laudanianos, que vê a ciência como uma atividade de solução de problemas, juntamente com suas contribuições para o ensino de ciências/física, no contexto brasileiro;

2. Explorar a história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física mediante a operacionalização dos conceitos e pressupostos epistemológicos da solução de problemas de Laudan;
3. Situar a importância da pergunta no ensino de ciências/física, em vista da construção de um alinhamento epistemológico, didático e educacional, que fundamente uma proposta de ensino alternativa à resolução de problemas/exercícios a lápis e papel;
4. Elaborar e propor uma unidade de ensino focada na história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, amparada pela epistemologia da solução de problemas laudanianos, para ser implementada em aulas de graduação de disciplinas abertas à discussão de conteúdos informados pela história conceitual e filosofia da ciência;
5. Estruturar um conjunto de textos didáticos focados na história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, sob a ótica da epistemologia de Laudan, para subsidiar a implementação da unidade de ensino;
6. Discorrer sobre as possíveis contribuições e implicações para o ensino de ciências/física e para o pensamento crítico sobre a natureza da ciência, promovidas por um estudo da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, fundamentado pela epistemologia da solução de problemas de Larry Laudan.

## 2 A CIÊNCIA COMO UMA ATIVIDADE DE SOLUÇÃO DE PROBLEMAS

*Se não há perguntas, não pode haver conhecimento científico. Nada é evidente, Nada é gratuito. Tudo é construído* (BACHELARD, 1996).

O objetivo principal deste capítulo perpassa por: (1) *Apresentar os principais conceitos e pressupostos epistemológicos laudanianos, que vê a ciência como uma atividade de solução de problemas, juntamente com suas contribuições para o ensino de ciências/física, no contexto brasileiro.*

### 2.1 A VISÃO EPISTEMOLÓGICA DE LARRY LAUDAN

O físico e filósofo da ciência Larry Laudan nasceu em 1941, na cidade de Austin, estado do Texas. Laudan se formou em física bacharelado, ano de 1962, e tornou-se Mestre e PhD em Filosofia, a partir do ano de 1965. Além disso, é o fundador do Departamento de História e Filosofia da Ciência da Universidade de Pittsburgh. E, atualmente é pesquisador sênior no Instituto de las Investigaciones Filosóficas da Universidade Autónoma Nacional do México.

Dentre suas diversas obras, traduzidas para o chinês, francês, italiano, japonês, russo, espanhol e português, *Progress and its problems: towards a theory of scientific growth* – “O Progresso e seus Problemas: rumo a uma teoria do crescimento científico” –, publicada em 1977, é considerada a mais importante (DAL MAGRO, 2013). Nessa obra, a visão de ciência de Laudan é parte integrante de um quadro de concepções epistemológicas contemporâneas, originadas nos finais dos anos de 1950 (NICKLES, 2017).

Nesse quadro, encontram-se as visões epistemológicas desenvolvidas pelos chamados *novos historicistas da ciência* (NICKLES, 2017), a saber: Thomas Kuhn (1922-1996), Norwood Russell Hanson (1924-1967), Mary Hesse (1924-2016), Imre Lakatos (1922-1974), Paul Feyerabend (1924-1994), Stephen E. Toulmin (1922-2009), Dudley Shapere (1928-), Ernan McMullin (1924-2011) e Michael Ruse (1940-). Juntamente com esses, existem outros filósofos, historiadores e sociólogos da ciência, que participam de diferentes correntes filosóficas, por exemplo, Ludwig Fleck (1896-1961), Karl Popper (1902-1994), Gaston Bachelard (1884-1962), Mario Bunge (1919-1952), David Bloor (1942-), dentre outros.

Para os *filósofos historicistas*, a alegação principal é que “os relatos positivistas e popperianos da ciência, dominantes até essa época, são mitos sobre como a ciência funciona” (NICKLES, 2017, p. 2). Em razão dessa alegação, vários estudos foram realizados para compreender, em profundidade, as grandes mudanças da ciência e/ou as *revoluções científicas* (KUHN, 2009), em detrimento, por exemplo, da ideia de progresso científico cumulativo e linearizado, defendido pelo historiador Pierre Duhem (1896-1916).

Para alcançar essa meta, foram produzidos diversos modelos epistemológicos dinâmicos para analisar a ciência, cujos focos procuram capturar os padrões dessas grandes mudanças e, ao mesmo tempo, servir como fonte de motivação dos filósofos, historiadores, sociólogos, dentre outros estudiosos da ciência (NICKLES, 2017).

Nesse confronto direto com as ideias *positivistas lógicas*, Laudan (2011, p. 8) afirma que, para visualizar uma nova imagem, “é preciso refazer as perguntas elementares sobre a ciência, para alcançar uma perspectiva um pouco diferente sobre o conhecimento científico e a própria natureza da ciência”. Dessa forma, incluindo a importante filósofa da ciência Mary Hesse, esses epistemólogos “interrogam as relações das ciências, das técnicas e das sociedades de um ponto de vista histórico-crítico. Porque para eles a ciência pensa, com um pensamento que engaja a vida” (JAPIASSU, 1994, p. 177). Por sua vez,

Tais interrogações, por vezes apaixonantes e controversas, abrindo para várias opções, compõem uma verdadeira e oportuna história das ciências escrita de modo coerente e vivo, revestindo-se de uma importância que torna sua leitura preciosa não somente para o especialista, mas para todo aquele que pretende se iniciar na pesquisa e se interrogar sobre a natureza da ciência, seus desafios e seus problemas fundamentais. Ademais, trata-se de uma história que não separa aquilo que a realidade da história unifica: o saber e as culturas. (JAPIASSU, 1994, p. 177).

Em termos gerais, envolvendo contrastes e conformidades com as visões epistemológicas de outros historiadores e filósofos da ciência, especialmente, Popper, Lakatos e Kuhn, Laudan entende que o conhecimento científico é produto do empreendimento racional (MOREIRA; MASSONI, 2011). Para tanto, ele pressupõe que é preciso abrir mão de parte da linguagem e dos conceitos tradicionais, por exemplo, grau de confirmação, conteúdo explicativo, corroboração e afins, para verificar a possibilidade de construir um modelo potencialmente adequado de racionalidade científica. Para Pesa e Ostermann (2002), isso implica em uma tentativa pertinente de salvar a racionalidade da ciência. Posto que esse filósofo admite que a racionalidade científica deve ser analisada a partir das escolhas teóricas progressivas da ciência, isto é, da efetividade das teorias na solução de problemas.

A despeito disso, em sua *teoria historicista da racionalidade* (DAL MAGRO, 2013), Laudan afirma que: o progresso científico não ocorre pela via do acúmulo de conhecimentos; as teorias, como respostas aos problemas científicos, não são refutadas simplesmente por apresentar anomalias – uma classe de problemas que, em dado contexto histórico, pode não ter respostas científicas adequadas; as teorias não são aceitas apenas porque apresentam confirmações empíricas; as mudanças de visão de mundo e as controvérsias científicas são resolvidas conceitualmente, muito mais que empiricamente; os princípios da racionalidade mudam com o tempo; e a coexistência de teorias rivais é uma regra, não exceção, no contexto das tradições de pesquisa (VILLANI, 1992; PESA; OSTERMANN, 2002; MOREIRA; MASSONI, 2011).

De acordo com esses pressupostos, a perspectiva epistemológica de Laudan vê “a ciência é, acima de tudo, como uma atividade de solução de problemas” (LAUDAN, 2011, p. 18). Nesse sentido, sua meta principal é elaborar teorias com alta taxa de eficiência na solução de problemas. Em face disso, progresso científico ocorre à medida que as novas teorias resolvem mais problemas que suas antecessoras (PESA; OSTERMANN, 2002).

Nessa perspectiva racionalista, o progresso da ciência está vinculado estreitamente não com a confirmação ou refutação das teorias, mas, essencialmente, com sua eficiência em resolver problemas (LAUDAN, 2011). Laudan afirma que as teorias são relevantes, cognitivamente importantes, à medida que oferecem soluções adequadas a problemas importantes. Nessa solução de problemas, a função de uma teoria é eliminar ambiguidades, reduzir irregularidades à uniformidade e demonstrar seu potencial para prever os fenômenos na natureza, mediante um confronto dialético entre problemas e teorias adequadas (PESA; OSTERMANN, 2002).

Não obstante, a eliminação das dificuldades conceituais no modelo de solução de problemas laudanianos é tomada como componente substantiva do progresso científico, que se alimenta de um crescente apoio empírico (PESA; OSTERMANN, 2002). Destaca-se que essas dificuldades conceituais foram reconhecidas, por exemplo, tanto por Stephen Toulmin quanto por Kuhn, no prefácio da obra “A estrutura das revoluções científicas” (DAL MAGRO, 2013), porém elas foram pouco exploradas. Laudan afirma que estudiosos como Thomas Kuhn, chegaram ao ponto de fazer da ausência de tais fatores não empíricos um sinal da “maturidade” de qualquer ciência específica.

Por outro lado, o modelo de Laudan é, em boa medida, uma sofisticação à taxonomia de problemas inicialmente proposta por Lakatos (1989). Porém, esse filósofo reconhece

apenas a solução do componente empírico dos problemas científicos (PESA; OSTERMANN, 2002). Dessa forma, a taxonomia de Laudan vai além desse aperfeiçoamento, pois apresenta um novo componente – os problemas conceituais – que se faz substancialmente presente como desafio tanto para o desenvolvimento interno da ciência quanto para seu processo de ensino-aprendizagem, especialmente, no ensino de ciências/física.

Em conformidade com esses breves apontamentos, nas próximas seções serão abordados: a taxonomia de Laudan para os problemas empíricos e os problemas conceituais; o conceito de tradição de pesquisa; e os principais resultados de uma extensa revisão bibliográfica, em oito importantes periódicos nacionais do ensino de ciências e ensino de física, que revelam as contribuições da epistemologia de Laudan para o processo de ensino-aprendizagem *em e sobre a ciência*.

## 2.2 A TAXONOMIA DOS PROBLEMAS CIENTÍFICOS

A palavra taxonomia representa uma métrica de classificação, denominação e organização de um sistema pré-determinado, que resulta num *framework* (quadro) conceitual para discussão, análise e/ou resgate de informação (FERRAZ; BELHOT, 2010).

Não obstante, antes de apresentar a taxonomia de Laudan, é preciso assinalar que ele considera que os problemas *são as perguntas da ciência e/ou o foco do pensamento científico* (LAUDAN, 2011, p. 20). E à medida que “os problemas constituem as perguntas da ciência, as teorias constituem suas respostas” (Idem). Com efeito, a origem desses problemas está inscrita dentro de um *contexto de investigação* marcado por *compromissos metodológicos, ontológicos e teóricos* (científico, filosófico, metafísico, religioso, dentre outros), que os estudiosos possuem em determinado período histórico.

Nesse contexto investigativo historicamente localizado, Laudan classifica e subclassifica os problemas científicos, a partir de dois grandes grupos, os problemas empíricos e os problemas conceituais. Os problemas empíricos se originam de um *fato* acerca do mundo natural que se torna um problema, a partir do momento em que é tratado e reconhecido como tal.

Nesse domínio empírico, os “únicos tipos de *fatoss* que podem ser vistos como problemas são os *fatoss conhecidos*” (Ibid., p. 25). Por exemplo, as estações do ano, o movimento dos corpos celestes, as fases da Lua, os eclipses solares e lunares, a queda dos corpos próximos à superfície da Terra, as distâncias das órbitas planetárias, o brilho aparente

dos planetas, dentre outros. Entretanto, para considerar esses *fatós* como problemas empíricos, é preciso perceber que há um *prêmio para suas soluções*. Laudan afirma que isso não invalida a questão de que “em qualquer momento da história da ciência, muitas coisas serão vistas como fenômenos bem conhecidos, mas não se sentirá a necessidade de explicá-los ou esclarecê-los” (Ibid., p. 25). Por exemplo, o fato de a Lua apresentar sempre a mesma face para a Terra, ou o Sol nascer sempre no leste e se pôr no oeste.

Nessa perspectiva, um problema empírico é “qualquer coisa presente no mundo natural que pareça estranha ou que, de alguma maneira, necessite de explicação” (LAUDAN, 2011, p. 22). Por exemplo, “observamos que os corpos pesados caem na direção do centro da Terra com espantosa regularidade, perguntar como e por que eles caem assim, é apontar um desses problemas” (Idem).

Do mesmo modo, quando se pergunta – *com que rapidez os corpos caem perto da Terra?* – essa indagação supõe considerar a existência de objetos afins a alguma concepção de corpo e de Terra, que se movem uns em comparação aos outros de acordo com alguma regra estável. Observando a forma e suposição dessa pergunta, fica evidente que ela possui referência no mundo dos fenômenos físicos. Com isso, os problemas empíricos são definidos como “problemas de primeira ordem, perguntas substantivas acerca dos objetos que constituem o domínio de determinada ciência” (LAUDAN, 2011, p. 22).

Laudan (2011) subclassifica os problemas empíricos em três tipos: *os problemas empíricos não resolvidos* – perguntas acerca do mundo dos fenômenos físicos que não foram respondidas adequadamente por nenhuma teoria, mas que são responsáveis por fomentar as investigações científicas futuras; *os problemas resolvidos* – são perguntas acerca do mundo dos fenômenos físicos que foram adequadamente respondidas por uma teoria. A solução dessas perguntas conta pontos para a teoria que os resolve, quando em competição com outra teoria rival; *os problemas empíricos anômalos* – são perguntas acerca do mundo dos fenômenos físicos que determinada teoria não resolveu, mas uma ou mais teorias concorrentes, sim. Esses problemas são provas contra uma teoria quando em competição com outra rival.

Nesse sentido, “uma das marcas do progresso científico é a transformação de problemas empíricos anômalos e não resolvidos em problemas resolvidos” (LAUDAN, 2011, p. 26). Por isso, a “qualidade” de “uma teoria está em quantos problemas resolveu e com quantas anomalias se depara” (Idem). Em termos práticos, os problemas não resolvidos estimulam o crescimento e o progresso da ciência. Logo, “transformá-lo em problemas

resolvidos é um dos modos pelos quais as teorias progressistas estabelecem suas credenciais científicas” (Ibid., p. 28).

Já os problemas conceituais, por exclusão, não são empíricos, pois “são apresentados por uma ou outra teoria”; e “são característicos das teorias, e não têm existência independente das teorias que os apresentam” (LAUDAN, 2011, p. 67). Portanto, os problemas conceituais são definidos como “perguntas de ordem superior acerca da fundamentação das estruturas conceituais (por exemplo, das teorias) que foram concebidas para responder as perguntas de primeira ordem” (Ibid., p. 68).

Os problemas conceituais também são subdivididos em duas classes: os *problemas conceituais internos* têm origem “com a descoberta de que uma teoria é incoerente e, portanto, contraditória”, ou “das ambiguidades ou circularidades conceituais dentro da teoria” (LAUDAN, 2011, p. 69); e os *problemas conceituais externos* surgem quando uma teoria (T) “está em conflito com outra teoria ou doutrina (T’), que os defensores da teoria (T) ou da doutrina, acreditam ser bem fundamentada” (Ibid., p. 71). Por isso, “é a existência de “tensão” que constitui um problema conceitual”. Essa *tensão* pode ser compreendida como uma “incoerência ou incompatibilidade lógica, isto é, quando uma teoria é logicamente incompatível em relação à outra, supostamente bem fundamentada” (Ibid., p. 72).

Os *problemas conceituais externos* também são subdivididos em três classes distintas: *as dificuldades intracientíficas* – tensão entre teorias de diferentes áreas do saber; *as dificuldades normativas ou metodológicas* – conflito entre a teoria científica e as teorias metodológicas da comunidade científica; e *as dificuldades acerca da visão de mundo* – choque entre uma teoria e algum componente da visão de mundo predominante.

*As dificuldades intracientíficas* ocorrem “quando uma nova teoria em alguma área científica faz suposições incompatíveis com as de outra teoria científica, que se têm boas razões para ser aceita” (LAUDAN, 2011, p. 80); enquanto as normativas são consideradas como uma fonte de controvérsia importante, ao gerarem muitos problemas conceituais evidenciados pela história da ciência (LAUDAN, 2011).

Nesse cenário, a solução da “tensão” entre uma metodologia e uma teoria científica ou é obtida pela modificação da teoria científica ou pela norma metodológica aceita. Já as dificuldades acerca da visão de mundo são como as dificuldades intracientíficas, porém com uma diferença básica: “a incompatibilidade, ou a falta de reforço mútuo não está dentro do quadro da própria ciência, mas entre a ciência e as nossas crenças ‘extras científicas’”

(LAUDAN, 2011, p. 86), relacionadas com áreas de conhecimento bastante diversas, por exemplo, metafísica, lógica, ética e teologia.

Desses problemas conceituais externos, destaca-se que esta tese utilizará como lente, apenas, o problema das dificuldades acerca da *visão de mundo*, uma vez que ele é o que mais se aplica às mudanças de perspectivas do pensamento científico ocidental, em relação aos modelos cosmológicos, geocêntricos, heliocêntricos, híbridos e de universo infinito, encontradas na história conceitual da astronômica, da cosmologia e da física, no longo período de tempo investigado.

Já os outros dois problemas conceituais externos se aplicam, por exemplo, ao debate entre físicos, geólogos e biólogos do (século do XIX), envolvendo a medida do valor da idade da Terra – *as dificuldades intracientíficas* (TORT; NOGAROL, 2013). E as *dificuldades normativas* se aplicam à mudança da *metodologia indutivista* para a *metodologia hipotético-dedutiva*, ocorrida nos fins do século XVIII, envolvendo a “tradição de pesquisa newtoniana” (LAUDAN, 2011).

Não obstante, Laudan (2011) aponta na história da ciência muitos exemplos que podem ilustrar os problemas conceituais internos. Alguns envolvem as críticas sobre os artifícios matemáticos da astronomia de Ptolomeu (epiciclos, excêntricos e equantes) utilizados para resolver os problemas empíricos ligados ao movimento dos corpos celestes – os quais certamente serão contemplados nesta tese. E outros envolvem as críticas lançadas contra o sistema de mundo newtoniano, por contemporâneos seus (Locke, Berkeley, Huygens e Leibniz), sobre os fundamentos conceituais do espaço absoluto e da interação à distância entre os corpos, utilizados para desenvolver as bases da física clássica (LAUDAN, 2011) – os quais, infelizmente, fogem do alcance deste trabalho, mas podem fazer parte de um foco de investigações futuras.

Nessa direção, uma das metas principais desta tese é identificar na história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física os demais os problemas científicos que possam ser focalizados pelas lentes dos problemas empíricos e problemas conceituais laudanianos, responsáveis pelo desenvolvimento do pensamento científico ocidental, dos babilônios à concepção da teoria da gravitação universal newtoniana. Atrelado a isso, espera-se também lançar luz sobre a natureza contextual dos princípios, aspectos, características da natureza da ciência, a partir de *vínculos epistemológicos* que auxiliem na promoção do pensamento crítico sobre essa temática e sua condição de existir nos currículos do ensino de ciências, em todos os níveis de ensino (MATTHEWS, 2018).

### 2.3 O CONCEITO DE TRADIÇÃO DE PESQUISA

No enquadramento do modelo de crescimento científico baseado na solução de problemas empíricos e problemas conceituais, Laudan postula o conceito de tradição de pesquisa, isto é, “um conjunto de afirmações e/ou negações ontológicas e metodológicas” (LAUDAN, 2011, p. 113). Por sua vez, esse conceito se assemelha com a forma de generalização de Thomas Kuhn, a respeito ideia epistemológica de *paradigma* – elemento primário do modelo de progresso científico kuhniano que, no período de ciência normal, torna-se dominante e imune às possíveis críticas. Além disso, ele também se assemelha à ideia de *programa de pesquisa* de Lakatos (MENDONÇA; VIDEIRA, 2007).

Por esse ângulo, a tradição de pesquisa de Laudan proporciona um conjunto de diretrizes metodológicas, teóricas e ontológicas para o desenvolvimento de teorias específicas. Tais como, a estrutura atômica de Bohr-Kramers-Slater, o efeito fotoelétrico de Einstein, a deriva continental de Wegener, e o complexo de Édipo de Freud. Bem como para teorias globais, da evolução, atômica, cinética dos gases, dentre outras. Parte dessas diretrizes passa a constituir uma ontologia que especifica, de modo geral, os tipos de entidades fundamentais que existem no domínio em que a tradição de pesquisa se insere (GURIDI; SALINAS; VILLANI, 2006).

Em concordância, a função das teorias específicas é explicar todos os problemas empíricos do domínio disciplinar, reduzindo-os à ontologia da tradição. Por sua vez, a tradição tem dois compromissos, um metodológico e ou ontológico. O primeiro perpassa pelo delineamento dos *modus operandi* (técnicos, experimentais, corroboração empírica e avaliação das teorias). Já o segundo está ligado à modelagem do perfil das *entidades epistêmicas* e de suas capacidades de interação dentro desse domínio disciplinar.

Em uma definição mais ampla, Guridi, Salinas e Villani (2006) afirmam que uma tradição de pesquisa laudaniana é uma unidade integral que estimula, define e delimita o que pode ser considerado como solução para muitos dos problemas científicos importantes. Conseqüentemente, do mesmo modo que Lakatos e Kuhn reconhecem a degeneração e evolução dos programas de pesquisa e dos paradigmas, respectivamente, Laudan admite que as tradições de pesquisas devam se submeter a esses elementos constantes da avaliação da ciência. Ele reconhece também dois tipos de atividades geradoras de teorias: *as atividades de investigações progressivas e degenerativas* (PESA; OSTERMANN, 2002).

No que cabe a esta tese, espera-se operacionalizar este conceito de tradição de pesquisa no contexto investigativo grego antigo, como também no contexto europeu medieval e renascentista da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, desde os babilônios até a gravitação universal newtoniana. Em conformidade, um exemplo de operacionalização desse conceito pode ser observado no trabalho de Ostermann, Cavalcanti, Ricci e Prado (2008), no campo de conhecimento da mecânica quântica.

Não obstante, para ampliar um pouco mais a importância das ideias de Laudan, na próxima seção, é apresentada uma síntese sobre as contribuições de suas concepções epistemológicas para o ensino de ciências e ensino de física, produzida por uma ampla revisão de literatura, realizada no contexto desta tese.

#### 2.4 AS CONCEPÇÕES DE LAUDAN NO ENSINO DE CIÊNCIAS E DE FÍSICA

As contribuições das concepções de Laudan para o ensino de ciências e de física foram aferidas por um trabalho de revisão de literatura em oito importantes periódicos acadêmico-científicos brasileiros – *qualis* A e B – publicado recentemente pelo autor desta tese (BATISTA; PEDUZZI, 2019). Essa revisão varreu os periódicos desde a primeira edição até 2017. Por sua vez, esses periódicos foram os que seguem: Alexandria - Revista de Educação em Ciência e Tecnologia (Alexandria – A2); Caderno Brasileiro de Ensino de Física (CBEF – A2); Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF – A1); Ciência & Educação (C&E – A1); Revista Investigação em Ensino de Ciências (IENCI - A2); Revista Ensaio: Ensino, Pesquisa e Educação em Ciências (Ensaio – A2); Revista Experiência em Ensino de Ciências (EENCI – B1) e Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências (RBPEC – A1).

Nesse processo de revisão, utilizou-se como aporte metodológico a análise de conteúdo de Bardin (1997), que permitiu extrair cinco perspectivas de investigação dos trabalhos (cinco) – autores/as citados a seguir – que operacionalizam as concepções de Laudan. Nessa direção, é possível afirmar duas coisas: primeiro, as concepções de Laudan são bastante reconhecidas e valorizadas pela literatura do contexto brasileiro do ensino de ciências e de física e; segundo, é que elas começaram a ser operacionalizadas nas pesquisas, a partir dos finais da década de 1990 (VILLANI et al., 1997; PESA; OSTERMANN, 2002; OVANDO; CUDMANI, 2004; GURIDI; SALINAS; VILLANI, 2006; CORDEIRO; PEDUZZI, 2016).

Extraíndo a essência da operacionalização das concepções de Laudan nesses trabalhos, especificamente, sua epistemologia permitiu investigar cinco temas de interesses relevantes: “(1) os modelos de ensino-aprendizagem (investigação e guia da prática docente); (2) a produção de analogias; (3) as concepções epistemológicas dos estudantes; (4) as implicações para o ensino de ciências; e (5) a exploração de episódios históricos” (BATISTA; PEDUZZI, 2019, p. 46).

Nessa perspectiva, Laudan surge como uma importante referência epistemológica para o campo da história e filosofia da ciência contemporânea (GURIDI; SALINAS; VILLANI, 2006). Justamente por auxiliar na fundamentação filosófica dos trabalhos de pesquisa no campo educacional científico (MORTIMER, 1996; VILLANI, 1992), principalmente, na problematização do modelo de mudança conceitual; na compreensão das concepções dos alunos, de um ponto de vista epistemológico menos ingênuo (PESA; OSTERMANN, 2002); e no desenvolvimento de modelos de referência para a prática docente em nível superior (OVANDO; CUDMANI, 2004).

No que se trata, por exemplo, da problematização do modelo de aprendizagem por mudança conceitual, os/as pesquisadores/as perceberam que o processo de ensino-aprendizagem, em ciências e física, é muito mais complexo do que o encarado tradicionalmente. Nessa tradição, acreditava-se que os estudantes poderiam aprender por um processo revolucionário fundamentado na mudança de paradigma kuhniano (GURIDI; SALINAS; VILLANI, 2006). Contudo, devido aos diversos fracassos educacionais no ensino de ciências, a comunidade constatou, pelo aporte da história e da filosofia da ciência, que até mesmo as revoluções científicas só podem acontecer por um processo longo e controverso. Portanto, não é possível pensar que os/as estudantes, após uma instrução didática, possam abandonar suas concepções epistemológicas, como um “passo de mágico”. Nesse sentido, a aprendizagem depende de diversos fatores (afetivo, cognitivo, atitudinal, dentre outros) pertencentes e circundantes ao contexto do sistema didático, relação professor-saber-estudante, e da situação didática (CHEVALLARD, 1991; BROUSSEAU, 2008).

Por conseguinte, Pesa e Ostermann (2002), preocupadas em favorecer as explicações do processo de aprendizagem por mudança conceitual, teceram contrapontos entre as epistemologias de Laudan, Lakatos e Kuhn. Nessa tessitura, mostraram que, em comparação, as concepções de Laudan sobre o progresso científico, a racionalidade da ciência (fundamentada na escolha de teorias progressivas), a objetividade e os valores cognitivos da ciência contribuem para refletir criticamente sobre o ensino de ciências.

Não obstante, no que diz respeito ao modelo reticulado do progresso científico laudiano (teoria, metodologia, metas e valores), para a solução de problemas empíricos e problemas conceituais, Ovando e Cudmani (2004) consideraram-no como aporte importante para integrar os componentes conceituais, procedimentais e atitudinais presentes no processo educativo.

Nessa mesma direção, Guridi, Salinas e Villani (2006) também consideraram conveniente tratar as concepções de senso comum dos estudantes sobre conteúdos científicos, como concepções epistemológicas, justamente devido à complexidade dessa temática. Esses/as autores/as argumenta que seus estudos revelam, por exemplo, que os/as estudantes da educação básica (ensino médio) não alcançam de imediato uma compreensão apropriada sobre a natureza da ciência, mesmo com instruções didáticas bem estruturadas.

Para efeito de clarificar tal complexidade, Guridi, Salinas e Villani (2006) apresentam um exemplo de contradição presente na ideia de um estudante que acredita no *realismo ingênuo* (verdade absoluta do conhecimento científico) e no *empirismo* (todo conhecimento parte da observação), mas, ao mesmo tempo, admite que o conhecimento científico seja imperfeito e produzido coletivamente.

Pelo aspecto epistemológico dessa contradição estudantil, é interessante situar a analogia produzida por Villani et al. (1997), mediante uma metáfora construída à luz da história e filosofia da ciência, a partir das ideias de Laudan, a saber: *progresso na aprendizagem estudantil equivalente ao progresso científico*.

Desse modo, enquanto o progresso científico laudiano é fruto de um longo prazo e alcance que ocorre pelas mudanças das tradições de pesquisa, tendo como unidade básica a solução dos problemas. A mudança conceitual na aprendizagem estudantil envolve cinco elementos: conceitos primitivos – ação, movimento, causa –, ideias explicativas – qualidades intrínsecas –, métodos de trabalho – generalizações rápidas e intuitivas –, finalidades e valores – soluções locais e práticas (VILLANI et al., 1997).

Para Villani et al. (1997), essa analogia permite compreender o significado da mudança conceitual, como um progresso que ultrapassa a simples ideia da mudança de conceitos. E isso, por sua vez, exige o monitoramento contínuo do processo de planejamento de atividades específicas, para alcançar o progresso pela mudança de todos os aspectos ligados à relação professor-saber-aluno. Portanto, esta tese acredita que:

Por conseguinte, pode-se afirmar que a importância das concepções de Laudan para esse propósito reside na necessidade de operacionalizar propostas didáticas em sala de aula, que enfatizem o conteúdo da história da ciência e permitam aos estudantes uma imersão no significado da ciência como uma atividade intelectual de solução de problemas. Nessa direção, os estudantes podem ser levados a compreender que os conhecimentos científicos, frente ao senso comum, são frutos desse processo e, objetivamente, podem instrumentalizá-los de forma substantiva, em situações dentro e fora da escola, que dependam do poder de negociação, comunicação e autonomia, para um progresso estudantil e profissional individual e coletivo. (BATISTA; PEDUZZI, 2019, p. 48).

Em conformidade com essa crença acadêmico-científica, em recente editorial, dedicado à formação de professores de ciências da natureza, Castiblanco (2019) considera que a promoção do pensamento crítico é um objetivo singular da educação, para responder aos problemas e exigências sociais ligados às necessidades de profissionais mais críticos e reflexivos.

De acordo com esse editorial, “eventos de natureza política e acadêmica no mundo, indicam que as sociedades não constroem critérios sólidos para a tomada de decisões e, portanto, acabam vítimas das decisões que tomam” (Ibid., p. 5). Isso acontece tanto por interesses particulares, medos, crenças sem fundamentos, lutas de poder, moda, quanto por falta de consciência de suas decisões como sociedade ou como indivíduos social e acadêmico (CASTIBLANCO, 2019).

Seguindo essa discussão, a necessidade formativa de professores críticos e reflexivos de ciências incide também na importância social dos docentes transmitirem essa criticidade e capacidade de reflexão aos seus estudantes, em sala de aula. Para tanto, Castiblanco observa que:

É necessário aumentar os esforços para projetar e executar estratégias que permitam que os professores sejam cada vez mais identificados com sua profissão, conscientes de seu papel na sociedade, como motores de transformação social, superando a formação de professores que transmitem conteúdo sem pensar. (CASTIBLANCO, 2019, p. 5, tradução própria).

Dessa forma, na mesma direção em que Matheus (2018) assinala para os desafios da razão de existir dos conhecimentos metacientíficos nos currículos escolares de ciências, como promotores do pensamento crítico *em e sobre a ciência*. Castiblanco (2019) aponta que alcançar uma formação docente crítica e reflexiva não é tarefa fácil. Pois os trabalhos na academia são desenvolvidos de modo muito diferente, isto é, “aponta mais para a doutrinação em ciências e é pouco relacionado ao comportamento social dos alunos” (Ibid., p. 5). Em face disso, essa autora acredita que as características que denotam um pensamento crítico e

reflexivo são pouco desenvolvidas nas salas de aula das universidades. Por essas características, considera-se que:

Ter um pensamento crítico e reflexivo é ter a capacidade de raciocinar para tomar decisões sobre o que fazer, o que acreditar, quando duvidar, como responder perguntas, como propor novas ideias, em geral, como entender o lugar de alguém em relação ao de outros. (CASTIBLANCO, 2019, p. 5, tradução própria).

Para essa autora, a principal ausência desses dois objetos intelectuais nas salas de aula da academia, por correspondência, nas salas de aula da educação básica, está associada, por um lado, “às metodologias instaladas pela tradição pedagógica, quando nem era possível considerar o desenvolvimento do pensamento crítico” (Ibid., p. 6). E, por outro lado, “porque não basta o professor querer ser crítico e reflexivo, sem incorporar isso em suas práticas diárias” (Idem). Assim como não é possível ensinar “a ser crítico e reflexivo sem ser, nem é possível desenvolver processos de ensino do pensamento crítico sem uma intencionalidade e metodologia especialmente projetadas e obtidas a partir de pesquisas na própria ação do ensino” (Idem). Em face disso, ratifica-se a importância das concepções da Laudan para ensino de ciências e ensino de física.

Nesse sentido, é importante destacar que sua leitura epistemológica da ciência, como uma atividade de solução de problemas, permite que uma exploração histórico-filosófica do desenvolvimento conceitual de episódios históricos possibilita os/as estudantes, em qualquer nível de ensino: aprender a questionar verdades absolutas; construir argumentos próprios *em e sobre a ciência*; discutir pontos de vistas de maneira fundamentada; analisar as relações de poder na construção e difusão da ciência; duvidar das autoridades; enxergar a ciência a partir de novas perspectivas e; por fim, debater criticamente sobre a natureza da ciência que estudam e, muitas vezes, eleger como profissão.

Para Castiblanco (2019, p. 6), se forem realizadas essas tarefas em sala de aula, “estamos desenvolvendo um pensamento crítico e reflexivo, caso contrário, é necessário aprofundar o que isso significa e o impacto que deve ter sobre os indivíduos (incluindo o professor) e as sociedades”. Atento a essa necessidade, o próximo capítulo desta tese é reservado a situar, no campo didático e educacional, a importância da pergunta dos/as estudantes e professores/as, como principal instrumento intelectual, capaz de fomentar esse espírito crítico e reflexivo tão almejado pelos ideais da educação científica e tecnológica, nessa era da ciência, da tecnologia e da informação.

### 3 A IMPORTÂNCIA DA PERGUNTA NO ENSINO DE CIÊNCIAS E DE FÍSICA

*Encorajar o pensamento crítico e criativo estudantil no ensino de ciência e de física é uma tarefa educacional de imprescindível valor, que deve ser realizada pelos trabalhos de pesquisa que colocam a pergunta no centro de suas atenções.*  
(AUTORIA PRÓPRIA)

O principal objetivo deste capítulo é: (2) *Situar a importância da pergunta no ensino de ciências/física, em vista da construção de um alinhamento epistemológico, didático e educacional, que fundamente uma proposta de ensino alternativa para o campo investigativo da resolução de problemas.*

Por sua vez, essa importância se materializa no papel epistêmico fundamental da pergunta tanto no processo de construção do conhecimento científico quanto para um ensino-aprendizagem crítico e flexivo *em e sobre a ciência*, que perpassa pelo desenvolvimento cognitivo estudantil, materializado na necessidade da promoção do pensamento crítico, como apontado por (CASTIBLANCO, 2019).

Nessa perspectiva, esse desenvolvimento cognitivo, âmbito didático, resguardando-se as distâncias e proporções epistemológicas, pode se alinhar com o desenvolvimento cognitivo científico laudiano, imbricado pelo conceito de progresso científico, isto é, “um progresso ligado às aspirações intelectuais da ciência” (LAUDAN, 2011, p. 11). Aproximação esta, que se encontra nas metáforas construídas por (VILLANI et al., 1997), em particular, a que estabelece a analogia entre *o progresso na aprendizagem estudantil equivalente ao progresso científico*. Por conseguinte, destaca-se que essas aspirações fazem parte de uma dinâmica motivacional interna da ciência, que, como uma das mais notáveis atividades intelectuais humanas, mobiliza a solução de problemas, no contexto das tradições de pesquisa.

Com efeito, considerando esses problemas são as perguntas da ciência e, ao mesmo tempo, o foco do pensamento científico, que se movimento por conceitos, é substantiva a ideia de que “todas as investigações científicas começam com uma pergunta” (LEDERMAN Judith et a., 2014, p. 68), que é “um dos elementos básicos e fundamentais da investigação científica” (HUANG, LEDERMAN Norman; CAI, 2017, p. 964). Por tanto, “se não há perguntas, não pode haver conhecimento científico” (BACHELARD, 1996, p. 18).

Do mesmo modo, isso deve valer substantivamente para o âmbito das *situações didáticas*, nas quais os/as estudantes devem ser convidados a viver a profícua experiência de

pensar criticamente e serem criativos, frente aos conteúdos educacionais, por meio de suas perguntas (FREIRE Paulo; FAGUNDES, 1985).

Nesse vislumbre de *aproximação epistêmica* da pergunta para o âmbito didático-educacional, o desenvolvimento cognitivo estudantil é compreendido como um processo de sucessivas mudanças qualitativas e quantitativas, que ocorrem na estrutura cognitiva dos sujeitos, mediante a construção de conhecimento (PIAGET, 2007). A estrutura cognitiva é definida como um constructo hipotético de conhecimentos organizados na mente do sujeito, que pode ser compreendida pela metáfora da mente como um conjunto de cômputos (MOREIRA, 2011).

Em conformidade, dentre muitas teorias de aprendizagem que compartilham dessa perspectiva, Moreira (2011) afirma que a conceitualização constitui o núcleo desse desenvolvimento cognitivo no ensino-aprendizagem *em e sobre ciências*. Com efeito, nas aprendizagens conceituais, procedimentais e atitudinais, o desenvolvimento de habilidades cognitivas (como pensar criticamente ou criativamente, dentre outros) e a construção de significados são vistos como a própria manifestação desse desenvolvimento cognitivo estudantil.

Dessa forma, a importância da pergunta no âmbito didático-educacional é um elemento fundamental para o ensino-aprendizagem em todas as áreas disciplinares. Por exemplo, na perspectiva da aprendizagem significativa crítica, as perguntas são instrumentos de percepção, posto que ela “é o principal instrumento intelectual disponível para os seres humanos” (POSTMAN, 1996, p. 173 *apud* MOREIRA, 2011, p. 79).

Em virtude disso, os/as estudantes, quando aprendem significativamente, percebem a importância da pergunta para a construção de seus conhecimentos. Assim, “a investigação de perguntas autênticas geradas a partir de experiências estudantis, torna-se uma estratégia central para o ensino de ciências” (VAN ZEE et al., 2001, p. 160).

Nesse contexto, é preciso levar em consideração, especialmente, o que se segue: que “a natureza de uma pergunta (forma e suas suposições) determina a natureza da resposta” (MOREIRA, 2011, p. 79); na mesma proporção, as experiências estudantis não podem ser qualquer uma, mas as que “estimulam o questionamento ao invés de dar respostas prontas” (MOREIRA, 2011, p. 174); e encorajar o pensamento crítico e criativo estudantil no ensino de ciência e de física, torna-se uma tarefa de muito valor educacional, que deve ser realizada pelos trabalhos didáticos, que colocam a pergunta no centro de suas atenções (CORDEIRO; PEDUZZI, 2016; HUANG; LEDERMAN Norman; CAI, 2017).

Para continuar sustentando essas afirmações, nas próximas seções procura-se abordar: a longevidade histórica da pergunta no contexto didático-educacional; o aporte teórico educacional conhecido como *Taxonomia de Bloom* (original e revisada), que emerge naturalmente e sustenta essa perspectiva do desenvolvimento cognitivo estudantil; alguns trabalhos sobre as perguntas de professores que se orientam pela Taxonomia de Bloom; e alguns trabalhos sobre as perguntas de estudantes em diferentes situações didáticas e, especialmente, a partir da leitura de textos científicos.

É importante destacar o seguinte, a abordagem desse aporte teórico conceitual atende tanto à preocupação com a proposta de ensino nos seus respectivos fundamentos epistemológico, didático e educacional, quanto responde naturalmente a sua escolha, como aporte teórico educacional, para guiar a avaliação dos estudantes com a implementação dessa proposta em sala de aula.

### 3.1 A LONGEVIDADE DA PERGUNTA NO CONTEXTO EDUCACIONAL

No contexto educacional, a pergunta desfruta de uma importância e longevidade histórica bastante venerável. Isso porque, assim como a ciência ocidental descendente dos gregos antigos, o uso pergunta como instrumento intelectual de ensino-aprendizagem parece derivar da estratégia do filósofo grego Sócrates (390-470 a. C.). Essa estratégia, conhecida como *maiêutica socrática*, é caracterizada pelo uso de perguntas e respostas submetidas às leis da dialética (DILLON, 1982; BERNADOWSKI, 2006; GOTTSCHALK, 2010).

De acordo com a literatura, Sócrates fazia uso da *maiêutica* para “desafiar suposições, expor contradições e levar a novos conhecimentos e entendimentos” os seus discípulos, escravos e adversários (BERNADOWSKI, 2006, p. 8). Em face disso, “a maiêutica socrática ocupa até hoje um lugar incontestável na reflexão filosófica sobre métodos de ensino” (GOTTSCHALK, 2010, p. 66).

Em um dos diálogos de Platão, conhecido como *Mênon*, Sócrates dialoga com um escravo, que nunca havia aprendido geometria antes. Nesse diálogo, guiado por perguntas, Sócrates conduz o escravo paulatinamente até este deduzir o famoso *teorema de Pitágoras* (GOTTSCHALK, 2010). Para exemplificar a situação,

Sócrates inicia desenhando um quadrado no chão, perguntando em seguida ao escravo qual seria o tamanho do lado de um quadrado cuja área fosse o dobro do quadrado inicial. Sempre partindo das respostas convictas do escravo, Sócrates vai

levando-o a reformulá-las, introduzindo novas figuras, até que, já no final do intenso interrogatório, o escravo vê desenhado por Sócrates um quadrado que satisfaz as condições do problema matemático. O lado desta última figura tem como medida a hipotenusa do triângulo retângulo contido no quadrado inicial, configurando-se, assim, uma das possíveis demonstrações geométricas do conhecido teorema de Pitágoras. (GOTTSCHALK, 2010, p. 67, tradução própria).

Apesar de distante temporalmente desse contexto grego, a influência da *maiêutica socrática* pode ser observada, no contexto didático-educacional, a partir dos finais do século XIX, especialmente, no que ficou conhecido como manuais de Fitch, ou da *Arte da Pergunta* (STEVENS, 1912). Segundo esse manual, o sujeito “está a meio caminho do conhecimento de uma coisa, quando pode colocar uma pergunta sensata sobre ela” (FITCH, 1880, p. 190 apud GILMORE; MCKINNEY, 1986, p. 226). Disso decorre que todo professor ou professora sempre deve encorajar seus estudantes a fazer perguntas.

Seguindo essa longevidade histórica, no início do século XX, anos de 1910, tinha-se como um *adágio* ou uma *máxima* favorita da didática que “saber perguntar é saber ensinar” (DILLON, 1982, p. 152). Em face disso, ainda no início dos anos 1900, já se contavam com quase meio século de pesquisas empíricas sobre técnicas de questionamento (DILLON, 1982; GILMORE; MCKINNEY, 1986). Por exemplo, o estudo de Steven (1912, p. 1) procurou “transformar o holofote da pesquisa, em algumas tendências significativas no ensino”, bem como “sugerir oportunidades de trabalho construtivo, no negligenciado campo da formação e supervisão de professores” (Idem).

Conquanto, nos primeiros cinquenta anos do século XX, as pesquisas se concentraram em descrever e avaliar o uso da pergunta por uma abordagem predominantemente quantitativa. Em outras palavras, privilegiavam-se os aspectos descritivos e explicativos da prática docente, sem preocupações teóricas de analisar as perguntas conceitualmente (DILLON, 1982; WILEN; CLEGG, 1986). Por exemplo, o estudo empírico, de caráter descritivo (STEVEN, 1912), revelava que os professores ou professoras, do início do século XX, dedicavam 64% do tempo da aula fazendo perguntas que exigiam de seus estudantes apenas o uso simples da memória. Além disso, 80% do tempo de instrução eram dedicados a fazer perguntas de todas as formas.

Avançado em pesquisas que permaneceram com essa abordagem, para além desse período, um estudo com professores portugueses de física, educação básica, mostrou que os docentes faziam uma pergunta aos estudantes a cada setenta e dois segundos. Porém, 38%

dessas perguntas, além de não serem respondidas, exigiam apenas o resgate de conhecimentos memorizados (HARGIE, 1983).

Em outros estudos, constatou-se, respectivamente, que: os/as professores/as faziam, em média, de trinta a cento e vinte perguntas por hora (GRAESSER; PERSON, 1994) ou até mesmo, cerca de trezentas a quatrocentas perguntas em um dia típico de aula (MENEZES, 1995); a taxa de perguntas se correlaciona negativamente com o conhecimento sobre o conteúdo; e mais recente, em conformidade com o estudo de Steven (1912), o perfil da maior parte das perguntas nas aulas de ciências ainda é apenas de caráter informativo (PECHT; RIBEIRO; RAMOS, 2017), por exemplo, encontra-se, nesse estudo, perguntas do tipo: “como se chama a passagem do estado sólido para o gasoso?” (Ibid., p. 233).

Contudo, pela falta de contribuição dessas pesquisas para a inferência de resultados efetivos de ensino-aprendizagem, especialmente, em termos de desenvolvimento cognitivo estudantil e promoção do pensamento crítico, ainda nos anos de 1950, os pesquisadores desenvolveram aportes teóricos, como a *Taxonomia de Bloom*, para analisar conceitualmente as perguntas, em detrimento da abordagem descritiva quantitativa. Em face disso, antes de apresentar tais pesquisas, é preciso abordar os principais aspectos desse aporte educacional.

### 3.2 A TAXONOMIA DOS OBJETIVOS EDUCACIONAIS DE BLOOM

A palavra taxonomia representa uma métrica de classificação, denominação e organização de um sistema pré-determinado, tendo como resultante um *framework* (quadro) conceitual para discussão, análise e/ou resgate de informação (FERRAZ; BELHOT, 2010).

Em conformidade, como um dos pesquisadores que trabalhou na formulação original e revisada da Taxonomia de Bloom, Krathwohl (2002) afirma que, em 1948, a *Associação Norte Americana de Psicologia (American Psychological Association)* solicitou para alguns membros, que montassem uma “força tarefa”, a fim de discutir e criar uma taxonomia dos objetivos de processos educacionais. A ideia por trás dessa força tarefa centrava-se em auxiliar o planejamento didático-pedagógico em três eixos estruturantes do domínio da aprendizagem: o cognitivo, o psicomotor e o afetivo, que atualmente são denominados de *conhecimento, habilidades e atitudes* (FERRAZ; BELHOT, 2010; AGUIAR; SIMONI, 2016).

Como um dos integrantes dessa “força tarefa”, Krathwohl (2002) afirma que Benjamin S. Bloom (1913-1999), então, Diretor Associado do Conselho de Exames da

Universidade de Chicago, iniciou a ideia, esperando reduzir o trabalho de preparação de exames anuais abrangentes. Para Bloom (1944), dentre os problemas relacionados a essa necessidade, o maior deles era a incorporação das avaliações como parte integral de todo processo de aprendizagem. Assim como, era preciso também clarificar os métodos de avaliação da aprendizagem, que estavam além da compreensão dos próprios professores. Em outras palavras, não existiam objetivos educacionais claros para avaliar a aprendizagem.

Nesse sentido, “um dos primeiros problemas levantados pelo grupo foi se os objetivos educacionais poderiam ou não ser classificados” (BLOOM et al., 1956, p. 5). A meta do grupo, então, “[...] era tentar classificar fenômenos que não poderiam ser observados ou manipulados na mesma forma concreta que os fenômenos de campos, como as ciências físicas e biológicas, onde as taxonomias [...] já tinham sido desenvolvidas” (BLOOM et al., 1956, p. 5).

No campo educativo, o grupo acreditava que os objetivos educacionais declarados na forma comportamental, por ter suas contrapartidas no comportamento dos indivíduos, poderiam ser observados, descritos e classificados. Em face disso, Bloom liderou um grupo de especialistas americanos em avaliação (Max D. Engelhart, Edward J. Furst, Walker H. Hill e David R. Krathwohl), a fim de desenvolver, entre 1949 a 1956, o trabalho publicado sob o título: *Taxonomy of Educational Objectives: The Classification of Educational Objectives. Manual I: Cognitive Domain* (BLOOM et al., 1956)<sup>3</sup> – em português, “Taxonomia dos Objetivos Educacionais: A Classificação dos Objetivos Educacionais. Manual I: Domínio Cognitivo”.

De acordo com Ferraz e Belhot (2010), esse domínio cognitivo pode ser caracterizado pelos processos de aquisição e domínio de conhecimentos gerais e específicos pelo aprendiz; desenvolvimento intelectual e de habilidades e atitudes; reconhecimento de fatos específicos, de procedimentos padrões e de conceitos que estimulam o desenvolvimento intelectual contínuo. Nessa perspectiva, a *Taxonomia de Bloom* pode ser compreendida como uma estrutura que classifica as declarações dos objetivos ligados ao desenvolvimento cognitivo (aquisição de conhecimento, competência/habilidade e atitudes) alcançado pelos/as estudantes, após o processo de instrução (BLOOM et al., 1956; KRATHWOHL, 2002; FERRAZ; BELHOT, 2010;). Por sua vez, essa taxonomia foi concebida para ser mais do que

---

<sup>3</sup> Segundo Krathwohl (2002), a Taxonomia dos Objetivos Educacionais: Manual II, O Domínio Afetivo, foi publicado posteriormente em 1964. Todavia, uma taxonomia para o domínio psicomotor nunca foi publicada pelo grupo de origem, mas por outros.

uma ferramenta de avaliação (KRATHWOHL, 2002), podendo ser compreendida também como:

Uma linguagem comum sobre metas de aprendizagem para facilitar a comunicação entre pessoas, assuntos e níveis de ensino; meios para determinar a congruência de objetivos educacionais, atividades e avaliações em uma unidade, curso ou currículo; base para um determinado curso ou currículo, em termos de significado específico de metas educacionais amplas, como aquelas encontradas nos padrões nacionais de avaliação. (KRATHWOHL, 2002, p. 212, tradução própria).

Essa compreensão extensiva da taxonomia de Bloom traduziu-se na oferta de uma base de desenvolvimento de métricas de avaliação e estímulo do desempenho dos/as estudantes em qualquer nível de aprendizagem. Em outras palavras, ela traduziu-se, também, em uma base para estimular os/as educadores/as, de forma estruturada e consciente, a auxiliar os/as estudantes no desenvolvimento de competências para dominar habilidades mais simples, conhecimentos factuais e evoluir para o domínio de habilidades mais complexas, conhecimentos conceituais (FERRAZ; BELHOT, 2010).

Por conseguinte, sabe-se que Bloom e seus colaboradores descobriram que, nas mesmas condições de ensino, desconsiderando variáveis externas, “todos os/as alunos/as aprendiam, mas se diferenciavam em relação ao nível de profundidade e abstração do conhecimento adquirido” (FERRAZ; BELHOT, 2010, p. 423). Com isso, percebeu-se que era possível, então, entender essa diferença, a partir das estratégias de ensino, como uma forma de “organização dos processos de aprendizagem, para estimular o desenvolvimento cognitivo” (Ibid., p. 423). Com efeito, a taxonomia original de Bloom forneceu definições cuidadosas desenvolvidas para cada uma das seis categorias gerais e principais do domínio cognitivo: *conhecimento, compreensão, aplicação, análise, síntese e avaliação*.

Em face disso, a **categoria conhecimento** contempla: os conhecimentos de especificidades, terminologia, de fatos específicos, de formas e meios de lidar com detalhes específicos, das convenções, de tendências e sequências, de classificações e categorias, dos critérios, da metodologia, de universais e abstrações em um campo, de princípios e generalizações, de teorias e de estruturas teóricas (KRATHWOHL, 2002). A **categoria compreensão** comporta: tradução, interpretação e extrapolação. A **categoria aplicação**: de princípios abstratos e/ou teóricos em situações concretas e/ou práticas. A **categoria análise**: análise de elementos, relações e de princípios organizacionais. A **categoria síntese**: produção de uma comunicação única, produção de um plano ou conjunto de operações propostas e derivação de um conjunto de relações abstratas. Por fim, a **categoria avaliação**: avaliação

mediante evidência interna e julgamentos a partir de critérios externos (KRATHWOHL, 2002). Nessa direção, a ordenação das categorias foi pensada para contemplar desde o simples ao complexo e desde o concreto ao abstrato. Com isso, o domínio de cada categoria pode ser visto como um pré-requisito para o próximo nível de desenvolvimento cognitivo (KRATHWOHL, 2002).

Quarenta anos mais tarde, devido aos avanços psicopedagógicos proporcionados pela incorporação de novos conceitos e teorias no campo educacional, um novo grupo (liderado por David H. Krathwohl) fez uma revisão dos pressupostos teóricos da *Taxonomia de Bloom* original. Com essa revisão, publicaram o trabalho: *A taxonomy for learning, teaching and assessing: a revision of Bloom's taxonomy for educational objectives* (ANDERSON et al., 2001) – “Uma taxonomia para aprender, ensinar e avaliar: uma revisão da taxonomia de Bloom para objetivos educacionais”.

Em relação à taxonomia original, a revisada resolveu alguns problemas relacionados à visão rígida e hierárquica das passagens de um nível cognitivo para outro, bem como, estabeleceu uma melhor relação entre o substantivo (aspectos do conteúdo), base da categoria conhecimento (o que aprender), e a ação verbal (o que fazer), base para a dimensão do processo cognitivo (KRATHWOHL, 2002). Em outras palavras, os objetivos que descreviam os resultados de aprendizagem como resultados da instrução, em geral, foram formulados em função de dois termos: o *conteúdo do assunto* e a *descrição* do que deveria ser realizado com esse conteúdo. Assim, as declarações dos objetivos passaram a consistir em um *substantivo* ou frase nominal – o conteúdo do assunto – e um verbo ou ação verbal – o processo cognitivo (KRATHWOHL, 2002).

Tomando como exemplo as declarações: o/a estudante deve ser capaz de lembrar as exigências de Copérnico, para a reforma da astronomia em seu tempo/ ou o/a estudante deve ser capaz de lembrar as leis de Kepler; ou, ainda, o/a estudante deve ser capaz de lembrar as leis de Newton. As frases nominais representadas pelos substantivos (exigências de Copérnico, leis de Kepler, leis de Newton) são objetivos esperados de aprendizagem, enquanto o verbo lembrar remete ao processo cognitivo.

Outro ponto importante foi que, na categoria *conhecimento*, incluiu-se mais uma subcategoria, denominada *conhecimento metacognitivo* – conhecimento sobre a cognição. Com essa inclusão, os/as professores/as puderam transmitir aos seus estudantes a importância de trabalhar atividades metacognitivas e usarem esse conhecimento para se adaptarem às

maneiras de pensar e operar as atividades propostas, por exemplo, de leitura, interpretação de texto e elaboração de perguntas (KOCH; ECKSTEIN, 1991).

De acordo com Anderson et al. (2001), a subcategoria *metacognição* tornou-se de fundamental importância na área educacional, pois garantiu uma possibilidade de autoaprendizagem relacionada à autonomia e ao papel ativo dos estudantes, bem como permitiu instaurar um processo consciente e passível de avaliação. Por exemplo, a inclusão desse conceito abriu espaço para que os/as estudantes possam transitar livremente pelas subcategorias, com o objetivo de melhorar sua aprendizagem de maneira não hierarquizada, como na concepção da taxonomia anterior.

Outra mudança fundamental foi ampliar a categoria conhecimento, discriminando mais algumas subcategorias, por exemplo: 1. *Conhecimento factual* – os elementos básicos que os/as alunos/as devem conhecer para se familiarizar com uma disciplina e resolver os problemas/tarefas propostos como atividades; 2. *Conhecimento da terminologia* – conhecer detalhes e elementos específicos; 3. *Conhecimento conceitual* – conhecer as inter-relações entre os elementos básicos dentro de uma estrutura maior, pelo funcionamento em conjunto. Por exemplo, conhecer classificações e categorias, estruturas, generalizações, modelos, princípios, sistemas e teorias; 4. *Conhecimento processual* – Como fazer algo, mobilizando métodos de investigação e critérios para o uso de habilidades, algoritmos e técnicas; 5. *Conhecimento metacognitivo* – ter consciência da própria cognição, isto é, possuir conhecimento estratégico sobre tarefas cognitivas, incluindo conhecimento contextual e condicional apropriado (ANDERSON et al., 2001; KRATHWOHL, 2002).

Na conjuntura dessas modificações, ao separar conceitualmente a categoria conhecimento do processo cognitivo, Anderson et al. (2001) renomearam as categorias da taxonomia original com verbos. A categoria *conhecimento* foi substituída pelo verbo *conhecer*, a categoria *compreensão* pelo verbo *entender*, as categorias *aplicação*, *análise*, *síntese* e *avaliação* foram modificadas e substituídas pelos verbos *aplicar*, *analisar*, *sintetizar*, *avaliar* e *criar* (ANDERSON et al., 2001; KRATHWOHL, 2002). Por sua vez, nessa direção, as categorias *síntese* e *avaliação* trocaram de lugar na taxonomia revisada, pois se considerou que os pensamentos criativos e críticos dos/as estudantes podiam apresentar o mesmo grau de importância. Justamente, porque o fato de se tornar crítico, pela categoria *avaliação*, pode anteceder o tornar-se criativo pela categoria *síntese* (AGUIAR; SIMONI, 2016).

Com essas modificações, a *Taxonomia de Bloom*, revisada, possibilitou a interpolação das categorias do processo cognitivo, considerando sempre que determinados

conteúdos fossem facilmente assimilados, mediante estímulos pertencentes a uma categoria mais complexa (ANDERSON et al., 2001; KRATHWOHL, 2002). Por exemplo, pode ser mais fácil um estudante compreender as leis de Newton com aplicações, para só depois ser capaz de explicá-las do ponto de vista conceitual.

Para concluir, Krathwohl (2002) afirma que, na época do seu desenvolvimento, o termo taxonomia era pouco familiar aos educadores; por isso, potenciais usuários não entenderam de imediato seu significado, conseqüentemente, pouca atenção foi dada a esse aporte teórico educacional. Porém, à medida que os leitores viram seu potencial, ele tornou-se amplamente conhecido e citado, resultando na tradução para vinte e dois idiomas.

No contexto brasileiro, Ferraz e Belhot (2010) afirmam que, embora a *Taxonomia de Bloom*, original e revisada, seja um instrumento desenvolvido no contexto do ensino superior, poucos educadores têm conhecimento ou fazem uso dela como aporte conceitual para avaliação da aprendizagem estudantil. Em face disso, é importante apresentar, a seguir, alguns trabalhos que analisaram conceitualmente as perguntas dos/as professores/as, mediante a Taxonomia de Bloom.

### 3.3 ANÁLISE DAS PERGUNTAS DE PROFESSORAS E PROFESSORES

A partir do surgimento de aportes teóricos com a *Taxonomia de Bloom*, os estudos, principalmente, entre as décadas de 1970 e 1980, passaram a interpretar conceitualmente o nível cognitivo das perguntas dos professores, tendo como parâmetro o impacto no desempenho dos estudantes (WILEN; CLEGG, 1986). Após esse período, a emergência de demandas globais incidentes sobre a educação, como processo de industrialização, competição tecnológica e globalização impulsionaram novos desdobramentos das pesquisas. Com isso, os estudos sobre as perguntas voltam-se centralmente para os estudantes, porém a partir de diferentes aportes teóricos.

Todavia, exemplos de classificação conceitual das perguntas de professores, tendo como parâmetro o desempenho dos estudantes, foram dados pelos estudos de Gall (1970, 1987), Gall et al. (1984), que conceituaram as perguntas em baixo e alto nível cognitivo. As perguntas de baixo nível cognitivo foram classificadas como perguntas que exigem dos/as estudantes apenas recordações de conhecimentos memorizados (categoria lembrar). As perguntas de alto nível foram classificadas como perguntas que exigem tanto o envolvimento estudantil de pensar criticamente, de forma independente, quanto o uso de conhecimentos

para avaliar e resolver situações-problemas (GALL, 1970) – categorias *aplicar, analisar, avaliar e sintetizar*. Para esses dois níveis de perguntas, Gall (1970, 1984) identificou que aproximadamente 60% das perguntas dos/as professores/as exigiam recordações de fatos; 20% eram de alto nível cognitivo e 20% eram de natureza processual.

Como reflexo dessa nova preocupação, uma lista de inferências sobre as perguntas de professores/as e o desempenho dos/as estudantes foi sistematizada por Wilen e Clegg (1986), dentre as quais se destacam as que estão associadas ao alto nível cognitivo. Contudo, antes de apresentá-las, vale dizer que a expressão “professores eficazes”, que aparece nas inferências, é reflexa de uma tradição de pesquisa, denominada *processo-produto*, que marcou as investigações acerca da observação da prática de professores/as em sala de aula (GAUTHIER et al., 1998). Porém, neste trabalho, é importante deixar claro que seu significado é pretensamente destituído, visto que não se comunga do *modelo de racionalidade técnica*<sup>4</sup> que formava e forma, até hoje, muitos profissionais.

Uma das inferências diz que: *Professores eficazes pedem com alta frequência questões de baixo nível cognitivo para estudantes em contextos de ensino fundamental*. Ela revela que tais perguntas exigem dos estudantes pouco esforço de pensamento, mas possuem efeitos positivos com estudantes das séries primárias da educação básica em atividades de leitura e aritmética (WILEN; CLEGG, 1986). Mas com estudantes de ensino médio, não ocorre o mesmo. Somente perguntas de alto nível cognitivo parecem surtir efeitos, quando se trata de realizar essas mesmas atividades de leitura e aritmética. Para estudantes do ensino superior, esse dado com estudantes de ensino médio pode ser facilmente estendido.

A segunda inferência diz que: *Professores eficazes fazem perguntas de alto nível cognitivo*. Essas perguntas fazem com que os/as estudantes se envolvam em pensamentos convergentes e divergentes (WILEN; CLEGG, 1986). As perguntas de alto nível cognitivo convergente exigem que os/as estudantes organizem o material mentalmente e apliquem a informação na solução da tarefa, revelando suas compreensões e o nível de pensamento em que estão imersos (WILEN; CLEGG, 1986). As perguntas de alto nível cognitivo divergente exigem que os/as estudantes pensem criticamente sobre a informação e executem os níveis de pensamento envolvendo habilidades de compreensão, análise, avaliação e síntese sobre o conteúdo estudado (WILEN; CLEGG, 1986).

---

<sup>4</sup> [...] A racionalidade técnica, que caracteriza as nossas Universidades como centros superiores de formação, [...] Trata-se de um modelo de racionalidade que repousa sobre o perfil do profissional como técnico-especialista que aplica com rigor as regras derivadas do conhecimento científico. (MONTERO, 2001e, p. 147).

Os estudos, a esse respeito, fornecem evidências de que fazer perguntas de alto nível cognitivo divergente e convergente auxilia o desenvolvimento cognitivo estudantil, pois mobiliza o pensamento crítico necessário para a realização de tarefas, cujos esforços vão além do uso simples da memória.

A terceira inferência diz que: *Professores eficazes permitem 3-5 segundos de tempo de espera depois de fazer uma pergunta antes de solicitar uma resposta, particularmente quando perguntas de alto nível cognitivo são feitas.* O uso desse tempo de espera estimula o pensamento e é benéfico durante as discussões. Quando o tempo de espera aumenta de três para cinco segundos, os/as estudantes tendem a fornecer respostas longas e com mais confiança. Além disso, tendem a fazer mais perguntas do que só respondê-las, bem como aumentam a frequência de respostas de alto nível cognitivo (WILEN; CLEGG, 1986).

Por fim, a quarta e última inferência diz que: *Professores eficazes sondam as respostas dos/as estudantes para esclarecimento, apoio de um ponto de vista, ou para estimular o pensamento.* Os/as professores/as que conduzem discussões, em que o pensamento de alto nível cognitivo é encorajado, ajudam os/as estudantes a esclarecerem e apoiarem suas respostas iniciais (WILEN; CLEGG, 1986). Nessa direção, a seguir, apresentam-se, finalmente, os direcionamentos das pesquisas para a análise das perguntas feitas pelos/as estudantes como parte dessa mudança de abordagem investigativa.

### 3.4 AS PERGUNTAS DAS E DOS ESTUDANTES NO FOCO DAS PESQUISAS

Com as demandas globais incidentes sobre a educação para o século XXI, os estudos sobre a pergunta, no contexto didático-educacional, se voltaram para os/as estudantes. Ao mesmo tempo, grandes desafios foram pontuados pelos pesquisadores (as), por exemplo: desenvolver estratégias de questionamento que promovam o desenvolvimento de pensamento estudantil de alto nível cognitivo; a necessidade de respostas criativas às novas situações de ensino, que promovem discussões em salas de aula, dirigidas pelos próprios estudantes (DILLON, 1982; GILMORE; MCKINNEY, 1986; WILEN; CLEGG, 1986).

Além desses desafios, um maior e mais importante encontra-se na superação da tradição educacional manifestada pelo “discurso de autoridade pedagógica” como um inibidor das perguntas dos/as estudantes, especialmente, em sala de aula da educação básica (FREIRE Paulo; FAGUNDES, 1985).

De acordo o livro – *Por uma pedagogia da Pergunta* – (FREIRE Paulo; FAGUNDES, 1985), submetidos a essa tradição e discurso, os/as estudantes, durante a formação e dependendo do campo de conhecimento, desenvolvem um sentimento de que fazer perguntas torna-se socialmente inapropriado, uma vez que as relações didáticas assimétricas estabelecidas entre professor-estudante são condicionantes para que as perguntas sejam vistas como uma ameaça a essa autoridade pedagógica.

No caso do ensino de ciências, afirma-se que o discurso de autoridade, desde o início da aula, está direcionado para o controle do/a professor/a “sobre os sentidos das enunciações em circulação, tendo em vista a afirmação de modos adequados e inadequados de interpretar um dado texto” (PAULA; CASTRO, 2010, p. 435). Isso implica dizer que, muitas vezes, como um mal necessário,

O professor, no contexto de um discurso de autoridade, tende a reelaborar as ideias dos estudantes, a checar seu entendimento acerca dos temas do discurso e a contrastar esse entendimento com modos canônicos de interpretação dos conceitos, modelos e teorias das ciências. (PAULA; CASTRO, 2010, p. 435).

No entanto, quando esse controle é feito de modo exacerbado, pouca oportunidade é dada aos estudantes fazerem perguntas. Dillon (1982a, 1982b) coloca que, quando o principal questionador (professor ou professora) se serve desse direito de falar novamente após a resposta do/a estudante e, tipicamente, usa desse direito para colocar uma pergunta adicional, faz pouco sentido para os/as estudantes fazerem perguntas. Dessa forma, como um consequente infortúnio,

O entendimento adicional é contribuído por perspectivas lógicas e psicológicas. Por exemplo, algumas perguntas de sala de aula são inválidas (truque ou perguntas difíceis) e a maioria não é "genuína" ou "questionável". Muitas vezes se baseiam em informações conhecidas e ensinadas, ou servem para expor entre colegas a ignorância e a confusão do questionador. (DILLON, 1982, p. 159-160, tradução própria).

Em outras palavras, os/as estudantes, muitas vezes, deixam de fazer perguntas para não transparecer que são os únicos a não entender o assunto da aula. Como reflexo, submetem-se a desempenhar um papel passivo e reativo na aprendizagem, promovendo apenas a dependência e removendo o senso de responsabilidade ou iniciativa de um esforço cognitivo para fazer perguntas (FREIRE Paulo; FAGUNDES, 1985).

Contudo, como indicativo positivo de superação desses desafios, no ensino de ciências da educação básica e do ensino superior, as pesquisas, em sua maioria estrangeira, mas recentemente, algumas nacionais, vão se debruçar nas perguntas dos/as estudantes. Tais estudos vão revelar, por exemplo, que as perguntas geradas pelos estudantes são um elemento importante no processo de ensino-aprendizagem e de avaliação (CHIN, 2007; CHIN; OSBORNE, 2008; LÓPEZ; VEIT; ARAUJO, 2014; HUANG; LEDERMAN Norman; CAI, 2017).

Em relação à aprendizagem (CHIN, 2007; CHIN; OSBORNE, 2008; 2010; LÓPEZ, VEIT; ARAUJO, 2014), as perguntas dos estudantes fornecem informações de diagnósticos sobre os processos de pensamento e ajudam a aumentar a motivação e os interesses pelos conteúdos estudados.

Em conformidade, afirma-se que centralizar o foco nas perguntas dos/as estudantes é uma forma de fomentar a discussão e o debate no discurso em sala de aula, para incentivar a construção de conhecimento, além de provocar uma reflexão crítica sobre as práticas em sala de aula (CHIN, 2007).

Nessa direção, López, Veit e Araújo (2014, p. 117) constataram um importante “progresso significativo da habilidade dos estudantes em formular perguntas de interesse sobre a dinâmica newtoniana como campo de conhecimento”. Por esse estudo, tal resultado foi compreendido como uma forma de aprendizagem significativa crítica (MOREIRA, 2011).

Por outro lado, Huang, Norman Lederman e Cai (2017) apontam que diversas estratégias foram desenvolvidas para fomentar as perguntas dos estudantes. Dentre elas, envolvê-los com perguntas que começam com “e se” para ajudar os/as estudantes a prever cenários, explorar possibilidades, considerar alternativas, testar relacionamentos e prever resultados.

Da mesma forma, com perguntas que começam com “por que”, para estimulá-los a considerar relações de causa e efeito. Para essas autoras, esses tipos de perguntas exigem dos estudantes pensamentos mais profundos do que de simples recordações da memória. Por fim, em relação à avaliação, percebe-se que as perguntas dos/as estudantes ajudam-nos a monitorar e auto avaliar suas compreensões, mediante a mobilização do pensamento de alto nível cognitivo.

Nessa direção, vale abordar, a seguir, alguns trabalhos que focam nas perguntas dos estudantes, elaboradas mediante a leitura de textos científicos, a fim de substanciar a proposta de ensino alternativa para o campo da resolução de problemas, em sala de aula.

### 3.4.1 As Perguntas das e dos Estudantes a Partir da Leitura de Textos Científicos

No ensino superior, alguns estudos vão investigar as perguntas elaboradas por estudantes, a partir da leitura de textos científicos (KOCH; ECKSTEIN, 1991; PAULA; CASTRO, 2010; QUADRO; SILVA Dayse; SILVA Fernando, 2011; FERREIRA Luciana; QUEIROZ, 2012). Dada a importância para esta tese, destacam-se alguns aspectos relevantes que serão tomados como referência. Destaca-se que, como o estudo de Koch e Eckstein (1991) é uma base para a discussão de outros trabalhos (PAULA; CASTRO, 2010; QUADRO, SILVA Dayse; SILVA Fernando, 2011; FERREIRA Luciana; QUEIROZ, 2012), ele será abordado com um pouco mais de profundidade.

Nessa direção, Koch e Eckstein (1991) tiveram como motivação as dificuldades de compreensão da leitura de textos de física, por parte de estudantes de graduação em física, e a necessidade de superá-la. Esses textos (enunciados contendo assuntos de mecânica clássica) variam desde um parágrafo até duas páginas. Nesse sentido, esses autores buscaram identificar tais dificuldades, para desenvolver uma *Estratégia de Formulação de Perguntas*, para fomentar a conscientização dos/as estudantes sobre suas dificuldades, possibilitando utilizá-la como uma técnica de auto monitoramento, para melhorar a compreensão da leitura.

Nesse contexto, duas dificuldades foram identificadas<sup>5</sup>. Na primeira parte, está o *método pergunta-resposta*, em que os/as estudantes são solicitados a produzir um resumo do texto não com dados e fatos, mas por um conjunto de perguntas sobre o texto. A ideia é que formulem perguntas muito claras e não triviais o quanto possível.

Para isso, os/as estudantes são instruídos/as a escrever suas perguntas em uma tabela de três colunas. **Primeira coluna** – perguntas cujas respostas estão no texto e os estudantes acreditam poder listar na coluna. **Segunda coluna** – perguntas cujas respostas estão no texto, mas os estudantes não entendem. **Terceira coluna** – perguntas que estão relacionadas ao texto, mas não são discutidas no próprio texto. Para completar esse método, os/as estudantes são instruídos a escrever as possíveis respostas da coluna um, em uma folha separada.

Koch e Eckstein (1991) argumentam que a tarefa dos/as estudantes atendem algumas finalidades importantes, por exemplo, ao separar as perguntas nas colunas (um, dois e três), os/as estudantes aprendem a distinguir o que entendem do que não entendem do texto.

---

<sup>5</sup> Para identificar essas dificuldades, Koch e Eckstein (1991) entrevistaram vinte oito estudantes de graduação em Física, que, após a leitura de um pequeno texto de física, eram indagados com três perguntas: Você entendeu o texto? Sobre o que é o texto? Você poderia fazer perguntas sobre afirmações que não compreende?

Ao separar as perguntas nas colunas um e dois, das perguntas da coluna três, aprendem a distinguir o que é declarado no texto, em relação ao que não é declarado e, com isso, exercitam a meta compreensão. Da mesma forma, ao separar as perguntas da coluna dois das perguntas da coluna três, aprendem a identificar a causa da falta de conhecimento e, com isso, exercitam a metacognição.

Para justificar sua proposta, Koch e Eckstein (1991) tecem sobre algumas considerações importantes. A primeira delas diz respeito ao *papel ativo dos estudantes como fundamental para a construção do conhecimento*. Esse papel condiciona o envolvimento estudantil por uma *pré-disposição para aprender*, por vontade própria, exigindo, com isso, a *divisão de responsabilidade* necessária à aprendizagem.

Vale destacar que tanto a predisposição quanto a divisão de responsabilidades são condições importantes, respectivamente, da teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel e da teoria das situações didáticas de Guy Brousseau, como um dos elementos fundamentais do contrato-didático (MOREIRA, 2011; BATISTA; SIQUEIRA, 2019).

Não obstante, Koch e Eckstein (1991) consideram que o *método pergunta-resposta* oferece aos estudantes o papel ativo de formular suas próprias perguntas. Com efeito, o problema da compreensão de leitura é transferido da responsabilidade docente para a responsabilidade discente. Em outras palavras, os/as estudantes tornam-se monitores ativos de seu próprio estado de compreensão de leitura.

A segunda consideração perpassa sobre *o uso da leitura de forma independente*, que, posteriormente, os/as estudantes inevitavelmente devem se deparar como futuros profissionais. A terceira, e a quarta considerações constituem as *instruções para a formulação das perguntas*, que servem de auxílio para que os/as estudantes, excessivamente pessimistas, possam encontrar instruções para formular suas perguntas, cujas respostas são conhecidas (instrução da coluna um). Assim, os/as estudantes podem aumentar a confiança e diminuir o pessimismo atribuído à *ilusão do não saber* (KOCH; ECKSTEIN, 1991).

Da mesma forma, para os/as estudantes excessivamente otimistas, as instruções, além de permitir encontrar perguntas, cujas respostas não conhecem (instrução da coluna dois e três), percebem que não entenderam tudo do texto e que alguns tópicos não são discutidos no texto. Com isso, podem diminuir um pouco a confiança atribuída à *ilusão do saber* (KOCH; ECKSTEIN, 1991).

A quinta consideração é o *estímulo à curiosidade*. Esse elemento permite que os/as estudantes percebam que as perguntas das colunas (dois e três) permanecem abertas e, por um

ato de curiosidade própria, podem buscar informações e respostas com os pares, professor ou professora e/ou outras fontes externas (KOCH; ECKSTEIN, 1991). A sexta é sobre o *aprimoramento da fluência* que ocorre mediante a formulação de tantas perguntas quanto possíveis. Por fim, a sétima consiste no *desenvolvimento da criatividade*, que pode ser impulsionado à medida que os/as estudantes tornam familiar o desconhecido, isto é, informações que não entendem no texto e, por isso, necessitam formular perguntas claras para obter respostas desejáveis (KOCH; ECKSTEIN, 1991).

Na segunda parte, está o *método feedback por pares*, que é marcado pela condução dos estudantes de um diálogo sobre trechos do texto. Ele funciona como uma estratégia de auto monitoramento externo que permite que os estudantes se conscientizem da qualidade de suas perguntas, uma vez que, geralmente, para compreenderem o que leem, os estudantes inventam explicações que se encaixam em sua própria lógica. Daí, a necessidade de um monitor externo (pares) para controlar suas explicações. Nesse método, os estudantes são estimulados a se revezar na leitura das perguntas que formularam previamente a partir do texto. Eles respondem às perguntas enquanto o professor atua como moderador. Segundo Koch e Eckstein (1991), os *feedbacks* dos colegas ajudam os estudantes a esclarecerem perguntas confusas e, com isso, aumentar suas compreensões do texto.

Uma forma de avaliação do professor para essas perguntas é baseada em dois parâmetros simples: a clareza das perguntas e o interesse que as perguntas despertam nos estudantes no momento dos diálogos. Enquanto a clareza corresponde ao entendimento dos estudantes acerca das perguntas formuladas, o interesse corresponde à quantidade de estudantes que participam das discussões fomentadas pelas perguntas. Por sua vez, esses dois parâmetros de avaliação são explicitados para os estudantes antes de realizarem a atividade. Para Koch e Eckstein (1991), isso permite que eles sejam desafiados e estimulados a fazer perguntas claras e interessantes para seus pares e que sirvam ao bom debate em sala de aula.

Em uma direção semelhante ao estudo anterior (QUADRO; SILVA Dayse; SILVA Fernando, 2011) investigaram a compreensão da leitura de texto de divulgação científica (história da descoberta de algumas substâncias químicas e suas aplicações), por meio da elaboração de perguntas de estudantes de licenciatura em química. Para esse estudo, as perguntas dos estudantes são como um espelho refletor do entendimento do texto lido. Daí a necessidade de mensurar a qualidade desse entendimento a partir dessa “imagem” produzida.

Esses autores fazem uso da estratégia de Koch e Eckstein (1991), especificamente o *método de pergunta-resposta*, e desenvolvem atividades de leitura, solicitando a elaboração

de perguntas. Com isso, lançam mão de um instrumento analítico de classificação de perguntas. Tal instrumento permite classificar as perguntas com os seguintes parâmetros: (A) fenômenos – perguntas que dizem respeito a fenômenos naturais; (B) processos – perguntas que dizem respeito a aspectos da produção do conhecimento científico; (C) metalinguagem – perguntas que se referem a termos ou a significados de conceitos; (D) Matemática – perguntas que se referem à linguagem Matemática<sup>6</sup>. Para as perguntas do tipo (A), esses autores descobriram que a maioria dos estudantes elaborava perguntas, cujas respostas se encontravam no texto de forma satisfatória. Todavia, tal resultado pode ser explicado em decorrência de uma prática bem conhecida dos estudantes. Isto é, trabalhar com atividade de leitura com textos de livros didáticos, que, ao final, apresentam perguntas a serem respondidas pelo leitor. Nesse sentido, a expressividade desse tipo de pergunta não representou um desafio para os estudantes de licenciatura, pois faziam parte do seu contexto escolar (QUADRO; SILVA Dayse; SILVA Fernando, 2011).

Outro ponto foi que tais perguntas não exigiam muita reflexão para a resposta, mas pelo contrário, exigiam um nível muito elementar de compreensão do texto. Já quanto às perguntas do tipo (B), essas autoras descobriram que a maioria dos/as estudantes elaborava perguntas que extrapolavam os limites do texto, tendo de ser classificadas na categoria do tipo (C). Mesmo assim, tais perguntas revelavam uma confusão entre entendimento e extrapolação, mostrando que as perguntas do tipo B, por exigir certo grau de habilidade cognitiva, causavam essa dificuldade. Para as perguntas do tipo (C), os estudantes elaboravam perguntas que extrapolavam o texto, mas estavam relacionadas ao assunto nele tratado.

Visando identificar o tipo de extrapolação, os autores classificaram as perguntas a partir dos seguintes parâmetros de conteúdo, de vivência, epistemológico e ideológico. As perguntas classificadas como de conteúdo utilizam-se de informações do texto e solicitam respostas a partir de informações fora do texto, mas que podem auxiliar o entendimento do conteúdo de química. As perguntas de vivência relacionam-se com informações do texto com aspectos conhecidos das experiências cotidianas. As perguntas classificadas como epistemológicas, apesar de envolver o conteúdo, estão relacionadas mais diretamente com a história da ciência e, indiretamente, com o conteúdo de química, ensinados por eles na educação básica.

---

<sup>6</sup> Essa última categoria não foi identificada na análise das perguntas elaborada pelos estudantes (QUADRO; SILVA Dayse; SILVA Fernando, 2011).

Por fim, as perguntas classificadas como ideológicas exigem respostas de posicionamento ou ponto de vista acerca de situações presenciadas no dia a dia dos estudantes. Para as perguntas classificadas como epistemológicas, Quadro, Dayse Silva e Fernando Silva (2011) apresentam um único exemplo, mas que é visto como importante, uma vez que remete a um dos focos desta tese. A pergunta está como segue:

Baseado na leitura do texto, você concorda com a afirmação de que a Química nasceu como uma Ciência indutivo-dedutiva, passando a ser uma Ciência experimental, construída através de tentativa/erro? Justifique. (QUADRO; SILVA DAYSE; SILVA FERNANDO, 2011, p. 52).

Claramente, tal pergunta demonstra por parte do/a estudante que a elaborou, uma vontade de discutir aspectos da natureza da ciência fomentados pela leitura do texto, apesar de ter sido apenas essa única pergunta disponibilizada pelas pesquisadoras. Contudo, em face de seus achados, Quadro, Dayse Silva e Fernando Silva (2011) argumentam que os/as futuros/as professores/as de química apresentam maior facilidade em elaborar perguntas, cujas respostas podem ser copiadas do texto (perguntas do tipo (A) – fenômenos), revelando tanto uma reprodução de práticas vivenciadas quanto uma visão simplista sobre o processo de ensino-aprendizagem.

A predominância de perguntas do tipo (A), em relação às dos tipos (B e C), ao funcionar como reforço do processo de memorização, refletindo-se como perguntas de baixo nível cognitivo, “não garantiam a formação de opinião e o desenvolvimento intelectual dos respondentes” (QUADRO; SILVA Dayse; SILVA Fernando, 2011, p. 54). Por esse motivo, a formulação de perguntas “pode ser uma atividade desafiadora no trabalho docente” (Idem), uma vez que o ato de elaborar boas perguntas exige “considerável conhecimento do conteúdo e das concepções prévias dos estudantes, [...], sobre os fenômenos aos quais determinados conceitos estão ligados” (Idem).

Usando o mesmo referencial analítico desses autores, Luciana Ferreira e Queiroz (2012) investigaram as perguntas elaboradas por estudantes de graduação do bacharelado em química, a partir da leitura de textos de divulgação científica, capítulos de livro (Tio Tungstênio: Memórias de uma Infância Química), tentando identificar, nessas perguntas, um possível deslocamento do discurso pedagógico autoritário para um mais dialógico.

Sem adentrar nessa discussão teórica, é pertinente apresentar as perguntas, a seguir, elaboradas para uma categoria, associada aos aspectos da produção do conhecimento científico, como formulação de hipóteses, trabalho e vida de um cientista e contexto

sociocultural da época (FERREIRA Luciana; QUEIROZ, 2012). Essa categoria, por sua vez, tem uma relação muito próxima com a categoria epistemológica desenvolvida por (QUADRO, SILVA Dayse; SILVA Fernando, 2011).

1. Quem foi Humphry Davy? Qual a importância dele na Química?
2. Quem foi Dana? E Cannizzaro?
3. Quem foram Fagin e Svengali?
4. Qual a história de Jacó?
5. Quem foi Lecoq?
6. Quais são as importâncias da descoberta do urânio na construção da tabela periódica?
7. De que forma Lavoisier, Proust e Dalton contribuíram para a elucidação da tabela periódica?
8. A tabela periódica foi aceita por todos os cientistas?
9. A tabela periódica criada por Mendeleev foi aceita no mesmo ano de sua criação?
10. Qual o tempo demandado desde a ideia inicial de Mendeleev até a sua aceitação perante a comunidade científica, posto descrédito desta aos conceitos inovadores?
11. Moseley não foi questionado sobre a carga nuclear?
12. Houve muitas modificações na tabela periódica depois de Mendeleev?
13. Por que houve a conferência de Karlsruhe?
14. Quais foram os assuntos discutidos na conferência Karlsruhe?
15. A elaboração de Mendeleev decorreu das estipulações firmadas a partir da Conferência mencionada no texto ou sofreu apenas algumas modificações após esta? (FERREIRA LUCIANA; QUEIROZ, 2012, p. 147-157).

Segundo Luciana Ferreira e Queiroz (2012), as perguntas (13 a 15), por exemplo, correspondem a um contexto cultural mais amplo da produção de conhecimento pela ciência, podendo configurar-se como perguntas enquadradas por uma *abordagem externalista da ciência* (KUHN, 2011), uma vez que evidenciam o papel das instituições científicas e suas influências sobre a produção do conhecimento científico.

Com efeito, as perguntas de 1 a 15 podem ser divididas em: perguntas que evocam o interesse na vida dos cientistas e personagens presentes nos textos científicos (número de 1 a 6); perguntas que evocam o interesse sobre a importância das descobertas científicas em seu contexto sociocultural (número 6 e 7); perguntas que evocam o interesse em discutir a complexidade na escolha, aceitação ou rejeição de ideias e teorias (8 a 10); fatores envolvidos e o fato de que as teorias científicas nunca estão completamente concluídas (perguntas do número 11 e 12); perguntas que despertam a curiosidade sobre a comunidade científica e os acontecimentos científicos da época (13 a 15). Portanto, chama-se a atenção da importância desses aspectos como saberes metacientíficos, imprescindíveis ao desenvolvimento do pensamento crítico dos/as estudantes. Portanto, a maior parte dos capítulos desta tese será desenvolvida para alcançar o terceiro objetivo específico: (3) *Explorar a história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física mediante a operacionalização dos conceitos e pressupostos epistemológicos da solução de problemas de Laudan.*

## 4 O NASCIMENTO DA TRADIÇÃO DE PESQUISA GREGA ANTIGA – TPGA

Observando a meta do terceiro objetivo específico desta tese, pontuado no último parágrafo do capítulo 3, neste procura-se alcançar algumas metas importantes: (1) localizar a fonte de origem dos *atos científicos* – isto é, os dados astronômicos herdados pelos gregos a partir da civilização babilônica – dados esses que se tornaram nos problemas empíricos astronômicos e cosmológicos, no contexto investigativo da tradição de pesquisa grega antiga; (2) especificar os tipos de compromissos metodológicos e ontológicos, que alicerçaram o nascimento dessa tradição, na história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física ocidental europeia, por assim dizer, desde o século VI a. C; (3) situar a formalização desses problemas no contexto da cosmologia de Platão, que foi o responsável por prescrever a pergunta mais fundamental para o desenvolvimento da astronomia matemática praticada por mais de dois mil anos, até Kepler; e (4) construir possíveis *vínculos epistemológicos* entre os *aspectos, características, princípios da natureza da ciência*, apresentados na literatura, e o conteúdo da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, explorado pela narrativa historiográfica da solução de problemas de Laudan. E com isso, poder contribuir com a promoção do pensamento crítico sobre essa temática no currículo e no ensino de ciências/física.

### 4.1 OS FATOS CELESTES NO CONTEXTO ASTRONÔMICO BABILÔNICO

A tradição de observar e registrar os eventos dos céus pelos povos babilônios data de mil e seiscentos anos antes de Cristo. Porém, seus escribas só começaram a documentar sistematicamente os fenômenos celestes (como os eclipses, as fases da Lua, a posição dos planetas) por volta do século VIII a. C. (PEDERSEN, 1993).

Nos setecentos e/ou oitocentos anos seguintes, os babilônicos produziram grandes quantidades de dados que se tornaram, mais tarde, os pilares inestimáveis para o desenvolvimento da astronomia e da cosmologia científica grega (LINTON, 2004). Neste cenário, é possível afirmar que *a origem dos problemas empíricos astronômicos mais importantes para o desenvolvimento dessas duas áreas da ciência*, pode ser marcada pelo interesse dos astrônomos babilônicos nos fenômenos celestes.

Considerando que todo problema empírico está ligado ao conhecimento de fatos/fenômenos conhecidos e relevantes, os astrônomos babilônicos tinham conhecimentos

tanto sobre os movimentos diretos dos planetas entre as estrelas fixas (posições que não parecem variar entre si) em direção ao leste, quanto sobre os pontos estacionários e períodos de retrogradação do movimento dos planetas ao longo do zodíaco (PEDERSEN, 1993). Nesse contexto, suas observações e registros do fenômeno de retrogradação e das posições planetárias, permitiram o desenvolvimento de métodos matemáticos de base aritmética que descreviam, com precisão, os movimentos planetários, previam eclipses e as posições opostas entre os planetas (PEDERSEN, 1993).

Todos esses conhecimentos astronômicos foram revelados pelas descobertas e decodificações de vários tabletes de argila cuneiformes de conteúdo matemático: tabelas para multiplicação, cálculo envolvendo raiz quadrada, cubo e raiz cúbica, que formavam um sistema numérico sexagesimal. A influência desse sistema de base sexagesimal é visível em nossa medida de tempo e de ângulos, dos dias atuais. Além disso, outras tabelas presentes nos *Astronomical Cuneiform Text* – Textos Astronômicos Cuneiformes – revelaram como a matemática foi aplicada à astronomia e ao cálculo do tempo (NEUGEBAUER; SACHA, 1966).

Em conformidade, a arqueologia demonstrou que, até certo ponto, as civilizações pré-gregas dependiam da tecnologia e da matemática, sugerindo a existência da ciência exata, muito antes dos gregos. Porém, essa dependência estava ligada à manutenção das exigências práticas da vida cotidiana: produção de inventário, administração pública, escavação de canais hídricos, fortificação e distribuição de mão de obra. Por isso, “as evidências até agora sugerem que esses povos não sabiam nada de prova lógica ou de leis naturais” (PEDERSEN, 1993, p.5). Isso implica dizer que, na perspectiva interna da ciência, é válida a ideia de que todo problema científico é fruto de um *fato conhecido*, que só se torna relevante dentro de um *contexto investigativo*, que reconhece a necessidade de explicá-lo, por um empreendimento científico marcado por compromissos metodológicos e ontológicos (LAUDAN, 2011).

Por volta de quinhentos anos antes de Cristo, os astrônomos babilônicos começaram a transformar os registros dos fatos celestes sobre os períodos do Sol, da Lua e dos cinco planetas conhecidos (Saturno, Júpiter, Marte, Vênus e Mercúrio), em uma teoria matemática aritmética (ÉVORA, 1993). Nessa época, eles criaram o conceito de *zodíaco*, uma zona da esfera celeste que se prolonga a oito graus e meio ( $8,5^\circ$ ) de uma a outra parte da eclíptica – faixa celeste na qual se movem o Sol, a Lua e os cinco planetas. E dividiram a faixa entre a eclíptica em doze subdivisões iguais de trinta graus ( $30^\circ$ ) cada.

Esse procedimento tinha como objetivo auxiliar os cálculos e formular a base de um calendário lunissolar – equivalência entre dezenove anos e duzentos e trinta e cinco meses sinódicos. Um período sinódico indica o tempo que um astro leva para reaparecer no mesmo local em sucessivas conjunções com o Sol e constitui um período orbital aparente desse astro a partir da Terra (ÉVORA, 1993). O período sideral é o tempo que um astro leva para completar seu movimento orbital em torno de outro astro, tendo como referência as estrelas fixas. No entanto, esses procedimentos babilônicos revelaram dois aspectos que os distanciam da ideia de ciência que surgiu com os gregos.

O primeiro diz respeito à falta de conexão desses *factos celestes* com uma estrutura física do universo e, por conseguinte, a existência de restrição da astronomia babilônica apenas no domínio fenomenológico. A “maior parte da matemática pré-grega tem uma base empírica semelhante, evidenciando que os métodos empregados foram transmitidos por meio de estudos de exemplos numéricos, mas sem qualquer tentativa de provas lógicas gerais” (PEDERSEN, 1993, p.7). O segundo aspecto diz respeito ao conhecimento atual sobre as teorias planetárias babilônicas, decodificadas mediante análise de tabelas e fragmentos de textos cuneiformes (AABOE, 1958). Acerca disso, três pontos sobre a teoria planetária babilônica justificam a tese de que esses *factos celestes*, realmente, só se tornaram problemas empíricos no contexto investigativo da tradição de pesquisa grega antiga:

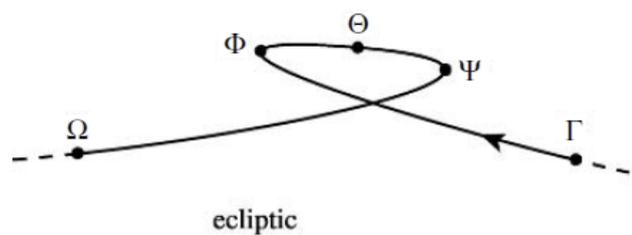
[...] o primeiro é a ausência de qualquer prova, na verdade de qualquer teorema geralmente formulado na matemática babilônica; o segundo está o caráter puramente aritmético da astronomia babilônica, ou em termos negativos, não há sinal de nenhum modelo geométrico como o que estamos acostumados desde as esferas homocêntricas de Eudoxo; e o terceiro, o ponto mais importante, é que as teorias planetárias babilônicas e modernas diferem na própria formulação de seus problemas centrais. (AABOE, 1958, p. 209-210, tradução própria)

Esses três pontos implicam em dizer que, desde o surgimento da astronomia matemática helenística grega, o problema fundamental da astronomia era o de prever a posição de um dado planeta, em um dado momento de tempo, uma vez que a teoria babilônica é, com pequenas exceções, apenas relacionada com certos fenômenos característicos no ciclo sinódico de um planeta – período de revolução de um planeta em relação a Terra (AABOE, 1958).

Para o caso de um planeta superior, por exemplo, Saturno ou Júpiter, cinco fenômenos eram conhecidos pelos astrônomos babilônicos, representados pelos símbolos – Gama ( $\Gamma$ ), Phi ( $\Phi$ ), Theta ( $\Theta$ ), Psi ( $\Psi$ ), Ômega ( $\Omega$ ) – esses cinco fenômenos se configuraram

nos problemas empíricos mais importantes para o desenvolvimento conceitual da astronomia e da cosmologia da tradição de pesquisa grega antiga (Figura 1).

Figura 1– Movimento de retrogradação planetária.



Fonte: Linton, (2004, p. 14).

Na Figura 1, quando um planeta, estava em conjunção com a Terra, ele não podia ser visto por causa do brilho do Sol. Porém, à medida que se movia ao redor da eclíptica, em relação ao Sol, ele chegava ao ponto ( $\Gamma$ ), que representava a primeira visibilidade. Depois disso, era interpretado como uma estrela da manhã. Em conformidade, quando eventualmente o planeta desaparecia, à medida que se aproximava da conjunção novamente, sua última aparição ocorria logo após o pôr do Sol ( $\Omega$ ) – visibilidade interpretada como estrela da tarde. Nesse percurso, o planeta passava por um período de movimento retrógrado em torno de sua posição ( $\Phi$ ) – primeira estação na Terra – e às duas posições:  $\Theta$  – planeta em oposição; ( $\Psi$ ) segunda estação na Terra, em que seu movimento ao longo da eclíptica era estacionário (LINTON, 2004).

Em face dessa configuração, a principal preocupação dos astrônomos babilônicos era calcular a longitude dos cinco planetas conhecidos. Para tanto, eles desenvolveram seus sistemas aritméticos que permitiam calcular tanto o tempo de retrogradação quanto a variação da posição do planeta em longitude. Por trás disso, seus estudos estavam ligados aos objetivos místicos e religiosos.

Por exemplo, para o fenômeno de retrogradação dos planetas, a preocupação não era simplesmente como fenômeno em si, mas onde acontecia em comparação com as estrelas fixas. Isso era importante, pois diziam os astrônomos babilônicos: “quando Marte sai da constelação de escorpião, vira e entra novamente em escorpião, sua interpretação é esta, não negligencie a sua guarda, o rei não deve ir ao ar livre num dia mau” (LINTON, 2004, p. 11).

Em outro exemplo, sabe-se que os *altos deuses dos Parnasos da Babilônia* foram identificados como planetas, denotando uma fina e estreita experiência natural e religiosa desses povos com suas explicações mitológicas (LINTON, 2004).

Em decorrência disso:

[...] o antigo mundo praticava muitas formas de adivinhação - arte de adivinhar os propósitos ocultos dos deuses por meio de presságios no mundo visível, como o voo de pássaros, a aparição de cometas, ou as visões vistas nos sonhos. Um caso particular foi a astrologia, ou a adivinhação pelas estrelas, que se espalhou nos últimos séculos antes de nossa era em todos os países do Mediterrâneo e da Mesopotâmia, onde o Sol a Lua e os planetas eram adorados como os deuses mais poderosos. (PEDERSEN, 1993, p. 9, tradução própria)

Esses dois exemplos complementares auxiliam na diferenciação profunda entre o pensamento astronômico dos babilônios e dos gregos. Isso porque os gregos se desvincularam desses aspectos mitológicos, para edificar a investigação astronômica mediante as observações celestes, por uma perspectiva que pretendia elucidar o problema da estrutura do universo (KUHN, 1990).

O filósofo alemão Friedrich Nietzsche (1844 - 1900) afirmava que, mesmo sendo tolo atribuir aos gregos uma cultura autóctone (originária), é preciso aceitar que seus pensadores “sorveram toda a cultura viva de outros povos, e se foram tão longe, é precisamente porque sabiam retomar a lança onde outro povo a abandonou, para arremessá-la mais longe. São admiráveis na arte do aprendizado fecundo” (NIETZSCHE, 2011, p. 4).

Na próxima seção, procura-se situar os pressupostos metodológicos e ontológicos da *tradição de pesquisa grega antiga*, que materializaram os *atos celestes* registrados pela astronomia babilônica, como problemas empíricos astronômicos e cosmológicos mais importantes dessa tradição de pesquisa.

Com isso, espera-se também compreender como as diretrizes dessa tradição foram estabelecidas para fomentar o desenvolvimento de novas teorias planetárias e modelos cosmológicos sobre a estrutura do universo. Sabe-se que a função de tais diretrizes perpassa por constituir a ontologia que especifica, de modo geral, os tipos de entidades fundamentais que existem em determinado domínio disciplinar (LAUDAN, 2011).

Nesse contexto, procura-se também construir alguns possíveis *vínculos epistemológicos* entre o conteúdo da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, com alguns aspectos, características, princípios da natureza da ciência, apresentados pela literatura sobre o ensino de ciências e, especialmente, o ensino de física.

## 4.2 OS COMPROMISSOS METODOLÓGICOS E ONTOLÓGICOS DA TPGA

Para acessar a origem dos compromissos metodológicos e ontológicos da tradição de pesquisa antiga, é preciso conhecer as visões e modelos cosmológicos de dois expoentes pensadores gregos antigos: Pitágoras de Samos (570 - 495 a. C) e Filolau de Crotona (470 - 385 a. C), seu discípulo mais notável. Esses filósofos e matemáticos foram responsáveis por influenciar profundamente o pensamento astronômico e cosmológico de Platão, que fundou as diretrizes de investigação da astronomia matemática grega, praticada por mais de dois mil anos.

### 4.2.1 A Cosmvisão Pitagórica

A origem dos compromissos metodológicos e ontológicos que alicerçaram a tradição de pesquisa grega antiga encontra-se situada no terceiro período de desenvolvimento da astronomia e da cosmologia na Grécia Antiga – século VI a. C. Isso porque, o primeiro período é caracterizado como primitivo e; o segundo encontra-se cheio de lacunas, que impossibilitam, até o momento, sua reconstrução histórica (BASTOS-PEREIRA, 2011). Para o terceiro período, o foco recai sobre a cosmvisão pitagórica como uma das fontes de origem desses compromissos (KOESTLER, 1989).

Nesse sentido, destaca-se que a principal característica da cosmvisão pitagórica era sua base unificadora para com as áreas da religião, ciência, matemática, música, medicina e cosmologia, em uma síntese inspiradora (DREYER, 1953). Contudo, afirma-se a doutrina pitagórica era reservada apenas para um círculo restrito de discípulos e, somente após a ruptura da *Escola de Crotona* ou *Escola Pitagórica*, marcada pela morte de Pitágoras, é que sua doutrina passou a ser conhecida publicamente, mediante os escritos de seu discípulo Filolau (LAÉRCIO, 1792).

As ideias de Pitágoras de Samos (570 - 495 a. C.) marcaram o início do empreendimento científico grego, em relação ao desenvolvimento de um *modelo esférico do universo*, em uma perspectiva de ordenação representada pelo conceito de *cosmos*, por ele mesmo estabelecido (KOESTLER, 1989). Além desse conceito, é creditada também a Pitágoras a origem da palavra *filosofia* e do conceito de *harmonia*, que significa, em sentido restrito, “o equilíbrio e a ordem que constitui a lei do mundo” (Ibid., p. 10).

Todavia, embora suas ideias estivessem imersas em uma profunda doutrina mística e intuitiva, mais do que racional e científica (PEDUZZI, 2018a), essa busca pelo ordenamento do universo pode expressar o primeiro *vínculo epistemológico* com dois aspectos, características, princípios da natureza da ciência, que coadunam com esse contexto histórico. O primeiro deles é “a fé da ciência na suscetibilidade do universo físico ao ordenamento e ao entendimento humano” (KIMBALL, 1967, p. 111); o segundo é que “a força motriz fundamental da ciência é a curiosidade em relação ao universo físico” (Ibid., p. 112).

Nessa direção, a principal crença na cosmovisão pitagórica era a de que o número representava não somente as relações dos fenômenos entre si, mas era a substância das coisas, a causa de todos os fenômenos da natureza. Pitágoras e seus seguidores foram levados a essa suposição filosófica, acreditando que a “natureza é governada por relações numéricas, como as forças celestes são executadas com regularidade, e como a harmonia dos sons musicais depende de intervalos regulares, cuja avaliação numérica, ele foi o primeiro a determinar” (DREYER, 1953, p. 36).

Em sua doutrina, a filosofia era a mais elevada das músicas, e a forma mais elevada da filosofia eram os números, pois todas as coisas eram números. No significado máximo dessas relações, “todas as coisas têm forma, todas as coisas são formadas, e todas as formas se definem por números” (KOESTLER, 1989, p. 10). Na cosmovisão pitagórica,

[...] os números constituíam o verdadeiro elemento de que era feito o mundo. Chamavam Um ao ponto, Dois à linha, Três à superfície e Quatro ao sólido, de acordo com o número mínimo de pontos necessários para definir cada uma dessas dimensões. Os pontos se somavam para formar as linhas; as linhas, por sua vez, para formar superfícies; e estas para formar os volumes. A partir de Um, Dois, Três e Quatro podiam construir o mundo. (FARRINGTON, 1961, p. 37 *apud* PEDUZZI, 2018a, p. 15)

Uma possível implicação dessa crença na verdade dos números é que tudo colaborava com os pitagóricos para entender que a “*Realidade* podia ser reduzida a séries e a razões numéricas, contanto que se conhecessem as regras do jogo, cuja descoberta foi a principal tarefa dos **Philosophos**, amigos da sabedoria” – grifo do autor – (KOESTLER, 1989, p. 11), pois acreditavam que “os números não tinham sido lançados à toa no mundo” (Idem). Nesse sentido,

Para os que acreditam que a ciência deve-se estruturar e desenvolver, necessariamente, a partir da observação do fenômeno concreto, muitas das conjecturas dos pitagóricos, que transcendem as aparências externas, como a música

dos planetas e o poder divino dos números, mostram-se incompreensíveis. De qualquer modo, aprende-se com os pitagóricos que os caminhos trilhados pelos homens da ciência nem sempre são claros e objetivos. O espírito criador é frequentemente impulsionado por concepções que colocam a ciência bastante longe de uma busca puramente metódica ao desconhecido. (PEDUZZI, 2018a, p. 16-17)

Nesse caminho trilhado por homens e mulheres da ciência, apesar de se julgar que o raciocínio não lógico não recorre à intuição, os filósofos dizem que isso é uma ilusão, posto que, de acordo com o físico e filósofo francês Henri Poincaré (1958):

A lógica inteiramente pura nos levaria sempre a tautologias [retórica]; não poderia criar coisas novas; não é dela sozinha que se pode originar qualquer ciência. Esses filósofos têm razão, num sentido; para fazer aritmética, assim como para fazer geometria, ou para fazer qualquer ciência, é preciso algo mais que a lógica pura. Para designar essa outra coisa, não temos outra palavra senão *intuição*. (POINCARÉ, 1958, p. 19, tradução própria)

Segundo Henri Poincaré (1854 - 1912), como um elemento racional, essa *intuição* envolve o “senso da beleza matemática, da harmonia dos números e formas, e da elegância geométrica” (Ibid., p. 19). Em conformidade, o físico e filósofo Werner Heisenberg (1901 - 1976), dialogando com Albert Einstein (1879 - 1955), disse: “Você também deve ter sentido isso, a simplicidade e a integralidade quase assustadora das relações que a natureza de repente estende à nossa frente” pela matemática (FERRIS, 1990, p. 235).

A partir das ideias desses célebres personagens da física, é possível dizer que a *intuição* na cosmovisão pitagórica, especialmente, na relação dos números com a natureza, reside, pelo contrário, muito além de uma mera intuição de senso comum. E com essa intuição científica, é possível estabelecer mais *vínculo epistemológico* com mais um terceiro aspecto, característica, princípio da natureza da ciência, qual seja, a “ênfase que a ciência dar à linguagem matemática como meio mais preciso e mais simples de estabelecer relações” (KIMBALL, 1967, p. 112).

É interessante notar, que essa ideia de origem pitagórica torna-se uma constante indiscutível do pensamento e na prática científica ao longo de todo o seu desenvolvimento histórico. Substantivando essa ideia, Nietzsche (2011, p. 142) afirma que, embora essa *intuição* estivesse ainda longe de aplicação exata – no sentido de quantificação –, “a contribuição original dos pitagóricos é, pois uma invenção extremamente importante: a significação do número e, portanto, a possibilidade de uma investigação exata em física”. Nesse sentido, é importante apresentar, a seguir, o modelo cosmológico de Pitágoras e as ideias sobre a esfericidade da Terra, atualmente, questionada pelo movimento terraplanista.

#### 4.2.2 O Modelo Cosmológico de Pitágoras e a Esfericidade da Terra

Na cosmovisão pitagórica, a ideia de ordenamento do universo foi assimilada pela *teoria cosmológica da harmonia das esferas*, desenvolvida posteriormente pelos modelos cosmológicos de Filolau de Crotona (480 - 400 a. C.), Heráclides de Ponto (375 - 310 a. C.) e Aristarco de Samos (310 - 230 a. C.). Por sua vez, esse desenvolvimento foi fomentado pelo *problema empírico associado às distâncias entre as órbitas dos planetas* (KOESTLER, 1989; DREYER, 1953). Esse é um dos problemas empíricos que aparece como um assunto/tema, nos documentos oficiais da educação brasileira e na literatura, necessário a *compreensão estudantil da relação Terra-Universo* (BRASIL, 2018).

Atrelado à ideia do modelo esférico de universo, acredita-se que Pitágoras foi o primeiro filósofo grego a ensinar sobre a *esfericidade da Terra* e o seu “lugar privilegiado no centro do universo” (ORR, 1914). Por exemplo, a astrônoma Mary Orr (1914) afirma que:

Os noviços de Pitágoras, sem dúvida após o início solene e preparação, foram informados: Esta Terra, que lhes parece a palma do mundo, com o céu se estendendo sobre ela como uma tenda, é um globo redondo, com homens como vocês que vivem do outro lado e, no entanto, eles não caem, e não cai, pois está no centro do mundo, e não há tendência a cair nem em uma direção nem em outra. A própria Terra, uma esfera perfeita, está no centro de uma esfera infinitamente maior, o céu estrelado; e dentro deste, sete corpos celestes movem-se em círculos perfeitos, cada um a sua própria distância, sem precisar de nenhum apoio e nenhuma força para dirigi-los, pois a harmonia é a força motriz do cosmos. (ORR, 1914, p. 66-67, tradução própria)

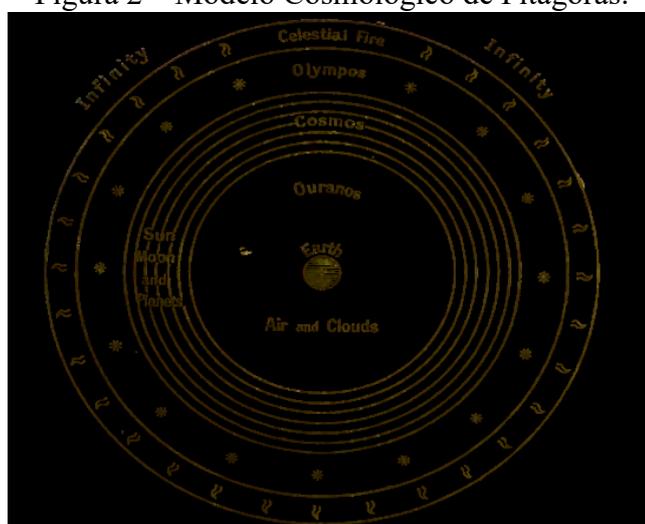
Acredita-se que Pitágoras chegou a essa conclusão observando a altura em latitude da estrela polar em suas viagens para o Egito. Mas sua ideia era contrária à concepção de outros filósofos gregos, por exemplo, de Thales de Mileto (~624 - 546 a. C.), que acreditava que a Terra era “um disco plano que flutuava sobre a água” (PEDUZZI, 2018a, p. 11). No entanto, a ideia pitagórica logrou mais êxito, uma vez que tanto os navegadores fenícios antigos quanto outros povos ao norte da Grécia conheciam as consequências da Terra ser uma esfera e não um disco plano (DREYER, 1953).

Para esses navegadores, com certeza, era fácil perceber que, quando um navio se aproximava ou se afastava da costa, devido à *esfericidade da Terra*, avistava-se, respectivamente, primeiro, ou por último, a ponta de seu mastro, e não o navio como um todo (DREYER, 1953). Além disso,

[...] quando se compreendeu que os eclipses lunares só acontecem na lua cheia, quando estamos entre ela e a sombra da Terra caindo sobre a Lua, então, como a borda dessa sombra é sempre um círculo, é demonstrável que o corpo que joga essa sombra não pode ser de nenhuma forma a não ser a de uma esfera. (ORR, 1914, p. 67, tradução própria)

Por essa perspectiva, na cosmovisão pitagórica, o Sol e Lua, por consequência dos eclipses, também eram esféricos. E estendendo essa consequência para todos os corpos celestes, um modelo de universo esférico, portanto, se materializou na visão pitagórica (Figura 2).

Figura 2 – Modelo Cosmológico de Pitágoras.



Fonte: Orr (1914, p. 71)

Segundo Orr (1914), a Figura 2 representa um esquema ilustrativo de uma das formas mais antigas do modelo cosmológico pitagórico, que foi encontrado em um relato feito por Aristóteles (384 - 322 a. C.).

Nesse relato, circundando a Terra, encontra-se *Ouranos*, o céu, dentro do qual existe tudo o que está mudando e sendo corruptível. A região do *Cosmos* é o lugar do movimento ordenado do Sol, da Lua e dos cinco planetas (Saturno, Júpiter, Marte, Vênus e Mercúrio). A região das estrelas fixas, *Olympus*, é o lugar dos elementos puros, que segura essas estrelas. A região do *Fogo Celestial* está além das outras regiões, e o *Ápeiron*, o espaço infinito, ou ar infinito, é o lugar do qual o mundo extrai seu fôlego, mas está fora de tudo.

Nesse modelo cosmológico, os cinco planetas, o Sol e a Lua, com exceção das estrelas fixas, constituíam o número sagrado de sete, que representava sete notas de um escala

musical, sendo a esfera das estrelas fixas a oitava nota dessa escala. Nessa perspectiva mística da harmonia musical, aplicada no ordenamento do universo,

Pitágoras achava que o intervalo musical formado pela Terra e pela Lua era de um tom; da Lua a Mercúrio, havia um semitom; de Mercúrio a Vênus, um semitom; de Vênus ao Sol, uma terça menor; do Sol a Marte, um tom; de Marte a Júpiter, um semitom; de Júpiter a Saturno, um semitom; de Saturno a esfera das estrelas fixas, uma terça menor. A “Escala Pitagórica”, resultante é **dó, ré, mib, sol, lá, sib, si, ré**, apesar de variar um pouco às descrições da escala proporcionadas por diferentes escritores. (KOESTLER, 1989, p. 12)

Segundo Koestler (1989), para Pitágoras, a revolução de cada um desses corpos celestes ocasionava, no ar, um sussurro musical em tons diversos, dependendo da razão de suas respectivas órbitas. As órbitas em que se moviam os planetas formavam uma espécie de imensa lira, cujas cordas curvavam-se em círculo, e os intervalos das órbitas eram governados pelas leis fundamentais da harmonia – explicação pitagórica para ordenamento dos planetas.

Para o ordenamento, Terra, Lua, Sol, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno, seu conhecimento provinha dos períodos regulares de revolução desses corpos celestes, que foram aprendidos com os egípcios e babilônios nas jornadas de Pitágoras ao Egito (ORR, 1914). Com um curto período de revolução (um mês), a Lua foi colocada, naturalmente, mais próximo da Terra, por ser o menor círculo a atravessar o zodíaco e, assim por diante, os demais planetas (ORR, 1914).

Além disso, as órbitas em que se moviam os planetas, a regularidade dos fenômenos do dia e da noite, as fases da lua, o movimento anual do Sol, o movimento diurno das estrelas substanciavam os conceitos de *simetria* e de *beleza*, no ordenamento do universo pitagórico (KOESTLER, 1989; ÉVORA, 1993; LINTON, 2004). Desse modo, os planetas Saturno, Júpiter, Marte, Vênus, Mercúrio, o Sol e a Lua, esferas de natureza divina, executavam o mais simples e simétrico dos movimentos, ao redor da Terra estacionária, isto é, *o movimento circular uniforme* (PEDUZZI, 2018a). O ponto central desse ordenamento do universo, como uma prerrogativa metafísica, é que ele transmitiu uma visão de mundo sobre a natureza, que permaneceu fortemente arraigada no pensamento científico ocidental, através dos séculos (KOYRÉ, 2002).

Esse *movimento circular uniforme*, que não tem início nem fim, tornou-se o principal aporte conceitual que – metodologicamente – serviu para a elaboração de explicações dos problemas empíricos astronômicos e cosmológicos, em todos os modelos e teorias planetárias no contexto da tradição de pesquisa grega antiga, até o século XVII, d. C (AITON, 1981).

Nesse contexto, encontram-se também as raízes mais profundas que dão origem aos *problemas conceituais internos* das teorias planetárias elaboradas pelo pensamento científico ocidental, desde Eudoxo de Cnido (390 - 337 a. C) à Johannes Kepler (157 - 1630).

#### 4.2.3 O Modelo Cosmológico de Filolau e Suas Influências Sobre Platão

Após a morte de Pitágoras, sua doutrina veio ao conhecimento público por meio de seu discípulo Filolau de Crotona (470 - 385 a. C). Acredita-se que o principal motivo dessa iniciativa foi o estado de pobreza de Filolau, após a ruptura da escola pitagórica. Por exemplo, é dito que Platão teria adquirido um livro escrito por Filolau sobre a doutrina pitagórica, por quarenta minas de prata alexandrinas – moeda grega antiga (LAÉRCIO, 1792).

Nos fragmentos de textos sobreviventes às intempéries do tempo, Filolau afirmava que a doutrina pitagórica tinha como princípios que, “a natureza no cosmos está estritamente composta de elementos infinitos e finitos, da mesma maneira que o universo e tudo o que nele se constitui” (BORGES, 1978, p. 250).

Nesse *cosmos*, “tudo que é conhecido tem número; pois nada é possível pensar ou conhecer sem ele” (Idem). O significado filosófico desses princípios está na essência da matemática como instrumento de constituição e compreensão do cosmos. Pois, para os pitagóricos, “o número é o princípio dos seres sobre o ponto de vista da matéria, assim como é a causa de suas modificações e de seus estados diversos” (ARISTÓTELES, 1875, p. 20).

Filolau considerava ser “impossível criar-se um cosmos [...], se não se acrescentasse a harmonia, de qualquer maneira que ela tenha vindo a ser” (BORGES, 1978, p. 251), posto que:

[...] o cosmos é um e começou a vir a ser a partir do centro, e do centro para cima, nos mesmos intervalos (de distância) que os de baixo. Pois o (que está) acima do centro se encontra em oposição ao que está abaixo; pois para o (que está) muito abaixo, o que está no centro constitui o mais alto, e assim o restante. Pois com o centro ambos estão nas mesmas relações, mas apenas invertidos. (BORGES, 1978, p. 252)

A implicação dessa concepção de cosmos implica a materialidade filosófica de “um todo finito hierarquicamente ordenado” (KOYRÉ, 2002, p. 89), que surgiu como os pitagóricos e predominou por muitos séculos no pensamento científico ocidental. Somente com a destruição dessa concepção filosófica é que realmente é possível pensar na revolução

científica do século XVII. No entanto, nesse cosmos finito e hierarquicamente ordenado, encontra-se o modelo cosmológico de Filolau.

Em uma descrição geral, o universo de Filolau se constituía de uma imensa esfera em movimento, na qual estavam presas em sua região superior as estrelas fixas. Todos os corpos celestes se movimentam segundo uma trajetória circular em torno de uma entidade metafísica denominada de “o primeiro constituído, *o um*, que está no centro da esfera, e chama-se *lar* (fogo central), *lareira do universo*, ou *altar de Zeus*” (BORGES, 1987, p. 251). Essa entidade metafísica foi suportada pelo pressuposto filosófico de Parmênides de Eléia (530-460 a. C.), de que “o não ser é nada; o ser, portanto, é um” (KUHNEN, 1978, p. 140).

Filolau considerava que “o um (unicidade) é o princípio de todas as coisas” (BORGES, 1987, p. 251). Sobre esse primeiro constituído, o um, “os pitagóricos acreditavam perceber em números, e não em fogo, terra, água e ar, uma multiplicidade de analogias com o que existe e o que é produzido” (ARISTÓTELES, 1875, p. 20), pois concebiam “os números antes de todas as coisas”, e “o céu como um todo, era uma harmonia e um número” (Idem). Daí a razão do um (unicidade) ocupar o centro do universo, metaforicamente, o fogo central!

Nesse contexto da crença no poder dos números, enquanto Pitágoras utilizava o número sagrado sete, ligado ao número de notas musicais e à harmonia dos corpos celestes, em seu modelo cosmológico; Filolau acreditou ter comprometido essa harmonia e violado a configuração produzida pelo número sete, por isso se viu obrigado a adicionar um décimo planeta em seu modelo cosmológico.

Esse novo planeta foi chamado de *antichthon* ou anti-Terra, disposto entre a Terra e o fogo central (ÉVORA, 1993). Para esse filósofo, essa criação metafórica se harmonizava como outro número sagrado, o dez, cuja importância se expressava da seguinte forma:

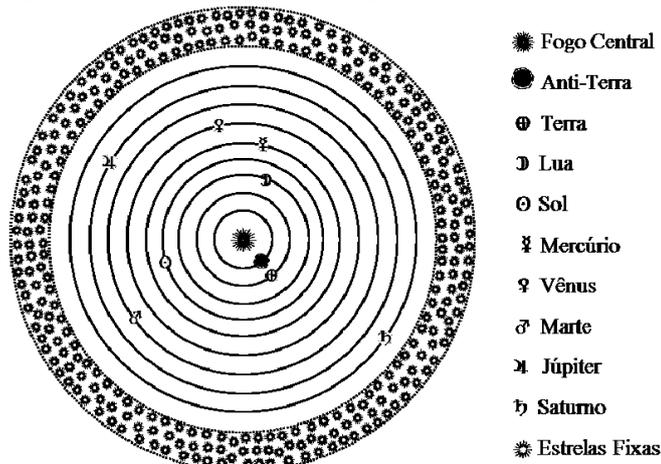
Deve-se julgar as atividades e a essência do número pela potência que existe no número dez; pois ele é o grande, é o-que-tudo-cumpre e o-que-tudo-efetua, e princípio tanto da vida divina e celeste quanto da humana [...]. Sem este, todas as coisas são ilimitadas, obscuras e imperceptíveis. (ARISTÓTELES, 1875, p. 20, tradução própria)

E alhures,

[...] os dez corpos divinos movem-se como em uma dança, o céu e os cinco planetas, depois deles o Sol, embaixo dele a Lua, e embaixo da Lua a Terra e embaixo da Terra a anti-Terra; depois de todos eles vem o fogo, que é colocado como uma lareira ao redor do centro. (COHEN MORRIS; DRABKIN, 1966, p. 97, tradução própria)

Nesse contexto, acredita-se que Filolau foi o primeiro filósofo a propor que a Terra, os cinco planetas (Saturno, Júpiter, Marte, Vênus e Mercúrio), o Sol e a Lua executavam o *movimento circular uniforme*. Nessa proposição ele concebeu a Terra como mais um corpo celeste, ao invés de centro do universo, como proposto por Pitágoras. Uma ilustração esquemática dessa estrutura é apresentada na Figura 3.

Figura 3 – Modelo Cosmológico de Filolau de Crotona.



Fonte: Bessada (2014, p. 101).

Nessa ordenação do cosmos (Figura 3), tem-se o fogo central, anti-Terra, Terra, Lua, Sol, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter, Saturno e as estrelas fixas. Observados da Terra, os cinco planetas foram ordenados em função do tempo que cada um levava para retornar à mesma posição no céu. Entre aqueles que apresentavam maiores *períodos sinódicos* estavam Saturno (29) vinte e nove anos e Júpiter (12) doze anos, indicando sua proximidade com as esferas das estrelas, mais do que com a Terra; Marte vinha, a seguir, com dois anos; o Sol, Mercúrio e Vênus, possuíam o mesmo período sinódico médio de um ano (HUFFMAN, 1993). A partir da Terra, observa-se na ordem correta a Lua, o Sol, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter, Saturno e as estrelas fixas.

Por essa ordenação, Filolau apresentava uma explicação especulativa dos fenômenos do dia e da noite, pela rotação da Terra em torno do fogo central, bem como explicava a ordenação dos planetas em função do grau de nobreza de cada um deles, isto é, “exceto pela anti-Terra, a Terra era a menos nobre dos corpos celestes, enquanto a esfera das estrelas era a mais perfeita” (COHEN Morris; DRABKIN, 1966, p. 97).

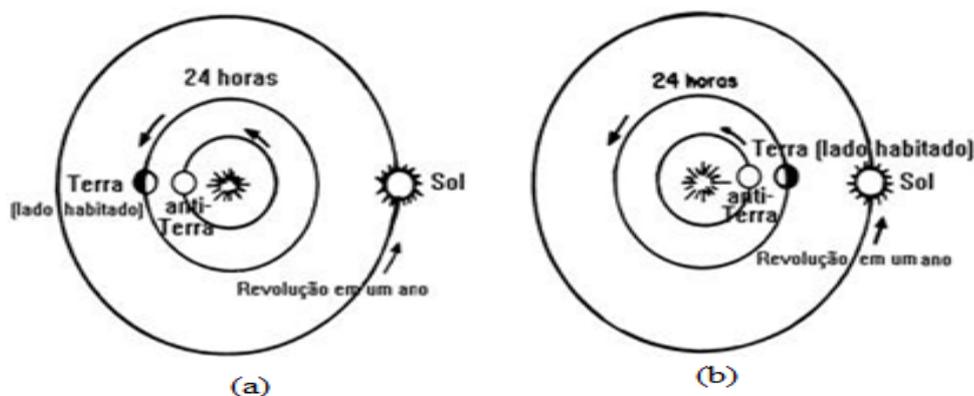
Atrelado a esse grau de nobreza, Filolau também:

[...] atribuiu a cada corpo celeste um movimento circular com as velocidades (velocidade angular) sendo proporcionais à distância do centro. Ele não estava em condições de atribuir números específicos a essas velocidades, mas expressa a crença básica de que eles têm um relacionamento matemático inteligível. (HUFFMAN, 1993, p. 259, tradução própria)

Contudo, seu modelo cosmológico apresentava contradições, por exemplo, a não constatação observacional das entidades celestes (fogo central e anti-Terra) e o problema do superaquecimento das regiões da Terra voltada para o fogo central. Filolau explicava que a invisibilidade da anti-Terra para os habitantes da Terra era causada porque, em seu movimento diário, a Terra apresentava permanentemente a mesma face (parte inabitada) para o fogo central, de modo que, quando noite na Terra, e considerando que apenas o lado desabitado estava voltado para o centro, o planeta *antichthon* (anti-Terra) e o fogo central não podiam ser vistos (HUFFMAN, 1993).

Para explicar essa invisibilidade durante o dia, Filolau argumentava, em relação à noite, que doze horas depois (quando é dia na Terra), a Terra fazia meia revolução e seu lado externo ficava iluminado pelo Sol, que se movia apenas meio grau à frente de sua órbita anual. Além disso, Filolau afirmava que o planeta *antichthon* também fazia meia revolução, por isso, o fenômeno da invisibilidade dessas duas entidades celestes parecia algo concreto para os habitantes da Terra (ÉVORA, 1993). Sintetizando essas duas explicações em um único esquema (Figura 4a e 4b), encontravam-se revolucionando em torno do fogo central, em 24 horas, a Terra e a anti-Terra, que executam movimentos sincrônicos lado a lado.

Figura 4 – Esquema da invisibilidade do fogo central.



Fonte: Adaptado de Orr (1914, p. 73).

Segundo Filolau, é essa sincronia de movimento que torna possível para a *anti-Terra* ocultar o *fogo central* das partes não habitadas da Terra, evitando o superaquecimento dessas

regiões. Contudo, por não ter conseguido superar as contradições entre seus constructos filosóficos e as constatações observacionais, o modelo cosmológico de Filolau sofreu duras críticas, principalmente, sobre a ideia de uma Terra dotada de movimento.

Sobre da ideia do movimento da Terra no modelo de Filolau, Aristóteles escreveu o seguinte:

Todos os que negam que a Terra repousa no centro pensam que ela gira ao redor do centro, e não somente a Terra, mas, como dissemos anteriormente, a anti-Terra também. Alguns deles consideram possível que haja vários corpos movendo-se, que são invisíveis para nós devido à interposição da Terra. Isto, eles dizem, dá conta do fato dos eclipses da Lua serem mais frequentes do que os do Sol: pois, além da Terra, cada um destes corpos móveis pode obstruí-las. (ÉVORA, 1993, p. 23)

A verdadeira razão dessa crítica encontra-se nas objeções às entidades filosóficas e metafísicas (harmonia, simetria, beleza e perfeição dos números) utilizados pelos pitagóricos para ordenar o universo. Em conformidade com essas objeções, destaca-se que o modelo cosmológico de Filolau “não era uma explicação matemática sofisticada do movimento planetário, mas claramente um produto da tradição do pensamento pré-socrático sobre o cosmos” (HUFFMAN, 1993, p. 241), mas sim “um exemplo impressionante da astronomia especulativa pré-socrática, que o estabelece como precursor de Platão” (Idem). Filolau transmitiu três importantes constructos para o desenvolvimento da astronomia: “a correta ordenação dos planetas vistos da Terra; a ideia de que os corpos mais próximos do centro se movem mais rapidamente; e a concepção geral da harmonia das esferas” (HUFFMAN, 1993, p. 261).

De modo específico, Filolau forneceu:

[...] um modelo astronômico do cosmos que combinava postulados a *priori* da ordem dos planetas como uma tentativa de explicar os principais fenômenos astronômicos. Ele parece ter assumido o universo “centrífugo”, proposto pela primeira vez por Parmênides, e o desenvolveu consideravelmente em direção ao que encontramos mais tarde em Platão. (Huffman, 1993, p. 261, tradução própria)

De acordo com Huffman (1993, p. 261), Platão (427 - 327 a. C) foi “atraído pela tentativa de explicar os fenômenos planetários em termos de um movimento regular para cada corpo”, mediante os princípios de ordenamento do universo, bem como pela premissa básica estabelecida por Filolau. Por essa premissa, “os movimentos celestes deveriam ser explicados em termos de um movimento circular único para cada corpo, supondo que estes movimentos tinha uma relação uniforme entre si com base na sua distância ao centro” (Ibid., p. 262).

Nesse contexto, foram esses constructos conceituais, filosóficos e metafísicos, presentes no modelo cosmológico de Filolau e na cosmovisão pitagórica, que Platão lançou as bases da astronomia matemática, que foi amplamente desenvolvida no contexto da tradição de pesquisa grega antiga. Em razão disso, é importante, na próxima seção, situar a formalização dos principais problemas empíricos astronômicos e cosmológicos dessa tradição, no contexto da cosmologia de Platão.

### 4.3 A FORMALIZAÇÃO DOS PROBLEMAS EMPÍRICOS DA TPGA

Para continuar situando os aspectos da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, que caracterizam o nascimento da tradição de pesquisa grega antiga, é importante, nesta seção, situar a formalização dos problemas empíricos dessa tradição, no contexto de Platão. Com isso, tentar compreender como os compromissos metodológicos e ontológicos dessa tradição foram estabelecidos de modo, a fomentar o desenvolvimento do pensamento astronômico e cosmológico grego, na direção de outros modelos cosmológicos e, especialmente, das teorias planetárias, a partir de Eudoxo de Cnido.

#### 4.3.1 A Cosmologia de Platão e a Origem da Astronomia Matemática Instrumentalista

O modelo cosmológico de Filolau transmitiu para o pensamento cosmológico de Platão (427-347 a. C.) três importantes conhecimentos sobre os fenômenos celestes. O primeiro deles foi a correta ordenação dos planetas vistos da Terra. O segundo, a ideia de que os corpos mais próximos do centro se movem mais rapidamente. E o terceiro, a concepção geral da harmonia das esferas. Juntamente com esses conhecimentos, os gregos também herdaram dos babilônios dados observacionais sobre o movimento dos corpos celestes e do fenômeno de retrogradação planetária.

Esse último fenômeno despertou um interesse do empreendimento científico grego, de modo tão especial, que o prêmio máximo estabelecido por Platão, para quem encontrasse uma solução, tornou-se o próprio desenvolvimento da astronomia, mediante a geometria. Segundo Évora (1993, p. 26), na porta da *Academia de Platão* estava escrito: *Que ninguém ultrapasse a minha porta sem conhecer a geometria*. Uma forte afirmação, que denota a máxima importância que os pensadores gregos atribuía a essa área da matemática, como instrumento intelectual de compreensão dos fenômenos celestes e do universo como todo.

Em um percurso fortemente influenciado pela cosmovisão pitagórica, Platão assumiu os compromissos metodológicos e ontológicos encontrados nas cosmologias de Pitágoras e Filolau, especialmente: “os que davam ênfase aos números, a uniformidade básica, que subordina a aparente irregularidade do movimento dos corpos celestes, o movimento circular e a forma esférica, como a mais perfeita das figuras geométricas” (COHEN Morris; DRABINK, 1966, p. 98).

Platão foi atraído pela tentativa de explicar os fenômenos planetários, em termos de um movimento regular para cada corpo. Para tanto, ele adotou os princípios filosóficos e metafísicos pitagóricos da ordenação do cosmos, sem se preocupar com a realidade objetiva dos dados observacionais (AINTON, 1981). Em face disso, encontra-se em Platão a origem da *corrente de pensamento epistemológica instrumentalista* que, bem mais a frente, porém ainda no contexto da tradição de pesquisa grega antiga, será distinguida da *corrente de pensamento epistemológica realista*, encontrada na cosmologia, na física e na visão de mundo de Aristóteles.

É importante observar a existência dessas duas correntes de pensamento, para compreender como elas foram responsáveis por dividir essa tradição de pesquisa em duas frentes de investigações, evidenciando o *caráter epistemológico da pluralidade* de metodologias e orientações teóricas no processo de produção de conhecimento científico, que, muitas vezes, são completamente divergentes nos fundamentos específicos.

Nessa direção, sabe-se que as ideias cosmológicas platônicas encontram-se em sua obra *Timeu* e em algumas considerações em seus diálogos, especialmente, nas obras *Phaedo*, *A República* e *As Leis* (PERREIRA Maria, 1949). Contudo, destaca-se que não é tarefa fácil acompanhar o desenvolvimento da construção do universo platônico, pois existem muitas opiniões divergentes sobre muitos pontos do seu modelo cosmológico. Dentre esses pontos, existe a ideia de que os *diálogos platônicos* são muito mais de cunho filosófico do que um estudo astronômico sistemático. Por exemplo, sobre os textos do *Timeu*, afirma-se que, “mesmo em um único diálogo que é especialmente devotada às questões físicas, Platão misturou mito e ciência” (DREYER, 1953, p. 54).

No entanto, como um fundador da perspectiva instrumentalista, Platão lançou os alicerces da investigação da astronomia matemática, cujo alcance, no contexto da tradição de pesquisa grega, encontrou seu grau máximo de desenvolvimento, isto é, seu apogeu, no trabalho astronômico de Claudio Ptolomeu (100 - 168 d. C.), especialmente, no *Almagesto*.

A partir do trabalho de Nicolau Copérnico (1473 - 1543) – *A Revolução dos Orbes Celestes* – treze séculos depois, essa perspectiva de investigação, devido às *consequências degenerativas*, que uma tradição de pesquisa pode estar sujeita (LAUDAN, 2011), foi dando lugar à linha de investigação da *astronomia física*. Destaca-se que essa perspectiva sempre esteve presente no contexto da tradição de pesquisa grega antiga, especialmente, a partir de seu fundador, Aristóteles, porém, ela somente foi revigorada e impulsionada com os trabalhos de Johannes Kepler (1571 - 1630), especialmente, *Astronomia nova e Harmonia dos Mundos*.

Para fundar perspectiva investigativa da astronomia matemática instrumentalista, Platão construiu em sua *Academia* um currículo para estudos avançados. Isto é, uma espécie de curso universitário para a época, cujo objetivo principal era formar seus discípulos nas ciências existentes no contexto grego antigo. Tal empreendimento foi formalmente registrado e contemplado por sua obra *A República* (PEREIRA Maria, 1949).

Nessa obra, encontram-se enumeradas as diversas ciências existentes à época de Platão, dentre elas, a aritmética, a astronomia, a geometria, a harmonia, dentre outras. Juntamente a isso, encontram-se também os principais problemas a serem resolvidos, para os quais, o mais evidente está na astronomia. Especialmente, no Livro VII da obra *A República*, por meio de um diálogo entre o personagem Sócrates e um discípulo Glauco, Platão afirmou o seguinte:

Sócrates - É com problemas, portanto, que nos dedicaremos à astronomia, tal como à geometria; e dispensaremos o que há no Céu, se quisermos realmente tratar da astronomia [...].

Glauco - Realmente é um trabalho complicado, em relação ao que têm agora, esse que tu prescreves aos astrônomos.

Sócrates - Penso que faremos prescrições para as outras ciências no mesmo estilo, se de alguma coisa servirmos como legisladores. (PLATÃO, 1949, p. 242)

Justamente com essa prescrição de problemas, no domínio disciplinar da astronomia, será possível situar – na próxima seção – a origem dos problemas empíricos astronômicos ligados aos fenômenos celestes registrados pelos babilônios. E com essa prescrição, pode-se dizer que a sua *astronomia matemática instrumentalista* foi orientada solidamente como um conjunto de afirmações e negações metodológicas e ontológicas herdadas de Pitágoras e Filolau (LAUDAN, 2011).

Dentre outras compreensões, essas afirmações podem ser entendidas como um conjunto de prerrogativas de naturezas científicas, conceituais, filosóficas, metafísicas e até religiosas. Nesse sentido, as prerrogativas científicas e conceituais podem ser compreendidas

pelos pressupostos que permeiam o pensamento astronômico instrumentalista e racionalista de Platão. Posteriormente, a fusão desse pensamento racionalista com a experiência concreta (empirismo) dos fenômenos celestes e terrestres, vai substantivar a astronomia física, a partir dos trabalhos Kepler e Newton, permanecendo até os dias atuais, como pilares da prática da ciência moderna.

As prerrogativas de natureza *filosóficas* são exemplificadas pelas práticas de produção de conhecimento científico fundamentadas no racionalismo, empirismo, instrumentalismo, realismo, dentre outras (IRZIK; NOLA, 2011). As de natureza *metafísica* são indagações das coisas que são inteligíveis (ordenamento do universo, conservação da quantidade de movimento e da energia do universo), mas encontram-se para além das coisas físicas (AMARAL, 2001). As de natureza *religiosas* são as suposições que estreitam, em muitos aspectos, a relação da prática científica, para além da astronomia e da cosmologia, em crenças teleológicas sobre os objetivos e finalidades do universo e na possibilidade de desvendar os mistérios da natureza (FERRIS, 1990). Além disso, o próprio Platão, em sua obra *Timeu*, misturou ciência e religião, se aproximando dos objetivos místicos e intuitivos que cercavam a astronomia babilônica e a doutrina pitagórica.

Voltando o foco para o modelo cosmológico de Platão, alguns pontos merecem ser destacados. O primeiro deles diz respeito à sua associação à criação do cosmos. Platão afirmou no *Timeu* o seguinte:

Deus fez o mundo na forma de um globo, uma esfera, cujo centro está à mesma distância de todos os pontos do extremo envolvente - e de todas as figuras essa é a mais perfeita e semelhante a si própria -, considerando que o semelhante é infinitamente mais belo do que o dessemelhante. (PLATÃO, 2011, p. 102)

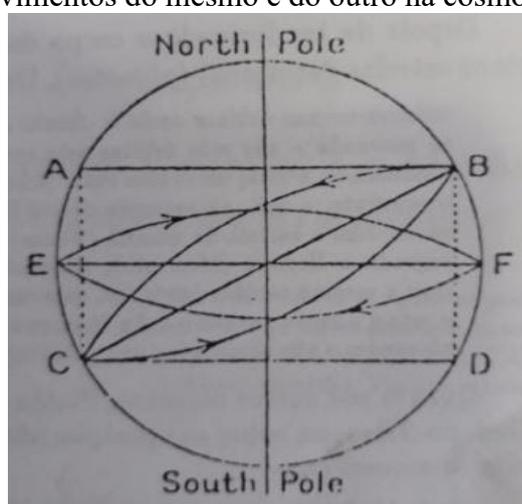
Substantivando essa crença teleológica, Platão afirmou que Deus<sup>7</sup> arrematou o lado exterior dessa esfera completamente lisa e arredondada, fora da qual não havia necessidade de existir nada. Seguindo a cosmovisão pitagórica, no centro dessa esfera repousava a Terra, que também é esférica, mas que permanecia no centro do universo, para não alterar seu equilíbrio simétrico (ÉVORA, 1993). Por conseguinte, a esfera cosmológica girava uniformemente de leste para oeste, no mesmo lugar, em torno do seu próprio eixo, que passava pelo centro da Terra.

---

<sup>7</sup> É importante destacar que Deus, em Platão, é uma entidade antagônica ao ateísmo materialista representado por outros pensadores gregos, por exemplo, os pensadores atomistas.

O segundo ponto é que as estrelas, representantes de seres eternos, divinos e imutáveis, moviam-se com velocidade uniforme em torno da Terra, na mais perfeita e regular de todas as trajetórias, o círculo interminável. O terceiro, o Sol, a Lua e os cinco planetas (Saturno, Júpiter, Marte, Vênus e Mercúrio) eram carregados pela rotação da esfera exterior, *lateralmente para a direita*, por um movimento chamado por Platão de *movimento do mesmo*. Assim, cada planeta no modelo platônico possuía um movimento circular interior próprio, chamado de *movimento do outro*, em um plano que cortava o equador celeste (plano EF da Figura 5).

Figura 5 – Movimentos do mesmo e do outro na cosmologia platônica.



Fonte: Évora (1993, p. 31).

Na Figura 5, a linha AB representa o diâmetro do trópico de verão, a linha CD o diâmetro do trópico de inverno, a linha CB é a diagonal do retângulo obtido pela junção AC, BD. O *movimento do mesmo* é o movimento de toda a esfera de leste (esquerda) para oeste (direita) no plano do equador celeste (EF), que é paralelo aos planos dos trópicos – na direção dos lados AB e CD. Já o *movimento do outro*, em sentido oposto, no plano da diagonal CB, que é o diâmetro da eclíptica, é o círculo que tangencia o trópico de verão tanto próximo ao ponto (B) em câncer quanto ao trópico de inverno junto ao ponto (C) em capricórnio. O *zodiaco* é uma banda larga contendo os doze signos, cujo centro gira a eclíptica.

Acerca do movimento do *mesmo* e do *outro*, Platão admitiu que o primeiro fosse superior ao segundo, pois era o único e o primeiro que Deus teria deixado sem dividir. Já que o *movimento do outro* ele dividiu em seis partes, fazendo sete círculos desiguais. Nessa perspectiva, Platão afirmou que, depois de ter formado o corpo do Sol, da Lua e dos cinco planetas,

[...] Deus estabeleceu-os nas órbitas onde o percurso do Outro estava se movendo - nas sete órbitas sete estrelas: primeiro encontra-se a Lua, na órbita mais próxima da Terra; e o seguinte, o Sol, na segunda órbita depois da Terra; então vêm à estrela da manhã (Vênus) e a estrela consagrada a Hermes (Mercúrio), movendo-se em órbitas com a mesma rapidez que o Sol, mas em direção oposta; e esta é a razão porque o Sol e Hermes e Lúcifer (Vênus) alcançam e são alcançados uns pelos outros. (PLATÃO, 2011, p. 112-113)

Quanto aos outros planetas (Saturno, Júpiter e Marte), sem adentrar em detalhes, Platão considerou que:

[...] se alguém quisesse precisar onde e por que motivo Deus os estabeleceu sem deixar de lado nenhum deles, esse discurso, que é secundário, causaria mais dificuldades [...] Quanto a este assunto, pode ser que mais tarde o abordamos com a atenção que merece – **algo que não aconteceu**. (PLATÃO, 2011, p. 113, grifo próprio)

Observa-se que o ordenamento dos planetas dado por Platão, a partir da Terra e de suas velocidades em relação ao centro (Terra), está em conformidade com o ordenamento fornecido por Filolau. Além disso, assumindo a premissa de que cada planeta tinha movimento circular próprio, Platão também afirmou que eles giravam na órbita do *movimento do outro*, que, por ser oblíqua:

[...] atravessa a órbita do Mesmo e é dominada por ela. Alguns astros deslocam-se em círculos maiores e outros em círculos menores; os que estão nos círculos menores deslocam-se mais rapidamente e os que estão nos círculos maiores deslocam-se mais lentamente. Agora, por causa da órbita do Mesmo, os que se deslocam mais rapidamente parecem ser alcançados pelos que se deslocavam mais lentamente, embora realmente sejam estes que são alcançados, pois o movimento do Mesmo faz todos eles girarem em espiral. (ÉVORA, 1993, p. 112)

Platão acreditava que a real trajetória dos planetas no céu, em relação a Terra, era transformada em um movimento espiral, devido à combinação do “movimento circular de leste para oeste, em um plano paralelo ao equador celeste, como o movimento do outro - movimento circular em um plano que corta o equador” (ÉVORA, 1993, p. 32). Por essa perspectiva, a principal implicação dos movimentos dos planetas seguir a premissa de Filolau, no modelo cosmológico platônico, é de que esses corpos celestes deveriam se mover por meio do movimento circular uniforme, obedecendo à sua elevada categoria de corpos divinos, eternos e imutáveis.

Nesse contexto, Platão formulou a principal pergunta de natureza empírica, que tornou o conhecido fato celeste do fenômeno de retrogradação dos planetas, o problema mais

importante da astronomia, no contexto da tradição de pesquisa grega antiga: *Quais são os movimentos circulares uniformes ordenados que possam ser tomados como hipóteses, para explicar os movimentos aparentes dos planetas?* (Ibid., p. 23).

Considerando a forma e a suposição desse problema empírico, muitos historiadores da ciência consideram que as tentativas de explicar o movimento retrógrado dos planetas, em termos do movimento circular uniforme, materializaram-se em um dogma da prática astronômica, por mais de dois mil anos. Essas tentativas constituíram-se no que se convencionou chamar de prática astronômica instrumentalista para “salvar as aparências” dos fenômenos celestes. No entanto, destaca-se que “a expressão salvar as aparências [...] não é encontrada em Platão, mas ele se refere a salvar a provável explicação” (AITON, 1981, p. 78).

Em contrapartida, o mais importante dessa ideia é que os astrônomos gregos foram buscar suas hipóteses em uma base sobre a qual as “aparências”, por exemplo, sobre o fenômeno de retrogradação pudessem ser salvas (KOESTLER, 1989). Desse modo, o significado original de tão ominosa frase, “salvar as aparências”, está ligado ao “dever de uma teoria fazer justiça aos fenômenos observados, ou “aparências”, em outras palavras, concordar com os fatos” (Ibid., p. 43). Isso por que,

O astrônomo “salvava” os fenômenos, quando conseguia imaginar uma hipótese que resolvesse os movimentos irregulares dos planetas ao longo das órbitas circulares, **pouco importando se a hipótese fosse verdadeira ou não**, isto é, que fosse fisicamente possível ou não. (KOESTLER, 1989, p. 43, grifo do autor)

Isso implica dizer que nessa tradição de pesquisa da astronomia matemática instrumentalista, alguns astrônomos não se preocupavam com as causas físicas desses fenômenos, nem com a realidade física de seus constructos (conceitos de epiciclo, equante e excêntrico). Particularmente, depois de Aristóteles – o filósofo que se preocupou com esses pontos e lançou os fundamentos da astronomia física – até o advento do sistema astronômico copernicano, por exemplo, a astronomia tornou-se uma geometria-celeste abstrata, divorciada da realidade física (KUHN, 1990).

O principal foco do pensamento astronômico e cosmológico grego centrava-se em “explicar os escândalos dos movimentos não circulares no firmamento, que na prática serviam como método para o cálculo de tabelas dos movimentos do Sol, da Lua e dos planetas” (KOESTLER, 1989, p. 43), porém nada dizia quanto à natureza do universo. Acerca disso, no século II d. C., o próprio Ptolomeu deixou uma opinião bem explícita:

Creemos que o objetivo que o astrônomo deve tentar atingir é este: demonstrar que todos os fenômenos do firmamento são produzidos por movimentos uniformes e circulares [...] Tendo-nos proposto a tarefa de provar que as irregularidades aparentes dos cinco planetas, do Sol e da Lua podem ser representados por meio de movimentos circulares e uniformes, por somente tais movimentos serem adequados à divina natureza deles [...], podemos considerar a realização dessa tarefa como fim último da ciência matemática baseada na filosofia. (KOESTLER, 1989, p. 43)

A principal razão de se tomar esse caminho perpassou pela crença na ideia de que “os corpos celestes, sendo de natureza divina, obedeciam a leis diferentes das encontradas na Terra” (Ibid., p. 43). Essa situação exigia hipóteses que salvassem as aparências, mas também respeitassem, como axioma, os princípios físicos do movimento circular uniforme. Por essa razão, a prática da astronomia matemática instrumentalista se desenvolveu e determinou os rumos da astronomia e da cosmologia, desde os gregos até o século XVII.

Portanto, nos contextos investigativos dos séculos XVI e XVII, nos quais ocorreram muitas mudanças (social, científica, filosófica, cultural, política, econômica e religiosa), será possível mostrar mais um *vínculo epistemológico* com um quarto aspecto, característica, princípio da natureza da ciência, enfatizando que “as ideias científicas são afetadas por seu meio social e histórico” (MCCOMAS; ALMAZROA; CLOUGH, 1998, p. 513), surgindo novos compromissos metodológicos e ontológicos, que guiaram a prática e o crescimento do pensamento científico, para além de suas origens gregas (KOYRÉ, 2002).

O surgimento desses novos compromissos permitiu Johannes Kepler (1571 - 1630) romper com a perspectiva investigativa da *astronomia matemática instrumentalista*, especialmente, com a premissa fundamental sobre o movimento circular uniforme. Kepler conseguiu, empiricamente, associar órbitas elípticas ao movimento planetário, particularmente, de Marte, em detrimento da órbita circular preconizada pela prática astronômica e cosmológica. Para chegar nesse novo momento histórico, é importante exemplificar (na próxima seção) os tipos de *problemas empíricos que receberam o status de não resolvidos, por mais de dois mil anos* (KUHN, 1990; LAUDAN, 2011).

#### **4.3.2 Os Problemas Empíricos Astronômicos e Cosmológicos da TPGA**

A partir dos dados herdados dos babilônios, alguns fenômenos relativos ao plano celestes eram de conhecimento dos filósofos, matemáticos e astrônomos gregos. Particularmente, sabia-se que os cinco planetas, incluindo a Lua, concebida como tal, apresentavam um comportamento semelhante ao movimento do Sol, porém um pouco mais

complexo (KUHN, 1990). Por exemplo, esses corpos celestes eram observados com movimentos diurnos para o ocidente, em relação às estrelas fixas, movendo-se gradativamente para o leste, até regressarem, aproximadamente, para suas posições de origem. No curso de seus movimentos, os planetas se mantinham próximos da eclíptica, mas vagavam ora para o norte deste, ora para o sul, porém raramente se afastavam da zona do zodíaco.

À semelhança do movimento do Sol, os planetas apresentavam certas irregularidades. As observações das fases da Lua mostravam que esse corpo celeste se movia pela eclíptica mais rapidamente do que o Sol. Em seu percurso, a Lua completava uma volta através do zodíaco em um tempo médio de vinte sete dias, mas com uma diferença de sete horas em relação ao tempo médio estimado. Outro aspecto importante era a forma como seu disco variava visivelmente ao longo do percurso (quadros superiores de 1 a 8 da Figura 6).

Figura 6 – As fases da Lua.



Fonte: adaptada de Chastenay (2016, p. 58).

Como ilustrado na Figura 6, cada ciclo lunar levava em média um mês, mostrando-se regular tal como a viagem da Lua através do zodíaco. Porém, os dois ciclos lunares (cheia e nova) eram observados com uma diferença significativa. Por exemplo, a Lua nova reaparecia em média a cada vinte e nove dias e meio, mas os ciclos individuais diferiam dessa média, quase meio dia. Isso significava dois dias a mais do que o período de uma viagem média ao longo do zodíaco.

As sucessivas posições da Lua nova entre as constelações deslocavam-se cada vez mais para leste. Por exemplo, se a fase nova ocorresse num determinado mês, em um ponto do equinócio da primavera, passados vinte e sete dias e um terço, ela voltava a passar por esse ponto, porém em fase decrescente. Nesse percurso, a fase nova não aparecia até que se passassem dois dias – altura na qual esses diâmetros se deslocavam quase trinta graus para leste do equinócio. Esse destaque para o movimento irregular da Lua, em relação ao Sol, é o primeiro exemplo de um problema empírico não resolvido relacionado aos planetas, cujos

movimentos eram sintetizados em tabelas astronômicas babilônicas (KUHN, 1990). Como um fato celeste importante para a confecção dos calendários lunares, sabe-se que:

[...] a visibilidade das fases da Lua forneceram as mais antigas de todas as unidades do calendário. Formas primitivas tanto da semana, quanto do mês aparecem no calendário da Babilônia desde o terceiro milênio antes de Cristo. Calendário este em que cada mês começava com a primeira aparição do quarto crescente e era subdividido no 7º, 14º e 21º dias pelo aparecimento dos “quartos” do ciclo da Lua. (KUHN, 1990, p. 66)

Gradualmente, os babilônios adquiriram uma precisão notável sobre os conhecimentos dos períodos do Sol, da Lua e dos cinco planetas, posto que eles utilizavam os ciclos da Lua nova, “quarto crescentes” e “quarto minguantes”, para medir os intervalos de tempo (KUHN, 1990). O calendário babilônico tinha um ciclo de doze meses, no qual cada mês lunar ou sinódico (intervalo de tempo entre duas Luas cheias ou duas Luas novas) tinha, aproximadamente, vinte nove dias e meio. Esse valor de dias multiplicados por doze, correspondem a trezentos e cinquenta e quatro dias, isto é, a duração do ano lunar babilônico.

Apesar dos babilônios serem capazes de prever as posições desses corpos entre as estrelas e a recorrência, por exemplo, de eclipses lunares, a formulação de uma teoria geométrica dos movimentos celestes somente surgiu no contexto investigativo grego. Por conseguinte, esse surgimento de uma teoria no contexto científico grego denota um caráter muito intrínseco da ciência ocidental, que se originou na Grécia Antiga.

Nesse sentido, mais um *vínculo epistemológico* pode ser feito com mais um aspecto, característica, princípio da natureza da ciência, que perpassa pelo papel fundamental das “teorias na ciência como uma tentativa de explicar e prever os fenômenos naturais” (MCCOMAS; ALMAZROA; CLOUGH, 1998, p. 513), evidenciando a importância da criatividade dos/as cientistas na proposição das teorias científicas. Para substantivar o papel das teorias e da criatividade científica, como saberes metacientíficos da ciência, o historiador da ciência, Alexandre Koyré (1892 - 1964) afirmou o seguinte:

[...] se a previsão e a predição equivalem à ciência, nada é mais científico do que a astronomia babilônica. Mas se vir no trabalho científico, sobretudo, um trabalho teórico e se acreditar – como é meu caso – que não há ciência onde não há teoria, rejeitar-se-á a ciência babilônica, para dizer que a cosmologia científica dá seus primeiros passos na Grécia, pois foram os gregos que, pela primeira vez, conceberam e formularam a exigência intelectual do saber teórico: preservar os fenômenos, isto é, formular uma teoria explicativa do dado observável, algo que os babilônios jamais fizeram. (KOYRÉ, 1982, p. 85)

Do exposto, à medida que as civilizações foram progredindo e revelando mais um aspecto, característica, princípio da natureza da ciência, “como parte das tradições sociais e culturais” (MCCOMAS; ALMAZROA; CLOUGH, 1998, p. 513), os astrônomos e matemáticos tentaram rapidamente “organizar estas unidades fundamentais em um calendário duradouro coerente – um que permitisse a compilação de registros históricos e a preparação de contratos para serem cumpridos em datas futuras específicas” (KUHN, 1990, p. 67). Por isso, “somente uma teoria matemática complexa, exigindo gerações de observações sistemáticas e estudos, podia determinar a duração de um futuro mês específico” (Idem).

Entretanto, a simples unidade lunar provou ser inviável, pois “Luas novas ou cheias sucessivas podiam estar separadas tanto de 29 dias quanto de 30 dias” (Idem). Aliado a isso, estava a incomensurável duração da medida dos ciclos lunares e solares que exigia um ajuste preciso dos calendários “às variações climáticas anuais governadas pelo Sol e, para este fim, alguns métodos sistemáticos deviam ser criados para inserir, um mês ocasional de trinta dias, em um ano (354 dias) básico de 12 meses lunares” (Idem). Esses foram “os primeiros problemas técnicos difíceis encontrados pela antiga astronomia, que, acima de todos, foram responsáveis pelo surgimento de muitas observações e teorias planetárias” (Idem).

Essas necessidades nos estudos de calendários tornaram-se uma exigência tão importante para o desenvolvimento da astronomia, que o próprio Copérnico, no século XV, considerou que, para sanar esses problemas técnicos, era imprescindível uma profunda reforma na própria astronomia (COPÉRNICO, 1984).

Com esses problemas técnicos da confecção de calendário, encontrava-se o problema empírico não resolvido mais importante, isto é, o fenômeno de retrogradação dos cinco planetas (Saturno, Júpiter, Marte, Mercúrio e Vênus). Sobre o movimento dos cinco planetas, ao contrário do movimento da Lua e do Sol, eles apresentavam os aspectos que se seguem.

**Primeiro**, eram observados aparecendo no céu, como simples pontos luminosos. **Segundo**, eles só conseguiam ser distinguidos das estrelas por uma série de observações, que revelavam seus movimentos graduais à volta da eclíptica. **Terceiro**, normalmente, eram vistos se deslocando para leste através das constelações, com um movimento denominado de *movimento normal*. **Quarto**, em média, tanto Mercúrio quanto Vênus precisavam de um ano para dar uma volta completa no zodíaco. **Quinto**, a duração média do ciclo de Marte registrada, era de seiscentos e oitenta e sete (687) dias.

**Sexto**, o período médio de Júpiter necessário era de doze (12) anos, enquanto o período de Saturno era de vinte e nove (29) anos. **Sétimo**, em todos os casos, o tempo

necessário para uma única viagem podia ser muito diferente do período médio. **Oitavo**, mesmo quando os planetas se deslocavam para leste, através das estrelas, eles não mantinham um percurso uniforme, nem seus movimentos eram uniformes para leste. E **nono**, o movimento normal de todos os planetas, exceto o do Sol e o da Lua, era ocasionalmente interrompido por breves intervalos de deslocamentos para oeste ou *movimento retrógrado* (ver KUHN, 1990, p. 67-68).

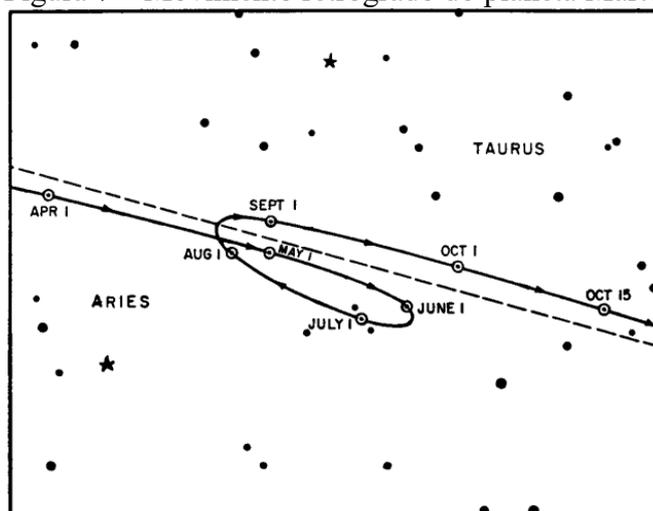
O número de ciclos de retrogradação, compreendidos como *anomalias* de cada planeta, bem como o número de rotações siderais (retorno ao mesmo ponto do zodíaco), contemplando certo número de anos, foi registrado também pelos babilônios. Para cada planeta, tinha-se: Saturno, 256 anomalias e nove rotações em 265 anos; Júpiter, 391 anomalias e 36 rotações em 427 anos; Marte, 133 anomalias e 151 rotações em 284 anos; Vênus, 720 anomalias e 1151 rotações em 1151 anos; Mercúrio, 1.513 anomalias e 48 rotações em 480 anos (LOPES Maria, 2001).

Posteriormente, esses registros foram utilizados e melhorados pelos astrônomos gregos, Hiparco de Nicéia (190-120 a. C.) e Claudio Ptolomeu (100-168 d. C.). Em particular, Hiparco foi responsável por descobrir o fenômeno da precessão dos equinócios – variação das distâncias das estrelas fixas com respeito aos equinócios.

Esse astrônomo descobriu, em 129/128 a. C., a precessão dos equinócios, comparando a determinação da longitude de certas estrelas, com a determinação realizada pelo astrônomo Timocharis de Alexandria (320-260 a. C.), provavelmente entre 283/295 a. C. Por essa comparação, Hiparco percebeu que a distância entre a estrela Spica (conjunto binário mais brilhante da constelação de Virgem) e o ponto do equinócio de outono havia diminuído dois graus (2°), durante cento e cinquenta anos, tempo que separavam suas observações das realizadas por Timocharis (ÉVORA, 1993).

Retornando para o problema empírico do movimento retrógrado dos planetas, sua melhor exemplificação encontra-se no movimento do planeta vermelho, Marte. A retrogradação do seu movimento (Figura 7), ao passar pela constelação de Touro, foi identificada. Em seu movimento normal (de leste para oeste), ao entrar no diagrama (ponto APRI – mês de abril, linha cheia) e percorrer a eclíptica (linha tracejada) passando pelo ponto (JUNE I – mês de junho), Marte sofria uma mudança de direção, deslocando-se em sentido contrário ao movimento inicial (KUHN, 1990; Évora, 1993).

Figura 7 – Movimento retrógrado do planeta Marte.



Fonte: Kuhn (1990, p. 68).

Com base no diagrama da Figura 7, em sua trajetória, o planeta vermelho permanecia sobre a eclíptica e, além disso, embora seu movimento fosse para leste, entre as estrelas fixas, havia um período entre o mês de junho até o início de agosto, durante o qual ele se deslocava para oeste. Com isso, seu retrocesso ocorria, aproximadamente, sempre em uma mesma data e zona celeste. Adiantando bastante no tempo, destaca-se que, os resultados do estudo do problema anômalo da órbita desse planeta, em especial, por Kepler, no início do século XVII, implicaram na extinção do dogma do movimento circular uniforme. Em comparação ao movimento de retrogradação de Marte, os outros planetas se comportavam de forma quase idêntica, pois repetiam o intervalo de seus movimentos após um período de duração fixa. Mercúrio, por exemplo, invertia seu movimento através das estrelas fixas, uma vez a cada cento e dezesseis dias.

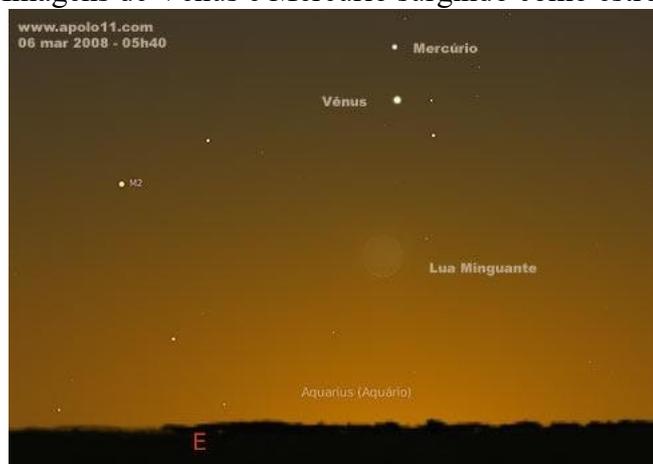
Enquanto isso, Vênus retrocedia uma vez a cada quinhentos e oitenta e quatro dias. Já Saturno, Júpiter e o próprio Marte realizavam seus movimentos retrógrados, respectivamente, a cada trezentos e setenta e oito dias, trezentos e noventa e nove dias e setecentos e oitenta dias (KUHN, 1990). Em seus movimentos graduais para leste, interrompidos por um período de retrocesso para oeste, esses cinco planetas se comportavam de modo muito semelhante. Além desse fenômeno de retrogradação, duas características em seus movimentos os dividiam em dois grupos. A primeira delas é a correlação entre os dois planetas interiores (Mercúrio e Vênus), que nunca se afastam muito do Sol. Por exemplo, Mercúrio encontra-se sempre no interior de um raio de distância do Sol, cerca de vinte e oito

graus. A segunda diz respeito ao afastamento máximo de Vênus, isto é, cerca de quarenta e cinco graus (ÉVORA, 1993).

Por essas duas características, esses dois planetas internos se moviam no lento e contínuo vaivém para trás e para frente, cruzando o movimento do Sol. Eles eram vistos primeiro deslocando-se para leste com o Sol e depois retrocedendo e cruzando o disco solar. Na posição leste, em relação ao Sol, qualquer um deles podia aparecer como *estrela da tarde*, sendo visível pouco depois do pôr do Sol e depois rapidamente seguia para baixo do horizonte.

Ao retroceder para a posição oeste, cruzando o disco solar, eles eram visto como *estrela da manhã*, aparecendo pouco antes da aurora e desaparecendo com a luz brilhante do nascer do Sol. Até os movimentos de Mercúrio e Vênus serem analisados em relação à esfera das estrelas, nenhum deles foi reconhecido como sendo o mesmo corpo celeste que aparecia como *estrela da manhã* ou *estrela da tarde* (Figura 8), a seguir. Esse era outro problema de natureza empírica que tinha de ser solucionado pelos modelos cosmológicos e teorias planetárias elaboradas no contexto da tradição de pesquisa grega antiga.

Figura 8 – Imagens de Vênus e Mercúrio surgindo como estrelas da tarde.



Fonte: Apolo11.com.

Frente à complexidade dos movimentos planetários, três perguntas, cujas formas e suposições materializam mais alguns problemas empíricos, foram responsáveis por indicar a direção da maior parte das investigações astronômicas e cosmológicas, desde Platão ao advento da astronomia copernicana. Por exemplo: (1) *Como se consegue reduzir o complexo e variável movimento planetário a uma simples ordem?* (2) *Por que os planetas retrocedem?* (3) *Como explicar os percursos irregulares dos seus movimentos normais?* (KUHN, 1990, p.

70). Pelas suposições desses problemas empíricos, os astrônomos e cosmólogos deveriam não somente explicar a existência de um movimento para leste, através das estrelas fixas, mas também precisavam estabelecer com precisão a posição que cada planeta ocupava entre as estrelas, em dias, meses e anos diferentes, durante um longo período de tempo (KUHN, 1990).

De acordo com Kuhn, “o verdadeiro problema dos planetas, o que por fim levou à “Revolução de Copérnico”, foi o problema quantitativo descrito em longas tabelas que especificavam, em graus e minutos, a variação da posição de todos os planetas” (Ibid., p. 70). Em face desse problema, a tarefa mais importante, desde os astrônomos antigos até Copérnico, foi a de: (1) oferecer uma explicação sobre o movimento retrógrado dos planetas; (2) explicar por que Vênus e Mercúrio sempre são vistos nas proximidades do Sol; (3) explicar por que Marte, Júpiter e Saturno podem ser vistos em oposição ao Sol; e (4) explicar a ordem de afastamento dos planetas com relação ao Sol. Essas tarefas se tornaram pertinentes, justamente, devido aos seguintes fatos celestes:

Ao contrário de Mercúrio e Vênus, os planetas superiores Marte, Júpiter e Saturno, não estão restritos à mesma zona do céu que o Sol. Por vezes, estão muito perto ou em “conjunção” com ele; outras vezes estão a  $180^\circ$  em oposição ao Sol; entre estas ocasiões, assumem todas as posições intermediárias. Mas, embora as suas posições não sejam restritas, seus comportamentos dependem das suas relações em oposição. Também, quando em movimento retrógrado, em relação ao Sol, os planetas superiores aparecem mais brilhantes do que em qualquer outra altura. Este aumento de brilho, que normalmente tem sido interpretado (pelo menos desde o século IV a. C.) como indicando uma diminuição da distância em relação a Terra, é particularmente mais evidente imperceptível, Marte quando em oposição, muitas vezes, ilumina todos os corpos celestes do céu noturno, com exceção da Lua e de Vênus. (KUHN, 1990, p. 70).

Portanto, são esses os *fatos celestes* que se tornaram os *problemas empíricos não resolvidos* mais importantes da tradição de pesquisa grega antiga. Nesse sentido, compreender como o pensamento científico ocidental se mobilizou, por meio dos modelos cosmológicos e das teorias planetárias, para encontrar a solução desses problemas, consistirá na meta dos próximos três capítulos 5, 6 e 7. Além disso, esses fenômenos, como problemas empíricos, representam os assuntos/temas referendados pelos documentos oficiais da educação brasileira (BRASIL, 2018) e pela literatura de ensino de ciências e de física como imprescindível para a compreensão estudantil da relação Terra-Universo. Em razão disso, no contexto da tradição de pesquisa grega antiga, esses assuntos/temas podem ser contextualizados por meio da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física e, com isso, serem preenchidos de

significado histórico e contextual. Acerca dos capítulos, no quinto, procura-se estabelecer a relação dialética entre esses problemas e a *teoria planetária das esferas concêntricas* de Eudoxo de Cnido que, juntamente com o modelo cosmológico de Aristóteles, produziram os problemas conceituais internos e os problemas externos da tradição de pesquisa grega.

No sexto, continuar essa dialética, atentando-se para os modelos cosmológicos de Heráclides de Ponto (387 - 310 a. C.) e de Aristarco de Samos (310 - 230 a. C), e um adendo histórico ao trabalho de Eratóstenes de Cirene (276 - 194 a. C), que mediu o diâmetro da *Terra*, com uma precisão admirável. E ressaltar a importância da Biblioteca de Alexandria e o protagonismo feminino representado por Hipátia de Alexandria (370 - 415 d. C), a primeira mulher filósofa, professora e também Diretora da Biblioteca de Alexandria (FONSECA, 2013). No sétimo, mostrar como a tradição de pesquisa grega antiga alcançou seu apogeu com a solução dos problemas empíricos, mediante as teorias planetárias de Apolônio de Perga (262 - 194 a. C.) e Cláudio Ptolomeu (100 - 168 d. C.), juntamente com as contribuições astronômicas de Hiparco de Nicéia (190 - 120 a. C), incluindo a distinção entre as correntes de pensamento instrumentalista e realista. Nesses contextos, continuar com a construção dos vínculos epistemológicos com os aspectos, características, princípios da natureza da ciência.

## 5 A ORIGEM DOS PROBLEMAS CONCEITUAIS INTERNOS E EXTERNOS DA TPGA

Para dar continuidade à exploração da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, neste capítulo, procura-se situar a origem dos problemas conceituais internos e conceituais externos da tradição de pesquisa grega antiga, a partir da dialética básica entre a busca de solução dos problemas empíricos e a elaboração dos modelos cosmológicos e das teorias planetárias. Em outras palavras, tentar compreender, de que forma, esses problemas conceituais estão ligados a esses modelos e teorias.

### 5.1 A TEORIA PLANETÁRIA DAS ESFERAS CONCÊNTRICAS DE EUDOXO

Eudoxo de Cnido (408-355 a. C.), natural da cidade de Cnido, costa ocidental da Ásia Menor, foi um “astrônomo, geômetra, médico e legislador grego eleito pelo voto popular” (LAÉRCIO, 1792, p. 230). Suas contribuições intelectuais revestem-se de máxima importância para o crescimento cognitivo do pensamento científico ocidental, por ser de sua autoria, a primeira teoria planetária elaborada para resolver os problemas empíricos da tradição de pesquisa grega antiga. Ao mesmo tempo, esse trabalho de Eudoxo deu início concreto ao desenvolvimento da perspectiva investigativa da astronomia matemática instrumentalista projetada por Platão.

Nesse contexto, na geometria, Eudoxo foi aluno de um famoso discípulo de Filolau, Arquitas de Tarento (428 - 347 a. C.). Sob essa tutela, os ensinamentos de Arquitas permitiram os conhecimentos necessários para Eudoxo elaborar a teoria matemática das proporções. Essa teoria foi tanto aplicada nas quantidades matemáticas incomensuráveis e comensuráveis, quanto serviu de base conceitual para os *Elementos de Euclides*, Livro V (LAÉRCIO, 1792; HEATH, 2004).

De mesmo modo, ela permitiu aos gregos salvar a geometria do impasse causado pela descoberta dos números irracionais. Nessa época, a única teoria das proporções disponível para a demonstração geométrica, era a antiga teoria pitagórica, que somente se aplicava a magnitudes comensuráveis (HEATH, 2004).

Eudoxo também foi responsável por desenvolver o poderoso *método da exaustão*, que permitiu não somente obter as áreas dos círculos e os volumes de pirâmides, cones, esferas, mas também se constituiu como fundamento dos desenvolvimentos matemáticos de

Arquimedes e suas figuras planas e sólidas. Esse *método de exaustão* também pode ser compreendido como os primórdios do *cálculo integral* (HEATH, 2004).

Detentor de notável conhecimento matemático, aos 23 anos, Eudoxo foi para Atenas para assistir as palestras filosóficas de Platão. Posteriormente, por sua relação próxima com esse filósofo, Eudoxo tornou-se diretor da *Academia de Platão*, por algum tempo. Nesse período, entrou em contato com Aristóteles, que, à época, era um jovem de dezessete anos, recém-chegado a essa academia (MESQUITA, 2005). Destaca-se que, em um futuro próximo, Aristóteles veio a incorporar as ideias da teoria das esferas concêntricas de Eudoxo em seu modelo cosmológico.

Quando Eudoxo retornou de Atenas, ele construiu em Cnido um observatório próprio, para observar a *estrela canopus*, a mais brilhante da constelação de Carina. Seu outro feito reside na descoberta do ano tropical de 365 dias e 6 horas. Sabe-se também que Eudoxo viajou para o Egito, ficando lá por dezesseis meses, tempo que assimilou o conhecimento astronômico dos sacerdotes e também fez observações astronômicas (LINTON, 2004).

Depois disso, retornando para Cnido, fundou uma grande escola. Por seu notável conhecimento, Eudoxo foi engenhoso o suficiente para criar a primeira hipótese geométrica que tentava explicar os movimentos dos planetas, feito não creditado a nenhum outro pensador de sua época (HEATH, 2004).

De acordo com Linton (2004), certamente, a descoberta da natureza esférica da Terra, bem como as ideias sobre os movimentos circulares uniformes, ensinados por seu mestre Arquitas, pode ter sugerido a Eudoxo que o movimento das estrelas e dos planetas, poderia ser modelado por meio de um sistema de esferas concêntricas, com a Terra no centro do universo. Por consequência, sua teoria planetária marcou o começo de um longo período de desenvolvimento da tradição de pesquisa grega antiga, via astronomia matemática, culminando no trabalho de Ptolomeu, 500 anos depois (LINTON, 2004).

Pontua-se que sua obra, *On Sphaeric – Sobre as esferas –*, contemplando sua teoria planetária, não sobreviveu ao tempo. Por isso, seus relatos históricos são extraídos de obras de pensadores antigos, como Aristóteles (*Metafísica e De Caelo*) e Simplicio Cilícia (560 - 490 d. C.), 900 anos depois de Eudoxo. Isso implica dizer que as informações fornecidas por Aristóteles e Simplicio não proporcionam uma imagem clara e fiel da reconstrução da teoria de Eudoxo, mas são as mais aceitas atualmente (LINTON, 2004).

Em conformidade, historiadores do final do século XIX, mediante esses relatos, reconstruíram o mecanismo matemático completo dessa primeira teoria planetária. Por

consequente, no século XX, outras contribuições para essa primeira reconstrução foram dadas por Otto Neugebauer (1983), um historiador da ciência grega antiga.

No final dos anos de 1990 e início da década 2000, uma reconstrução alternativa a do século XIX, também foi apresentada pelo historiador da ciência Ido Yavetz (1998; 2001). Contudo, destaca-se que a abordagem, a seguir, tomou como referências os trabalhos de Linton (2004), Neugebauer (1983), Velásquez-Toribio e Oliveira (2019).

### 5.1.1 Os Relatos de Aristóteles e de Simplicio Sobre a Teoria Planetária de Eudoxo

A elaboração da teoria das esferas concêntricas de Eudoxo tinha como foco principal a solução do problema empírico do movimento retrógrado dos planetas. Esse problema foi equacionado por duas perguntas complementares, formuladas por Platão, a saber: *Quais são os movimentos circulares uniformes ordenados que possam ser tomados como hipóteses, para explicar os movimentos aparentes dos planetas? Como se consegue reduzir o complexo e variável movimento planetário a uma simples ordem?*

Frente a essas duas perguntas, nos escritos aristotélicos, Livro VII – Dos astros e dos movimentos do céu – obra *Metafísica*, Aristóteles afirmou o seguinte:

Eudoxo explicou o movimento do Sol e da Lua, admitindo três esferas para cada um desses dois astros. A primeira consistia na das estrelas fixas; a segunda seguia o círculo que passa no meio do Zodíaco, e a terceira esfera era a que estava inclinada em toda largura do Zodíaco. O círculo que segue a terceira esfera da Lua é mais inclinado do que a terceira esfera do Sol. Ele colocava o movimento de cada um dos planetas em quatro esferas. A primeira e a segunda eram as mesmas que a primeira e a segunda, do Sol e da Lua, porque a esfera das estrelas fixas imprimia o movimento para todas as esferas, e a esfera que está abaixo dela, cujo movimento segue o círculo que passa pelo meio do Zodíaco, é comum a todos os astros. A terceira esfera dos planetas tem seus polos no círculo que passa pelo meio do Zodíaco, e o movimento da quarta esfera seguia um círculo oblíquo ao círculo médio da terceira. A terceira esfera tem polos particulares para cada planeta; mas os de Vênus e Mercúrio eram os mesmos. (ARISTÓTELES, 1875, p. 355-356, tradução própria)

Nessa afirmação, destacam-se três pontos importantes: (i) o movimento dos planetas, com a clara definição das quatro esferas, sendo as duas primeiras usadas de modo semelhante às esferas do Sol e da Lua, para explicar seus movimentos diários com a primeira, e os movimentos anuais com a segunda; (ii) Aristóteles não menciona o movimento retrógrado dos planetas; e (iii) os planetas internos Mercúrio e Vênus possuem em comum o eixo da terceira esfera. Uma vez que, em seus movimentos aparentes, vistos da Terra, esses planetas não se afastam muito entre si, à semelhança da trajetória do Sol ao longo da eclíptica.

Não obstante à falta de explicitação do ponto (ii) na obra *Metafísica*, que omite em parte o objetivo da teoria de Eudoxo, em seus relatos, Simplicio foi bastante claro. Como comentador da obra aristotélica, *De Caelo*, Simplicio afirmou que:

Eudoxo de Cnido foi o primeiro dos gregos a se preocupar com hipóteses desse tipo, tendo Platão [...], colocado um problema para todos os estudantes sérios deste assunto, qual seja, encontrar quais são os movimentos uniformes e ordenados, pelo pressuposto de que os fenômenos em relação aos movimentos dos planetas podem ser salvos. (LINTON, 2004, p. 26, tradução própria)

Explicitando também a terceira e quarta esferas presentes na teoria de Eudoxo, Simplicio argumentou que:

A terceira esfera, que tem seus polos no grande círculo da segunda esfera, que passa pelo meio dos signos do Zodíaco, e que gira do sul ao norte e do norte ao sul, se movimenta também com a quarta esfera, sendo que o planeta também está ligado a quarta esfera. Além disso, será a causa do movimento do planeta na latitude. Se considerarmos o movimento do planeta unicamente sobre a terceira esfera, ele poderia chegar aos polos do círculo do Zodíaco, e se aproximaria dos polos do Universo; no entanto, como são as coisas, a quarta esfera gira sobre os polos do círculo inclinado, com respeito à terceira esfera, no sentido oposto, isto é, de Leste para o Oeste, mas no mesmo período, o que impedirá qualquer divergência considerável (por parte do planeta) sobre o círculo do Zodíaco e fará com que o planeta descreva sobre este mesmo círculo, do Zodíaco, a curva chamada por Eudoxo de hipópede; de modo que, a amplitude desta curva será a quantidade (máxima) do desvio aparente do planeta na latitude, uma visão pela qual Eudoxo foi atacado. (HEATH, 2004, p. 221 *apud* VELÁSQUEZ-TORIBIO; OLIVEIRA, 2019, p. 5).

Nessa exposição, fica evidente a forma como a teoria de Eudoxo tenta explicar o movimento retrógrado dos planetas. Para tanto, evoca-se o postulado de um movimento contrário entre a terceira e a quarta esfera, mais a figura geométrica *hipópede*, associada a esse movimento. Por outro lado, Simplicio não somente fez um bom relato sobre essa teoria, como também apresentou algumas observações críticas acerca da regularidade das esferas concêntricas.

Apesar dos 900 anos que o separa de Eudoxo, Simplicio observou que no modelo preconizado por essa teoria, os corpos celestes apresentavam movimentos uniformes sobre as esferas, com distâncias fixas. Algo que não é consistente como as observações, pois esses corpos celestes, vistos da Terra, de tempos em tempos, variam a intensidade aparente do seu brilho, que já era associado, por alguns filósofos, à distância das órbitas planetárias.

Sobre suas considerações críticas, Simplicio questionou a teoria de Eudoxo da seguinte maneira:

[...] quero dizer é que às vezes os planetas parecem ficar pertos, e outras em que parecem ficar longe. E no caso de alguns, isso é aparente a simples vista. Pois as estrelas que chamamos Vênus e também a que chamamos Marte, parecem muitas vezes maiores quando estão na metade de suas retrogradações, de forma que nas noites sem Lua, Vênus provoca que os corpos projetem sombras. (HEATH, 2004, p. 221 *apud* VELÁSQUEZ-TORIBIO; OLIVEIRA, 2019, p. 5).

Do exposto sobre o planeta Vênus, observa-se que Simplicio acreditava que este tinha luz própria. Ideia que será desmistificada em um futuro distante, com as observações telescópicas de Galileu, no século XVII, mediante o estudo das fases desse planeta.

No entanto, no que confere à teoria de Eudoxo, a crítica de Simplicio foi contundente, pois, considerando o Sol uma fonte luminosa e os planetas refletores da luz solar, eles deveriam apresentar mudanças de brilho, como consequência de suas diferentes posições relativas entre a Terra e o Sol. Por isso, ao postular os movimentos circulares uniformes sobre as esferas com distâncias fixas, essa teoria planetária não dava conta de solucionar o problema empírico do brilho aparente dos planetas.

Em outro relato curto, na obra *Metafísica*, encontra-se o acréscimo de mais esferas na teoria original de Eudoxo, realizado por seu discípulo, Calipo Cyzicus (370 -310 a. C.), que acreditava ser necessário para solucionar os mesmos fenômenos celestes. Acerca disso, Aristóteles (1875) escreveu:

A posição das esferas, isto é, a ordem de suas distâncias respectivas, era no sistema de Calipo o mesmo que no sistema de Eudoxo. Quanto ao número de esferas, estes dois matemáticos estavam em acordo em relação a Júpiter e Saturno; mas Calipo acreditava que era preciso adicionar outras duas esferas a do Sol e duas a da Lua, e uma a cada um dos outros planetas. (ARISTÓTELES, 1875, p. 356, tradução própria)

A soma total dessas esferas constituiu-se em trinta e seis esferas, em relação as vinte e sete da estrutura original da teoria de Eudoxo. Contudo, Aristóteles não deu detalhes de como elas foram geometricamente inseridas, tampouco como foram utilizadas nas explicações. Por outro lado, isso revela que a teoria das esferas concêntricas não deu conta de solucionar os problemas empíricos da tradição de pesquisa grega antiga.

Em função disso, somente com as construções geométricas posteriores, é possível acessar essas dificuldades, no sentido de compreendê-las como os primeiros problemas conceituais internos astronômicos e cosmológicos dessa tradição de pesquisa.

### 5.1.2 Os PCI Implicados na Teoria Planetária de Eudoxo

Para solucionar os problemas empíricos ligados ao movimento da Lua, do Sol e dos cinco planetas, Eudoxo supôs que cada um dos astros ocupava sua própria esfera, na qual era anexada uma esfera maior girando em torno de outros polos. Nesse esquema, uma terceira e quarta esferas eram adicionadas, com cada uma girando em diferentes taxas de velocidades, mas em diferentes eixos, em conformidade com as necessidades matemáticas.

Como observado em Aristóteles e Simplicio, Eudoxo usou três esferas para o Sol, três para a Lua e quatro esferas para cada um dos cinco planetas. Incluindo a esfera das estrelas fixas, o seu sistema comportava um total de vinte e sete esferas concêntricas (LINTON, 2004).

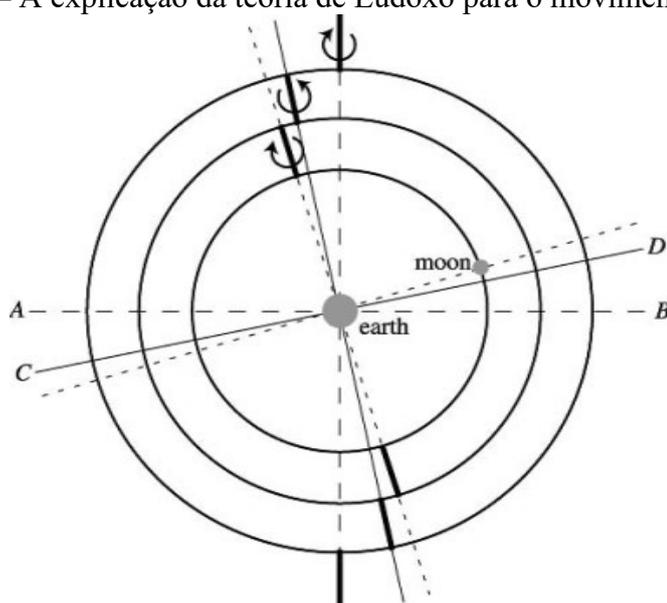
Em cada caso, a primeira esfera executa exatamente a mesma função, que é girar uma vez a cada 24 horas, para explicar a rotação diária do céu, por cada astro: o fenômeno do movimento diurno. Com isso, “os movimentos do Sol, da Lua e dos cinco planetas, em relação às estrelas fixas, foram realmente modelados usando apenas dezenove movimentos circulares uniformes” (LINTON, 2004, p. 26). Uma solução aceitável para a pergunta de Platão: *Como se consegue reduzir o complexo e variável movimento planetário a uma simples ordem?*

Não obstante a isso, por Aristóteles ter incorporado as ideias de Eudoxo em seu pensamento cosmológico, não existem evidências históricas acerca de Eudoxo ter pensado nessas esferas como entidades físicas reais. Ou ainda, que as tenha admitido apenas como construções puramente matemáticas.

Esse ponto de destaque permitirá, mais a frente, distinguir as preocupações teóricas da astronomia matemática instrumentalista iniciada por Platão, da astronomia física, que vai surgir com a visão cosmológica de Aristóteles, ao admitir a realidade física das esferas celestes de Eudoxo.

Dando continuidade, encontra-se primeiro na teoria de Eudoxo, a explicação do **movimento da Lua**, cujo percurso através da eclíptica sofria um desvio um pouco acima dela – esquema da (Figura 9, a seguir) construído mediante os relatos de Simplicio.

Figura 9 – A explicação da teoria de Eudoxo para o movimento da Lua.



Fonte: Linton (2004, p. 28)

No esquema da Figura 9, a projeção AB representa o equador celeste e CD a eclíptica. A mais externa das três esferas, completa uma revolução de leste para o oeste em um dia, representando a rotação diurna da Lua. Para explicar o movimento da Lua, Eudoxo inseriu uma segunda esfera conectada à primeira, mediante um eixo que passa pelos polos da eclíptica e gira de oeste para o leste.

Desse modo, o desvio sofrido pelo movimento lunar é dado pela inclusão de uma terceira esfera, cujo eixo de rotação faz um pequeno ângulo com o da segunda esfera. Contudo, não se sabe que velocidades foram atribuídas para a segunda e terceira esferas, ou que inclinação foi dada à terceira esfera, em relação à segunda.

No que se considera razoável, “Eudoxo teria notado que a variação de latitude da Lua equivaleria a algo como mais ou menos cinco graus e, portanto, teria usado um valor próximo de cinco graus para a inclinação da terceira esfera, em relação à segunda” (LINTON, 2004, p. 28).

Para a inclinação da segunda esfera, em relação à primeira (Figura 9), Eudoxo utilizou o valor da obliquidade da eclíptica. Porém, não há razões para acreditar que esse valor tenha sido de 1/15 de um círculo, ou 24° graus. A principal explicação para isso é devido ao fato de: “este ser o ângulo subentendido no centro de um polígono regular de quinze lados, cuja construção é dada nos Elementos de Euclides, Livro IV, Proposição 16, que, de acordo com Proclo, foi incluído por causa de sua utilidade na astronomia” (Ibid., p. 29).

Na explicação do **movimento do Sol**, muito semelhante ao movimento lunar, a teoria das esferas concêntricas estabelecia que o eixo da esfera mais interna estivesse inclinado em um ângulo muito menor, comparado ao caso lunar, em relação ao segundo, que fornecia ao Sol o desvio da eclíptica. Todavia, até Eudoxo, a eclíptica era compreendida como um grande círculo que passava pelo zodíaco. Sua definição correta, isto é, o próprio caminho do Sol, só ocorreu com Hiparco de Nicéia, no século II a. C.

Além disso, a teoria também estabelecia que o movimento do Sol, em relação às estrelas fixas, era constante. Para esse caso, é possível situar a primeira *incoerência* e, portanto, *contradição* dessa teoria, como um *problema conceitual interno*, presente em sua estrutura explicativa. Por exemplo, dizer que o movimento do Sol era constante implicava também afirmar que as estações do ano eram todas iguais em duração de tempo, isto é, que o ano solar durava apenas 360 dias.

As evidências dessa contradição e inconsistência interna estavam na própria descoberta astronômica de Eudoxo sobre a duração do ano tropical de 365 dias e 6 horas, assinalados no início deste capítulo. Adjacente a essa incompatibilidade lógica entre teoria e a observação, um segundo problema conceitual interno encontra-se na inconsistência explicativa da teoria para a variação aparente do diâmetro do Sol e da Lua.

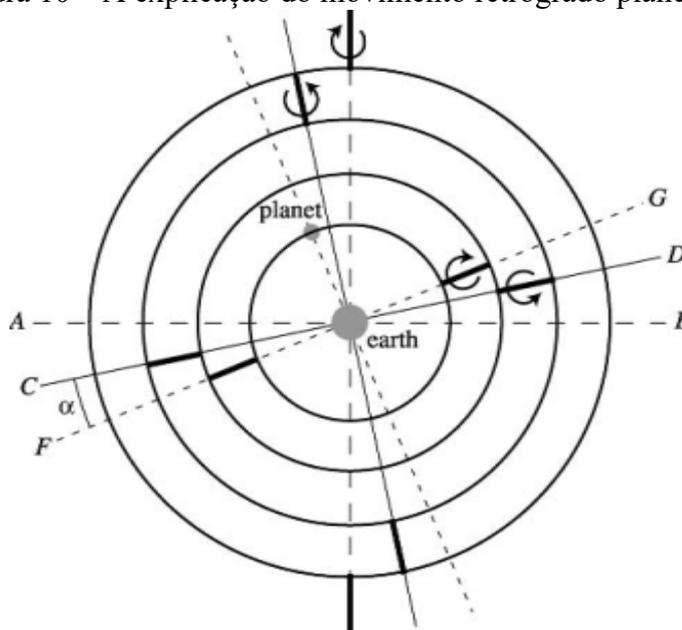
Por exemplo, enquanto a teoria estabelecia que as distâncias de cada corpo celeste, em comparação com a Terra, eram fixas, as observações da Lua mostravam que a variação do seu diâmetro, mais significativo do que o do Sol, era na Lua cheia 14% maior do que o menor diâmetro da Lua nova, ilustração na (Figura 6 – cap. 4, seção 4.3.2).

Por sua vez, essa inconsistência interna concorda plenamente com as críticas de Simplicio, ao observar que Vênus e Marte pareciam, muitas vezes, maiores quando estavam na metade de suas retrogradações. E, portanto, para ele, “a teoria de Eudoxo e as de seus seguidores não conseguiam salvar os fenômenos” (LINTON, 2004, p. 29).

Na explicação no **movimento retrógrado dos cinco planetas**, foco principal da teoria, Eudoxo adicionou uma esfera extra. Como no caso do Sol e da Lua, a primeira e segunda esfera representam a rotação diurna e o movimento regular dos planetas ao redor da eclíptica, no período zodiacal apropriado (meses do ano em que o fenômeno de retrogradação era observado). Na Figura 10, a seguir, o eixo da terceira esfera está no plano do equador, segunda esfera, isto é, no plano da eclíptica, e o eixo da quarta esfera está inclinado por um ângulo alfa menor, em relação ao terceiro. Crucialmente, a terceira e quarta esferas giram em

direções opostas, mas na mesma taxa de velocidade, uma revolução por período sinódico do planeta.

Figura 10 – A explicação do movimento retrógrado planetário.



Fonte: Linton (2004, p. 29)

Desse modo, os movimentos dessas duas esferas juntas se combinam para gerar uma curva do tipo oito, a qual Eudoxo chamou de *hipópede*, em homenagem ao dispositivo usado para amarrar um cavalo pelos pés. Quando sobreposto ao movimento regular induzido pelas duas esferas mais externas, esse dispositivo matemático geométrico (*hipópede*) tem o efeito de produzir os pequenos desvios na latitude e os ocasionais períodos de movimento retrógrados, conforme necessário (NEUGEBAUER, 1983).

No que confere aos problemas conceituais internos, afirma-se que, como instrumento intelectual preditivo, sua teoria não era muito útil. Isso porque, desde que foi desenvolvida, é razoável pensar que a previsão dos fenômenos celestes, como a posição dos planetas, não era o seu propósito. Além disso, quando comparada à capacidade de previsão das posições planetárias dessa teoria, com o sistema astronômico aritmético dos babilônios, observa-se que esse último, apesar de não poder ser considerado aqui como uma teoria, era bem mais consistente e seguro.

A teoria das esferas concêntricas de Eudoxo não explicava, nem previa nenhum tipo de resultado independente. Por isso ela não podia ser testada, uma vez que os parâmetros intrínsecos do modelo podiam ser modificados, sempre que as observações não se encaixavam

nas previsões. Portanto, cientificamente, essa teoria pode ser descrita como uma *hipótese ad hoc*, uma vez que explica os fenômenos celestes, apenas à medida que são incorporados ao seu esquema conceitual (LINTON, 2004).

Aprofundando essa discussão, é importante considerar cinco critérios epistêmicos e/ou valores cognitivos instituídos por Thomas Kuhn, em sua obra, *A tensão essencial*, como uma forma distinta dos valores (morais e sociais), para auxiliar na avaliação cognitiva das teorias. Esses critérios e/ou valores são caracterizados como: *precisão, consistência, abrangência, simplicidade e fecundidade* (KUHN, 2011).

Antes de especificá-los, é importante dizer que, como *parâmetros epistemológicos*, eles não podem ser utilizados de modo determinante, para invalidar a relevância científica contextual das teorias. Em outras palavras, não podem servir, exclusivamente, para desmerecer ou descredenciar a validade das teorias astronômicas, cosmológicas e físicas, no contexto investigativo da tradição de pesquisa grega antiga. Justamente porque, tais critérios epistemológicos, mudam com o tempo e não estão isentos de críticas pertinentes<sup>8</sup>, sobre suas próprias validades para a avaliação de uma teoria, em seu respectivo contexto histórico investigativo.

Feita essa ressalva e resguardando a validade científica do contexto investigativo da tradição de pesquisa grega antiga e da teoria planetária de Eudoxo, os cinco critérios epistêmicos – *precisão, consistência, abrangência, simplicidade e fecundidade* – permitem tanto dimensionar a complexidade da avaliação cognitiva de uma teoria quanto ampliar um pouco o entendimento de como os problemas conceituais internos – aqui, materializados por esses cinco critérios epistêmicos – podem comprometer a aceitação de uma teoria em seu campo disciplinar.

Esses critérios funcionam e compõe um conjunto de critérios para a avaliação das teorias científicas, que, dentre outros existentes, são vistos como “valores constitutivos da ciência”, por exemplo, ver (LACEY, 1998, p. 61-86). Além disso, destaca-se que, “as teorias são formuladas, transformadas, transmitidas e avaliadas no decorrer de práticas científicas, [...] atividade de agentes inseridos em instituições sociais e [...] envolvem a expressão de vários valores além dos cognitivos” (LACEY, 1998, p. 62).

---

<sup>8</sup> Por exemplo, no texto de Imre Lakatos (1978) – *Porque é que o programa de investigação de Copérnico suplantou o de Ptolomeu?* – é possível encontrar algumas dessas críticas.

Mediante esses critérios, é possível avaliar uma teoria científica, observando o seguinte:

Primeiro, uma teoria deve ser conformar com a precisão à experiência: em seu domínio, às consequências dedutíveis da teoria devem estar em clara concordância com os resultados da experimentação e da observação existente. Segundo, uma teoria deve ser consistente, não apenas internamente ou auto consistente, mas também com outras teorias concorrentes aplicáveis a aspectos da natureza que lhe são afins. Terceiro, ela deve ter uma extensa/ abrangência; em particular, as consequências da teoria devem ir muito além das observações, leis ou subteorias particulares cuja explicação motivou sua formulação. Quarto, e fortemente relacionado, ela deve ser simples, levando ordem a fenômenos que, em sua ausência, permaneceriam individualmente isolados e coletivamente confusos. Quinto - um item um pouco incomum, mas de importância crucial para as decisões científicas efetivas -, uma teoria deve ser fértil em novos achados de pesquisa, deve abrir portas para novos fenômenos ou às relações antes ignoradas entre fenômenos já conhecidos. (KUHN, 2011, p. 341)

Submetendo a teoria das esferas concêntricas de Eudoxo a esses critérios epistêmicos, porém resguardando seu contexto histórico e validade explicativa, observa-se de imediato que essa teoria não conseguiu atender a nenhum deles. Obviamente, uma das razões para isso, é perceber que esses critérios epistêmicos, que credenciam a ciência como a enxergamos, hoje, podem mudar com o tempo. Dessa forma, é possível dizer também que, esses critérios podem não ter feito parte do pensamento científico no contexto da tradição de pesquisa grega antiga, pelo menos nesse período de Eudoxo. Contudo, isso também não impede que ela seja avaliada parcialmente por esses critérios, no sentido, de melhor exemplificar os problemas conceituais internos que essa teoria enfrentou, na perspectiva da lente epistemológica da solução de problemas de Laudan.

Por exemplo, destaca-se que para o primeiro *critério epistêmico de precisão*, a teoria das esferas concêntricas não era coerente com: as observações do movimento do Sol, da Lua e com seus diâmetros aparentes, nem com a duração real das estações do ano tropical.

Para o segundo *critério de consistência*, a teoria mostra-se ineficaz e inconsistente, comparada com o sistema astronômico aritmético babilônico, quanto à necessidade de precisar a localização exata dos planetas no céu (AABOE, 1983).

Para o terceiro *critério de abrangência*, limitadamente, a teoria resume-se a uma *hipótese ad hoc*, já que explicava os fenômenos apenas à medida que eram incorporados ao esquema conceitual.

Pelo quarto *critério de simplicidade*, a reconstrução geométrica dessa teoria mostrou que ela era totalmente desprovida desse valor, para o contexto de sua época. É válido lembrar

que, esse critério pode ser associado ao *pressuposto metafísico estético de beleza* presente na cosmologia de Pitágoras de Samos, dedicado ao poder dos números para representar as formas geométricas na natureza.

Por fim, no quinto e último *critério de fecundidade*, a teoria de Eudoxo pode ser avaliada como insuficiente, quanto à explicação dos problemas empíricos conhecidos: variação da intensidade de brilho aparente dos planetas; variação do diâmetro aparente do Sol e da Lua (mais significativo), o movimento retrógrado dos cinco planetas (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno) e a variação em dias entre as estações do ano.

Diante dessa avaliação epistêmica, pode-se perguntar o seguinte: *Se a teoria de Eudoxo não passa pelos crivos dos critérios epistêmicos, por que ela foi tão fundamental para o desenvolvimento da astronomia matemática instrumentalista grega?* Para essa pergunta, uma resposta pode ser dada, mediante mais dois *vínculos epistemológicos* criados com mais dois aspectos, características, princípios da natureza da ciência subjacentes a esse contexto histórico.

Para o primeiro, pode-se afirmar que a teoria das esferas concêntricas de Eudoxo mostra “que o conhecimento científico depende fortemente, mas não inteiramente, da observação, evidência experimental, argumentos racionais e ceticismo” (MCCOMAS; ALMAZROA; CLOUGH, 1998, p. 513). Para o segundo vínculo, essa teoria denota “que a ciência é uma tentativa de explicar fenômenos naturais” (Idem), mediante a criatividade e engenhosidade de homens e mulheres da ciência. Nesse sentido, é possível afirmar também que:

[...] a teoria das esferas concêntricas de Eudoxo demonstrou o poder das técnicas geométricas, em que superposições de simples rotações uniformes poderiam ser usadas para modelar comportamentos extremamente complexos, e porque (conforme modificado por Calipo) foi adotado pelo gigante da filosofia grega - Aristóteles - cujos ensinamentos dominaram o pensamento intelectual para os próximos 2000 anos. (LINTON, 2004, p. 32, tradução própria)

Acrescentando mais alguns elementos a essa afirmação, Otto Neugebauer (1983) afirma que poucas teorias astronômicas exerceram uma influência tão profunda e duradoura sobre o pensamento humano. Isso porque, Eudoxo demonstrou que o movimento dos planetas poderia ser explicado, pelo menos qualitativamente, como uma combinação de rotações uniformes de esferas concêntricas sobre eixos inclinados. Em razão disso, esse autor considera que:

A esfericidade do universo, a importância fundamental do movimento circular uniforme, deve ter surgido, a partir de então, como fato estabelecido. Combinado com a ideia de Aristóteles do "motor primário", o universo poderia ser entendido como um grande sistema, verdadeiramente geocêntrico. Não admira que esta teoria tenha fascinado durante quase dois mil anos as mentes dos filósofos e até dos astrônomos, apesar do fato de graves dificuldades terem aparecido quase desde o início. As teorias desenvolvidas por astrônomos especializados, como Hiparco e Ptolomeu, tiveram em seu crédito um acordo muito superior com os dados observacionais. No entanto, a convicção humana profundamente enraizada de que a simplicidade e a beleza são critérios de verdade manteve viva a esperança de que as esferas homocêntricas, embora em algumas modificações, possam representar corretamente o plano do criador. (NEUGEBAUER, 1983, p. 305, tradução própria)

De todo modo, se por um lado a origem dos problemas conceituais internos na teoria planetária de Eudoxo permite observar o motivo das críticas lançadas por seu discípulo Calipo, pelo comentador Simplicio e o próprio Aristóteles. Por outro, esses mesmos motivos também dão certeza de que o esforço cognitivo da ciência no processo de elaboração de teorias e modelos é uma tarefa incansável, porém necessária ao crescimento científico.

Como já observado, juntamente com a classe dos *problemas conceituais externos* (próxima seção), será possível perceber que essa tarefa se estende para além do âmbito interno da ciência. Ela transcende outras áreas do conhecimento, que, muitas vezes, influenciam e são influenciadas pela atividade científica.

## 5.2 A COSMOLOGIA DE ARISTÓTELES E SUA MALHA CONCEITUAL

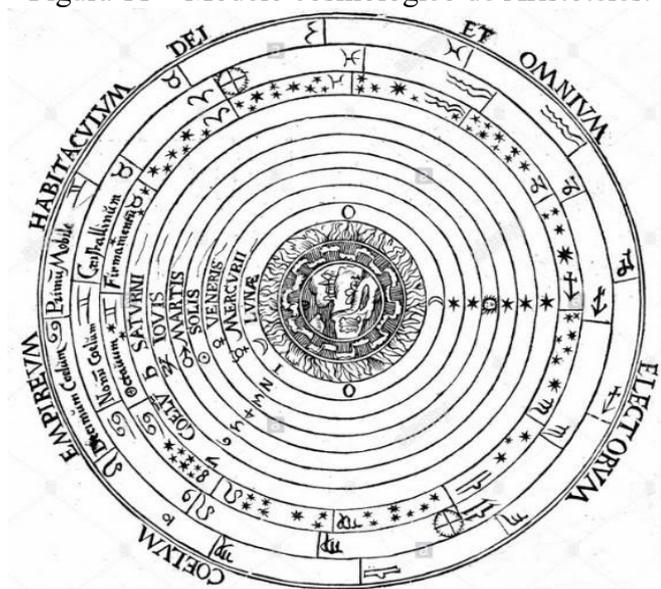
Em aspectos gerais, a cosmologia de Aristóteles apresenta características conceituais muito semelhantes às cosmologias de Platão e de Pitágoras. Ela possuiu a mesma concepção de universo autocontido, autossuficiente e esférico. Mas, especificamente, sua estrutura básica é formada pelo universo das duas esferas, com uma Terra esférica, imóvel e suspensa no centro geométrico de outra esfera extremamente extensa que, porém finita, carrega em seu movimento de rotação, as estrelas fixas.

No modelo cosmológico de Aristóteles, o universo está dividido em duas regiões bem distintas: *o mundo sublunar*, delimitado pela região abaixo da esfera da Lua; e *o mundo supralunar*, compreendido entre as esferas da Lua e a esfera das estrelas fixas. Nesse mundo supralunar, estão ordenados, em relação a Terra, a Lua, Mercúrio, Vênus, Sol, Marte, Júpiter e Saturno.

Nesse sentido, a diferença entre esse ordenamento que situa Vênus, mais próximo do Sol, e Mercúrio mais próximo da Lua, e o ordenamento feito por Filolau, que em seu modelo

cosmológico, seguia a ordem: Terra, Lua, Sol, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter, Saturno e as estrelas fixas. Outra diferença fundamental entre os modelos cosmológicos de aristotélico, Filolau e Platão, é que “Aristóteles procurava uma ideia na sua realização concreta nos fenômenos da natureza, e todos os resultados da experiência e da observação, portanto, chamavam sua atenção” (DREYER, 1953, p. 108). Uma ilustração que representa a essência do modelo cosmológico aristotélico é apresentada na Figura 11.

Figura 11 – Modelo cosmológico de Aristóteles.



Fonte: Crombie (1953, p. 53)<sup>9</sup>.

Em conformidade, com suas ideias cosmológicas, Aristóteles acreditava também que “todos os seres humanos têm, por natureza, o desejo de conhecer. O prazer que as percepções de nossos sentidos nos causam é uma prova dessa verdade” (ARISTÓTELES, 1875, p. 3). Por isso, ele afirmava que “Nós gostamos deles por conta própria, independentemente da sua utilidade, especialmente os da visão” (Idem). Por essa perspectiva, sua cosmologia encontrava-se fundamentada na percepção sensível e senso comum. Por sua vez, esses dois pilares formavam as bases de sustentação do seu pensamento filosófico, posto que Aristóteles “deslocou o mundo platônico das ideias para a realidade empírica” (HESSEN Johannes, 2000, p. 60).

Em suas obras mais importantes (*Física, Metafísica, De Caelo e Meteorologia*), Aristóteles defendeu que:

<sup>9</sup>Cosmografia *De Petii Apiani*, restituída por Gemma Phrysius, na Antuérpia, no ano de 1539.

As ideias não constituem mais um mundo pairando no vazio, não se encontram acima das coisas nelas, são as formas essenciais das coisas. Elas representam o núcleo essencial e racional das coisas, que as propriedades empíricas envolvem como uma membrana. (HESSEN JOHANNES, 2000, p. 60)

Aliados a esses pressupostos filosóficos, dois princípios alicerçam a cosmologia aristotélica. O primeiro preconiza que “o comportamento das coisas é devido às formas ou natureza qualitativamente determinadas” (CROMBIE, 1953, p. 52). Já o segundo sustenta que, “em sua totalidade, essas naturezas são arranjadas para formar um todo ou Universo hierarquicamente organizado” (Idem) – uma forte premissa metafísica pitagórica.

Para o primeiro pressuposto, embora incorporando os artifícios geométricos da astronomia matemática instrumentalista, refletidos na teoria planetária de Eudoxo, Aristóteles considerou problemática a identificação do espaço concreto do cosmos, finito e hierarquicamente ordenado como o espaço da geometria.

Por exemplo, ele criticou quando Filolau afirmara que a parte mais importante do mundo, que era o centro, estava ocupada pelo fogo central, “como se a palavra centro fosse inteiramente inequívoca, e o centro da figura geométrica fosse sempre o mesmo da coisa ou centro natural” (ARISTÓTELES, 1922, p. 239<sup>b</sup>).

Para o segundo, Aristóteles (1922) afirmou que as esferas concêntricas do seu modelo encerram um mecanismo físico, ensejando uma realidade que ultrapassa a representação meramente matemática da astronomia instrumentalista platônica. Nesse sentido, elas podiam compor uma grande máquina, cujo objetivo era manter os corpos celestes em movimento.

Junto a essas preocupações com a realidade empíricas das ideias platônicas – nas palavras de Johannes Hessen (2000, p. 60), “o núcleo essencial e racional das coisas, que as propriedades empíricas envolvem como uma membrana” – é possível observar os fundamentos da *corrente de pensamento realista* fundada por Aristóteles, surgindo para rivalizar com a *corrente instrumentalista* platônica dentro da mesma tradição de pesquisa grega antiga. Destaca-se, novamente, que, uma distinção mais aprofundada sobre essas duas correntes ainda estar reservada para outro momento, qual seja, o contexto do trabalho Cláudio Ptolomeu.

Não obstante, além da preocupação com o mecanismo físico do mundo aristotélico, estão seus conceitos e fundamentos do *silogismo lógico*, que estruturam articuladamente uma *malha conceitual* coerente com sua cosmologia e visão de mundo. Esses conceitos e fundamentos perpassam pelas ideias de: *primeiro motor, universo finito e pleno, leis de*

*movimento natural circular, movimento natural retilíneo para cima e para baixo, esfericidade e centralidade da Terra no universo, mundo sublunar - lugar das mudanças constantes, da corrupção/imperfeição e dos quatro elementos - e o mundo supralunar, o lugar dos corpos celestes, preenchido pelo éter, uma região perfeita/incorruptível e eterna.*

Sobre o movimento circular, Aristóteles afirmara que “o movimento é natural para alguma coisa, pois certamente deve ser algum corpo simples e primário que é ordenado para mover com um movimento circular natural, como o fogo é ordenado a voar e a terra não” (ARISTÓTELES, 1922, p. 269<sup>b</sup>). Por conseguinte, é essa malha conceitual que fomenta a origem dos problemas conceituais externos implicados no componente da *visão de mundo*. Mas antes de acessá-los, é preciso abordar as explicações aristotélicas sobre os problemas empíricos não resolvidos pela teoria planetária das esferas concêntricas de Eudoxo de Cnido.

### **5.2.1 As Explicações de Aristóteles para os Problemas Empíricos da TPGA**

Incorporando as ideias da teoria planetária de Eudoxo e a sofisticação de Calipo, em seu modelo cosmológico, Aristóteles acreditava que todos os fenômenos celestes – os problemas empíricos – poderiam ser solucionados pelo movimento de um conjunto de esferas celestes concêntricas.

Nesse conjunto, ele admitia que, no interior da esfera das estrelas fixas, era preciso inserir cinquenta e cinco esferas, em detrimento das vinte e seis da teoria de Eudoxo e das trinta e seis da sofisticação de Calipo. Nesse novo esquema aristotélico, cada um dos sete planetas (Lua, Mercúrio, Vênus, Sol, Marte, Júpiter e Saturno)<sup>10</sup> era situado no interior de um grupo de esferas que, executando uma revolução axial completa, em intervalos de tempos diferentes, reproduziam os fenômenos celestes.

A função dessas esferas era a de produzir uma engrenagem capaz de manter em rotação o conjunto de esferas concêntricas, cuja realidade física capacitava o movimento de todo o seu modelo cosmológico, transmitido pelo contato físico de uma esfera com as outras (ÉVORA, 1993).

Seguindo uma descrição qualitativa dessa engrenagem aristotélica, por exemplo, ver (ÉVORA, 1993, p. 39-40), a esfera das estrelas fixas, em seu movimento diurno, arrastava a

---

<sup>10</sup> Não é demasiado lembrar que, de acordo a essa visão de mundo geocêntrica, com exceção da Terra, todos esses demais corpos celestes eram compreendidos como planetas, especialmente, para a maioria dos pensadores gregos.

mais externa das sete esferas concêntricas, que envolvia e carregava consigo o planeta Saturno. As rotações axiais dessas sete esferas, com diferentes velocidades, em alguns casos, em sentidos e em torno de eixos diferentes, reproduziam o movimento desse planeta, não lhe permitindo ser carregado pelo movimento diurno da esfera das estrelas, como uma estrela fixa era carregada.

Dentro do grupo das sete esferas de Saturno, Aristóteles acrescentou na penúltima esfera mais uma, que, pela posição dos seus polos, sentido e magnitude de velocidade de rotação, se movia da mesma maneira que a esfera das estrelas fixas. Por sua vez, essa última esfera transmite seu movimento para a esfera vizinha mais próxima, nesse caso, a primeira das sete esferas do planeta Júpiter. Assim, esse planeta se movia como se as esferas de Saturno não existissem.

Aristóteles acreditava que o movimento de Júpiter seguia o mesmo esquema do movimento de Saturno, o qual podia ser aplicado para todos os outros planetas, até a esfera da Lua. Portanto, todos os fenômenos celestes podiam ser explicados simplesmente por meio das rotações das diversas esferas. Contudo, essa explicação não deu conta de solucionar os problemas empíricos, justamente porque, quando submetidas à análise dos *critérios epistêmicos de precisão, consistência, abrangência, simplicidade e fecundidade*, ela não atende satisfatoriamente, nenhum deles.

Por exemplo, comparando complexidade *versus* simplicidade, ao acrescentar mais esferas, cinquenta e cinco, a explicação para o movimento dos planetas tornava-se mais difícil de ser assimilada. Além disso, Aristóteles postulou que as distâncias de cada corpo celeste em suas esferas, em relação a Terra, eram fixas, com os planetas orbitando a Terra em movimento circular uniforme.

Claramente, esse postulado é suficiente para comprometer os demais critérios epistêmicos, visto que todo o seu sistema ficava impossibilitado de explicar o movimento de retrogradação dos planetas, a variação aparente de seus brilhos, os diâmetros aparente do Sol e da Lua (suas fases) e os desvios de seus movimentos pela eclíptica, a duração do ano tropical, bem como a razão de os eclipses solares serem, algumas vezes, totais ou anelares (ÉVORA, 1993).

Adjacente a essa incapacidade, a seguir, é possível identificar e discutir como a *visão de mundo* implicada na *malha conceitual aristotélica* pode fomentar a origem do problema conceitual externo mais contundente para o desenvolvimento cognitivo da ciência.

### 5.2.2 Os Problemas Conceituais Externos Implicados na Visão de Mundo Aristotélica

Como observado, a origem dos problemas conceituais externos, especialmente, no componente conceitual da visão de mundo, encontra-se implicada na malha conceitual aristotélica sustentada por seus conceitos, fundamentos e pressupostos filosóficos.

Para o primeiro desses conceitos, o de **primeiro motor**, se origina da preocupação de Aristóteles com o problema do conhecimento (ideias) e dos movimentos dos corpos celestes como essências eternas. Nesse sentido, perguntou Aristóteles (1875, p. 354): *a essência é única ou tem muitas?*

Em sua visão, nem a doutrina das ideias de Platão, nem a doutrina de Pitágoras, cujas ideias eram números, foram capazes de oferecer provas conclusivas. Nesse contexto, Aristóteles acreditava que o seu conceito de *primeiro motor* era a resposta para sua pergunta, por isso, afirmou o seguinte:

O princípio dos seres, sendo o primeiro, não é suscetível, em nossa opinião, a qualquer movimento, nem essencial nem accidental, e sim é ele quem imprime o primeiro movimento, eterno e único movimento. Mas desde que o que é movido necessariamente é movido por algo, o primeiro motor é imóvel em sua essência, e que o movimento eterno é imposto por um ser eterno, e o movimento único por um único ser [...] Com efeito, a natureza das estrelas é uma essência eterna, o que se move é eterno e anterior ao que é movido, e o que é anterior a uma essência é necessariamente uma essência. (ARISTÓTELES, 1875, p. 354, tradução própria)

Nessa passagem está a ideia aristotélica de que tudo que se move é movido por alguma coisa, mas essa coisa, na origem, é o primeiro motor. Em sua lógica, admitindo-se que em uma série de corpos, o primeiro seja movido pelo segundo, o segundo por um terceiro e assim sucessivamente, tornava-se necessário que essa série *motor movido* se detivesse em algum ponto, a fim de que não se reproduzisse uma regressão ao infinito (PEDUZZI, 2018a).

Por conseguinte, a existência de um primeiro motor como princípio fundamental, que movia sem ser movido, era uma condição necessária. Essa ideia tornava-se coerente como o movimento eterno dos corpos celestes no mundo supralunar, que, para Aristóteles, sempre existiu e sempre existiria.

Por um diálogo interno, Aristóteles se perguntou: “de que modo existirá o anterior e o posterior se não existe o tempo? Como existirá o tempo se não há movimento?” (ARISTÓTELES, 2003, p. 61 *apud* PEDUZZI, 2018a, p. 43). Sua resposta foi que “o tempo era o senhor do movimento, posto que o tempo exista sempre, também o movimento deve ser

eterno” (Idem), portanto, a causa primária de todos os movimentos era o primeiro motor, que era tão eterno quanto o tempo e o próprio movimento.

Em contrapartida, alguns pontos estão implicados nessa explanação da lógica aristotélica. Por exemplo, apesar de o primeiro motor impedir que a série possa regressar ao infinito, na explicação geral da mudança, a sucessão de seu movimento para o céu (e tudo o que depende dele) não poderia ocorrer por contato, uma vez que somente podia haver contato entre entidades corpóreas.

Caso isso ocorresse, esse contato, ele provocaria desgaste e degeneração na constituição desse ente, causando uma contradição da ideia de eternidade desse *ente metafísico*. Para evitá-la, Aristóteles defendeu que “o primeiro motor move da mesma maneira que o objeto de desejo ou o intelecto assim o faz” (ARISTÓTELES, 2003, p. 66 *apud* PEDUZZI, 2018a, p. 44).

Nessa perspectiva, o primeiro motor provocava o movimento sem ser movido, sem contato com o que ele movia. Além dessa implicação, outro ponto deve ser destacado. Nesse, considera-se que:

Embora a passagem do repouso para o movimento nos corpos inanimados do mundo sublunar tenha uma explicação causal simples e convincente entre motor e o movido, o mesmo não ocorre quando se indaga como um animal, que em um primeiro momento está imóvel, começa a se mover sem que aparentemente haja uma causa externa para esse movimento. (PEDUZZI, 2018a, p. 44)

Rechaçando essa implicação, Aristóteles considerava que nada impedia que no “corpo do animal existisse uma multiplicidade de movimentos por ação do meio que o circunda. E entre esses movimentos, alguns moviam o pensamento ou o desejo, e esse desejo movia o animal por inteiro, como sucedia nos sonhos” (ARISTÓTELES, 2003, p. 66 *apud* PEDUZZI, 2018a, p. 44).

O mais importante dessa fundamentação lógica de Aristóteles acerca do conceito de primeiro motor, é que ele será incorporado no pensamento cultural ocidental, posteriormente, a partir da cristianização das ideias aristotélicas pela teologia cristã, como uma referência a Deus. Esse *fator extra científico* é justamente um elemento que reflete no componente conceitual da visão de mundo, por ter sido incorporado na religião, na cultura e na arte renascentista europeia.

Uma boa evidência dessa incorporação cultural e religiosa estar representada em uma das famosas pinturas do artista renascentista Raphael (1483 - 1520), a pedido da *Stanza della Segnatura*, *Palazzi Pontifici*, o Vaticano, ilustrado na (Figura 12).

Figura 12 – O Primeiro Motor de Aristóteles.



Fonte: Museu do Vaticano.

Por outro lado, o primeiro motor também foi concebido por Aristóteles, em sua obra *Meteorologia*, como uma entidade intelectual, que movia conforme o desejável e o inteligível, associada a outros dois conceitos (amor e ódio), presentes nas ideias filosóficas gregas e incorporadas por todas as religiões para representar o bem, amor-Deus e o mal (ódio). Algumas passagens, nas obras aristotélicas, *Metafísica e Física*, descrevem a relação desses dois conceitos, como princípios inteligíveis que agem na constituição do cosmos, mediante os quatro elementos (terra, água, ar e fogo), e como princípios inteligíveis do movimento (PEDUZZI, 2018a).

Em seu livro, *Metafísica*, Aristóteles acreditava que isso era possível, pois, segundo ele, “os princípios propriamente ditos, pelos quais aqueles elementos são movidos, são o Amor e o Ódio. Pois é preciso que os elementos permaneçam alternadamente em movimento, sendo ora misturados pelo Amor, ora separados pelo Ódio” (KUHNE, 1978, p. 214). Já no livro *Física*, ele afirmou também o seguinte: “Empédocles parece dizer que o poder e a *força*

*motriz*, possuindo alternadamente o Amor e o Ódio, pertencem às coisas por necessidade, bem como o repouso no tempo intermediário” (Ibid., p. 215).

Complementando essa ideia, no livro, *Metafísica*, Aristóteles afirmou que: “Empédocles, comparado aos seus antecessores, foi o primeiro a introduzir a divisão na causa, sem fazer do princípio do movimento um princípio único, mas dois diferentes e contrários” (Idem). Alinhado a esse conceito de primeiro motor, estava o pressuposto aristotélico de **universo finito e pleno**, que expressa o seguinte:

[...] é evidente que não somente não há nada, mas também que nunca poderia haver qualquer massa de nenhum corpo fora da circunferência (habitualmente chamada de todo ou totalidade, o “Céu”). O mundo como um todo, portanto, inclui toda matéria disponível [...]. Portanto, nem há agora, nem nunca houve antes, nem poderá existir mais de um Céu, mas este nosso Céu é um, único e completo. (ARISTÓTELES, 1922, p. 279<sup>b</sup>, tradução própria)

Nessa concepção, não havia lugar para o *vazio*, nem tempo fora do céu, pois em todo lugar havia possibilidade de se ter um corpo. E o *vazio* se definia como aquilo em que a presença de um corpo, embora não real, era possível. Associado a essa perspectiva, encontrava-se a implicação da ideia de que *matéria e espaço*, na cosmologia aristotélica, eram indissociáveis, como dois lados de uma mesma moeda (KUHN, 1990). Essa definição de espaço era dada em função do volume ocupado por um corpo, logo, na ausência de um corpo material, não existia nada com o qual se pudesse definir o conceito de espaço, ele não podia existir por si mesmo (KUHN, 1990). A força dessa ideia está na lógica aristotélica amparada pela percepção sensível, na qual psicologicamente o conceito de lugar é bem mais simples do que o conceito de espaço. Para melhor exemplificar,

O lugar é, antes de tudo, uma (pequena) parte da superfície terrestre, identificada por um nome. A coisa cujo “lugar” é especificado é um “objeto material”, ou um corpo. A análise simples mostra que o “lugar” é também um grupo de objetos materiais. Será que a palavra “lugar” tem um significado independente desse? Será que é possível atribuir-lhe tal significado? Quando damos uma resposta negativa a essa pergunta, somos levados à ideia de que o espaço (ou lugar) é uma espécie de ordem de objetos materiais, e mais nada. Quando o conceito de espaço é formado e delimitado dessa maneira, falar de espaço vazio não faz sentido. Como a formação dos conceitos sempre foi regida por um empenho instintivo em buscar economia, somos levados, naturalmente, a rejeitar o conceito de espaço vazio. (EINSTEIN, 2010, p. 16-17)

Com essa exemplificação, espaço e matéria, na cosmologia aristotélica, eram dois construtos pertencentes ao mesmo fenômeno lógico e ontológico. Portanto, a concepção da

existência do *vazio* tornava-se absurda. Por ser absurda, sua não existência permitia fundamentar os pressupostos da dimensão finita e da **unicidade do universo**.

Toda essa preocupação aristotélica refletia uma expressão *horror vacui* – aversão da natureza pelo vazio – que os filósofos gregos, não atomistas, compartilhavam. Para eles, “a natureza sempre agiria de maneira a evitar a formação do vazio” (KUHN, 1990, p. 109). E “o próprio conceito de vazio era uma contradição terminológica, como o conceito de círculo quadrado” (Ibid., 110). A principal implicação desse pressuposto aristotélico de *universo finito e pleno* está imbricada como o problema conceitual externo da componente visão de mundo, pois, se o espaço fosse infinito, não existiria um centro especial no cosmos. Dificilmente, seria plausível que toda a terra, água, ar e fogo do universo pudessem estar agregados em uma única região. Em um universo infinito, seria natural presumir que existissem outros mundos espalhados por todo o universo.

Com essa possibilidade, a Terra deixava de ser única e desapareceria de cena, arrastando consigo, inevitavelmente, o homem ocidental e sua visão de mundo antropocêntrica, como ser especial do universo. Complementado essa implicação, por uma perspectiva epistemológica mais aguda, ligada às áreas da teologia e metafísica, encontrava-se a tentativa dos filósofos gregos em suplantar o pensamento do *materialismo* – elemento conservador da ciência – representado, originalmente, por ninguém menos que o filósofo Demócrito de Abdera (460 - 370 a. C.). Com efeito, nas áreas da teologia e da metafísica, afirma-se que:

Teólogos e metafísicos acumularam sobre seu nome suas acusações inveteradas contra o materialismo. O divino Platão chegou a considerar seus escritos tão perigosos que pretendia destruí-los em um ato de fé privado e só foi impedido disso por considerar que já era tarde demais, que o veneno já estava, por demais, alastrado. Mais tarde, os obscurantistas da Antiguidade se vingaram dele, introduzindo, sob sua marca, o contrabando de seus escritos de magia e de alquimia, o que imputou ao pai de todas as tendências racionais uma reputação de grande mágico. O cristianismo nascente, enfim, logrou executar o enérgico desígnio de Platão; e sem dúvida um século anticósmico deveria considerar os escritos de Demócrito, assim como os de Epicuro, como a encarnação do paganismo. Enfim, foi reservado à nossa época negar também a grandeza filosófica do homem e atribuir-lhe um temperamento de sofista. Todos esses ataques se desenrolaram em um terreno que não podemos mais defender. (TORRES FILHO, 1978, p. 352)

Acerca dessa perseguição teológica e metafísica ao materialismo e tudo a ele associado, tanto na Antiguidade grega quanto na Idade Média, a maioria dos filósofos, tal como os próprios atomistas, que acreditavam que o universo era infinito, se sentia impelida a aceitar a realidade do vazio e a pluralidade de mundos (KUHN, 1990).

Até meados do século XVII, ninguém que defendia esse conjunto de conceitos, conseguiu produzir uma cosmologia capaz de competir com a visão de mundo sustentada pela malha conceitual aristotélica. Especialmente, no que diz respeito à explicação dos fenômenos terrestres e celestes. Portanto, o conceito de infinito pode ser compreendido hoje como parte de um novo senso comum, mas esse foi muito bem educado (KUHN, 1990).

Dando continuidade a essas implicações, os conceitos de mundo supralunar e sublunar, as leis de movimento natural, a localização e a imobilidade da Terra no centro do universo, constituíam-se em outros constructos aristotélicos que sustentavam sua cosmologia e visão de mundo.

No que confere ao **mundo supralunar**, delimitado entre a esfera da Lua e a esfera das estrelas fixas, essa região era concebida por Aristóteles como o lugar da perfeição, onde todos os corpos celestes eram formados pelo elemento éter: “a quinta essência, puro, eterno, inalterável, transparente e incorruptível” (PEDUZZI, 2018a, p. 32). Nesse lugar perfeito, pelo que se podia observar por meio do sentido da visão, não existia modificações no firmamento, exceto pelos movimentos dos astros, pois tudo estava em perfeita harmonia.

Nesse mundo supralunar, o movimento dos corpos celestes era regido pela lei do *movimento natural*, em que “todo movimento local era retilíneo ou circular, ou a combinação desses dois movimentos, pois, apenas estas duas linhas, reta e circular, eram as únicas de magnitude simples” (ARISTÓTELES, 1922, p. 268<sup>b</sup>). Simplicidade esta, que estava associada aos pressupostos metafísicos pitagóricos da harmonia, simplicidade e beleza.

Aristóteles concebia que, “para os corpos simples, isto é, aqueles que possuíam um princípio de movimento em sua própria natureza, seus movimentos deveriam ser ou retilíneos, ou ao redor do centro” (Idem). Nesse caso, o centro do universo, para o qual Aristóteles acrescentava o seguinte:

[...] a revolução sobre o centro é o movimento circular, enquanto os movimentos para cima e para baixo estão em linha reta, "para cima", que significa movimento para longe do centro, e "para baixo", em direção a ele. Todo movimento simples, então, deve ser o movimento para longe ou em direção ao centro ou em torno dele. (ARISTÓTELES, 1922, p. 268<sup>b</sup>, tradução própria)

Nos fundamentos das leis do movimento natural, encontram-se duas implicações importantes. A primeira delas diz respeito ao dogma do movimento circular, que se tornou uma lei da natureza, refletida nos movimentos dos corpos celestes. A segunda implicação é que, para o problema empírico da queda dos corpos, a explicação aristotélica pela lei de

movimento natural retilíneo, somente será superada pelo desenvolvimento da teoria da gravitação universal newtoniana no século XVII.

Seguindo esse percurso de implicações, em comparação ao mundo supralunar, o **mundo sublunar** era concebido como a região da imperfeição, da corrupção e das coisas passageiras, isto é, de constantes mudanças. Essas mudanças eram representadas pelo ciclo de vida dos seres vivos, deslocamento de um lugar para o outro, em relação ao tempo e às alterações percebidas na própria natureza.

Nessa região corruptível, todas as coisas eram constituídas pela combinação dos quatro elementos, terra, água, ar e fogo, que não podiam ser observados em suas formas puras. O motivo disso era que, na explicação aristotélica, o movimento da esfera da Lua impelia constantemente correntes de fogo para o mundo terrestre, provocando não somente esse efeito sobre as formas puras dos quatro elementos, mas também todas as mudanças observadas no mundo sublunar.

Aristóteles considerava que, se a esfera da Lua não provocasse esse revés no mundo sublunar, a Terra, constituída pelo elemento pesado terra, ocuparia naturalmente a esfera localizada no centro geométrico do universo. Da mesma forma, a água, de menor peso que o elemento terra, encontrar-se-ia em uma armação concêntrica em torno da região central da Terra. O ar, elemento leve, porém menos que o fogo, ocuparia a esfera entre a Terra e o fogo. E o fogo, por ser extremamente leve, estaria localizado na sua própria esfera, imediatamente abaixo da esfera da Lua.

Tendo atingido essas posições pela lei do movimento natural, esses elementos ficariam no seu lugar mantendo a sua total pureza. Em outras palavras, era a natureza da substância que determinava a tendência do seu movimento. Por consequência, a queda dos corpos deveria obedecer a essa lei – os corpos pesados caem porque é sua tendência por natureza ir para seu lugar de origem (PEDUZZI, 2018a).

Destarte, entregue a si próprio, sem ser perturbado por forças exteriores, o mundo sublunar tornar-se-ia um lugar estático, refletindo as esferas celestes na sua estrutura. Mas como esse mundo era perturbado, os movimentos do céu eram os agentes responsáveis por todas as mudanças observadas no mundo sublunar.

Por não ter sido menos importantes que o mundo supralunar, na versão de Aristóteles, bem como em uma “maior extensão na revisão da cosmologia aristotélica, na época medieval cristã, o pequeníssimo núcleo central do universo foi a semente a partir da qual todo o resto foi feito” (KUHN, 1990, p. 103-104).

Implicado nessa extensão e na ideia de que os movimentos do céu são os agentes de mudança no mundo sublunar, o “poder do céu aristotélico” tornou-se um elemento fundamental da crença na existência física das esferas celestes. Acreditava-se que, pelo seu movimento produzir, por fricção, as mudanças terrestres, ele dava condição para os astrólogos sentirem-se capazes de “predizer as futuras configurações do céu, capacitando o homem para adivinhar o futuro dos homens e das nações” (Ibid., p. 100). Acerca disso, pode-se afirmar que:

Antes do século II a. C., registros antigos mostram alguns sinais de uma tentativa completamente desenvolvida para predizer os pormenores dos negócios terrestres a partir das posições observadas e calculadas das estrelas e dos planetas. Mas, depois deste começo relativamente tardio, a astrologia ficou inseparavelmente ligada à astronomia durante 1800 anos; juntas constituíram uma única pesquisa profissional. A astrologia que predizia o futuro dos homens e das nações, a partir das estrelas, ficou conhecida como **astrologia judicial**; a astronomia que predizia o futuro das estrelas, a partir do seu presente e passado, ficou conhecida como **astrologia natural**. Aqueles que ganharam fama em uma área eram, naturalmente, também conhecidos na outra. Ptolomeu, cujo *Almagesto* exibia a astronomia antiga na sua forma mais desenvolvida, era igualmente famoso pelo seu *Tetrabiblos*, contribuição clássica da antiguidade para a astrologia judicial. Astrônomos europeus como Tycho Brahe e Johannes Kepler que, no final do Renascimento, deram ao sistema de Copérnico uma forma muito semelhante à atual, foram apoiados financeiramente e intelectualmente porque se pensava que faziam os melhores horóscopos. (KUHN, 1990, p. 100)

Nessa passagem, está implicada a ideia de que a astrologia e o poder do céu aristotélico forneceram mais um exemplo das consequências indiretas incididas sobre o problema conceitual externo do componente visão de mundo. Bem como mais uma classe desse problema, isto é, *conceitual externo intracientífico*, o qual resulta na crença da estabilidade da Terra (imobilidade) e sua qualidade de ser rara no universo.

Para esse último detalhe, e para provar a centralidade da Terra no centro do universo, Aristóteles apresentou alguns argumentos fundamentados em sua lógica, utilizando-se das leis do movimento natural. Nesse sentido, ele afirmou:

O movimento natural da Terra como um todo, assim como o das suas partes, é em direção ao centro do todo (Universo): essa é a razão por que ele agora está realmente situado no centro - mas pode ser questionado, já que ambos os centros são os mesmos, com que capacidade o movimento das coisas pesadas ou partes da Terra se dirigem para ele? Este é o objetivo deles porque é o centro da Terra ou porque é o centro do todo? O objetivo, certamente, deve ser o centro do todo, pois o fogo e outras coisas leves se movem para a extremidade da área que contém o centro. Acontece que a Terra e o todo têm o mesmo centro, assim o objetivo de seu movimento é indicado pelo fato de que os corpos pesados se movem em direção ao centro da Terra. (ARISTÓTELES, 1922, p. 269<sup>a</sup>, tradução própria)

Utilizando-se da experiência sensorial, perspectiva psicologicamente persuasiva, esses e outros exemplos marcam a força da percepção sensível e do senso comum das explicações aristotélicas. Particularmente, a localização da Terra, como única e central no universo, nos séculos posteriores à morte de Aristóteles, novamente ganhou muita força na teologia cristã. Nessa área, os fundamentos religiosos e físicos estabeleceram que o inferno estivesse localizado no centro da Terra. Já a morada de Deus estaria localizada para além das esferas das estrelas fixas.

Como um componente refletido no imaginário cultural renascentista, essa integração teológica e filosófica se materializou no famoso poema de Dante Alighieri (1321 - 1265), *A Divina Comédia*, escrito no século XIV – este poema encontra-se dividido em três partes: inferno, o purgatório e o paraíso. Aliado à tese da centralidade da Terra, os argumentos aristotélicos sobre a imobilidade da Terra preconizavam que aventar a mobilidade da Terra, era clara violação das leis do movimento natural e da sua própria natureza constituinte (elemento terra). Em duas passagens de sua obra *De Caelo*, Aristóteles afirmou:

Está claro, então, que a Terra deve estar no centro e imóvel, não apenas pelas razões já dadas, mas também porque os corpos pesados que são lançados à força para longe do centro, mesmo para distâncias muito grandes, retornam ao ponto de onde começaram. A partir dessas considerações, fica claro que a Terra não se move e não está em outro lugar além do centro [...] Todo movimento ou é natural ou é não natural (forçado), e aquele movimento que é não natural para um corpo é natural para outro [...]. Segue-se necessariamente que o movimento circular, não natural para corpos como (a terra), é natural para algum outro [...]. Se, por outro lado, o movimento de rotação dos corpos em torno de um centro fosse não natural, seria extraordinário e, na verdade, inconcebível que fosse contínuo e eterno, sendo contrário à natureza. (ARISTÓTELES, 1922, p. 269<sup>b</sup>, tradução própria)

Dessa passagem, segue-se, necessariamente, que, se a Terra girasse em torno do seu próprio eixo, como propôs Heráclides de Ponto (próximo texto), o seu movimento não poderia ser eterno, já que era não natural. Por conseguinte, para que o movimento axial da Terra fosse eterno, este deveria ser um movimento natural.

Contudo, se essa condição fosse satisfeita, todos os corpos, no domínio da Terra, deveriam, individualmente, compartilhar esse movimento natural com ela, movendo-se naturalmente em uma trajetória circular. Pelo contrário, o que se observava no movimento individual de cada um dos corpos, era o seu movimento em linha reta em direção ao centro do universo, ou se afastando dele. Consequentemente, isso implicava que, no pensamento aristotélico, o movimento circular da Terra seria forçado e não natural. Observada a

consideração aristotélica de que “todas as coisas cujo movimento era violento e não natural, eram movidas por algo, e algo externo a elas” (ÉVORA, 1993, p. 42).

Para garantir que a Terra tivesse um movimento eterno, contínuo e infinito, era preciso que existisse algo externo para causar esse movimento infinito. Mas, por sua concepção preconizar que “nada finito pode causar movimento que dure em tempo infinito”, uma força finita não podia pertencer a uma magnitude finita. Portanto, o movimento circular dos corpos celestes, observados no mundo supralunar, não tinha como ser dado para a Terra (ÉVORA, 1990).

A implicação da imobilidade da Terra, como um novo problema de natureza empírica, tornar-se-á um dos mais importantes problemas da história da astronomia, da cosmologia e da física, por vários motivos. Sem adiantar as discussões, um deles é que, do ponto de vista da experiência sensível, torna-se muito mais fácil acreditar na imobilidade da Terra, a partir dos argumentos de Aristóteles.

Por exemplo, na experiência em que um objeto é atirado verticalmente para cima, ele não poderia cair no mesmo lugar de onde foi lançado. Uma vez que, enquanto estivesse no ar, o solo deveria se deslocar para leste e com isso o objeto deveria cair em algum ponto para oeste do seu lugar de partida. Mas, segundo Aristóteles, não era isso que as observações visuais mostravam.

A imobilidade da Terra não podia ser questionada, pois Aristóteles, importante filósofo da Antiguidade grega, “declarava que a Terra estava imóvel, e sua palavra foi levada muito a sério pelos seus sucessores, para muitos dos quais ele se tornou ‘o Filósofo’, a primeira autoridade em todas as questões da ciência e da cosmologia” (KUHN, 1990, p. 104). As objeções sobre a mobilidade da Terra permaneceram como uma constante no pensamento astronômico, cosmológico e físico ocidental, por muitos séculos. Sua resistência somente ruiu com a ruptura com a visão de mundo aristotélica.

Por fim, é muito importante ressaltar que a cosmologia e física de Aristóteles, antes de tudo, em seu contexto histórico-cultural, refletem um esforço humano complexo de compreensão racional da realidade material, perfeitamente integrada a um sistema de pensamento coerente e abrangente (PORTO, 2009).

Aristóteles buscou articular em sua cosmologia e sua física, uma explicação lógico-verbal dos fenômenos celestes e terrestres, alinhando seus pressupostos filosóficos com as experiências e observações empíricas da própria vivência humana. Portanto, devido à consistência de sua malha conceitual, suas ideias e visão de mundo foram amplamente

incorporadas no pensamento astronômico, cosmológico, físico, filosófico, metafísico e até religioso no mundo ocidental.

Como será no próximo capítulo 6, mesmo com esse alcance, outras cosmologias contemporâneas à sua, foram desenvolvidas, a saber, por Heráclides de Ponto e Aristarco de Samos, que surgiram no contexto da tradição de pesquisa grega antiga, para rivalizar as ideias astronômicas e cosmológicas de Pitágoras, Filolau, Platão e do próprio Aristóteles.

É importante observar, novamente, duas coisas. A primeira é que diferente de uma visão de ciência, preconizada pela hegemonia de determinadas correntes de pensamento, em determinados contextos históricos investigativos, a existência dessas cosmologias rivais, especialmente, em relação à aristotélica predominante, evidencia a pluralidade de ideias na ciência como uma regra e não exceção. A segunda, diz respeito à cosmologia de Aristarco de Samos, que permite corrigir a ideia que circula em alguns livros didáticos de física, especialmente, do ensino médio, de que Copérnico foi o astrônomo que concebeu a ideia do heliocentrismo. Quando na verdade, esse feito pode ser creditado a Aristarco (HEATH, 2004).

No próximo capítulo, como já observado, também será contemplado o adendo histórico da medida do diâmetro da Terra, por Eratóstenes de Cirene, o protagonismo feminino de Hipátia de Alexandria, a importância histórica da Biblioteca de Alexandria. No capítulo 7, a importância da teoria planetária de Apolônio de Perga, das contribuições astronômicas de Hiparco de Nicéia e, por fim, o conjunto de teorias planetárias de Claudio Ptolomeu e suas explicações teóricas, via astronomia matemática instrumentalista, para todos os problemas empíricos da tradição de pesquisa grega antiga.

## 6 NOVAS COSMOLOGIAS DA TPGA E O TAMANHO DA TERRA

Como já observado, neste capítulo serão abordados as cosmologias contemporâneas e rivais, à visão de mundo e a cosmologia de Aristóteles. Nessa abordagem, a pluralidade de ideias científicas, no contexto da tradição de pesquisa grega antiga, permitiu o grande avanço dessa tradição em direção ao seu apogeu.

### 6.1 A COSMOLOGIA DE HERÁCLIDES DE PONTO

Antes de falar do modelo cosmológico de Heráclides de Ponto (370-310 a. C.), destaca-se que sobre sua vida e trabalhos sabe-se muito pouco. A razão disso é que “infelizmente, todos os seus escritos estão perdidos, de modo que, o que é sabido sobre seus documentos astronômicos é derivado apenas das alusões de escritores posteriores” (DREYER, 1953, p. 426).

Mesmo assim, alguns detalhes dessas alusões foram “suficientes para garantir que Heráclides realmente tenha tido pontos de vistas mais avançados do que aqueles de seus contemporâneos” (Idem). Especialmente, no que diz respeito à defesa da mobilidade da Terra, apesar de sua visão mundo geocêntrica. Acerca disso, Heráclides adotou a ideia da rotação da Terra em torno do seu próprio eixo, de leste para oeste, no período de 24 horas, defendida primeiramente no modelo cosmológico de Filolau, em contra senso com a visão cosmológica de Pitágoras.

Assumindo essa atitude, destaca-se que Heráclides não acreditava na existência do fogo central e da anti-Terra, mas na consistência desse movimento axial terrestre, para explicar a aparente revolução diurna dos céus e os fenômenos do dia e da noite. Esses entes metafísicos (fogo central e anti-Terra) foram banidos do pensamento cosmológico grego com a “expansão do horizonte geográfico” alcançado pelas descobertas a leste e oeste da Grécia.

Afirma-se que um geógrafo cartaginense grego chamado Hanno, “fizera sua grande viagem de descobertas além dos *Pilares de Hércules*, bem como do outro lado oriental, em que a Índia se tornara parte do mundo conhecido” (DREYER, 1953, p. 428). Os *Pilares de Hércules* são cadeias de montanhas que demarcam a entrada para o Mar Mediterrâneo, pelo lado ocidental da Grécia. Não obstante, a principal implicação acerca dessa expansão geográfica grega, foi que:

Naturalmente se esperaria que, se as viagens fossem feitas longe o suficiente para leste e oeste, pontos seriam alcançados, a partir dos quais seria possível ver a anti-Terra. Mas, como nem a anti-Terra nem o fogo central provaram, de fato, ser visíveis, essa porção do sistema pitagórico tinha que ser sacrificada. (DREYER, 1954, p. 428, tradução própria)

Essa ideia antiga da rotação axial da Terra, mantida viva no pensamento astronômico e cosmológico grego, mesmo na contemporaneidade aristotélica, foi suficiente para que, posteriormente, Copérnico propusesse uma importante *reinterpretação neoplatônica* ou *neopitagórica* da astronomia de sua época, século XVI.

Outro construto do modelo cosmológico de Heráclides se constitui na sua proposta de solução para o *problema empírico do brilho aparente dos planetas Mercúrio e Vênus* (DREYER, 1953). Resgatando alguns relatos proferidos por comentadores e autores antigos, por exemplo, Simplicio, Chalcidius, Vitruvius e Martianus Capella (COHEN MORRIS; DRABKIN, 1966) no primeiro deles (Simplicio), afirma-se que Heráclides pensou o seguinte:

[...] os fenômenos poderiam ser explicados supondo que o céu e as estrelas estivessem em repouso, e que a Terra estivesse em movimento sobre os polos do equador de oeste para leste, realizando aproximadamente uma rotação completa a cada dia. A palavra "aproximadamente" é adicionada por causa do movimento do Sol no valor de um grau. (COHEN MORRIS; DRABKIN, 1966, p. 106-107, tradução própria)

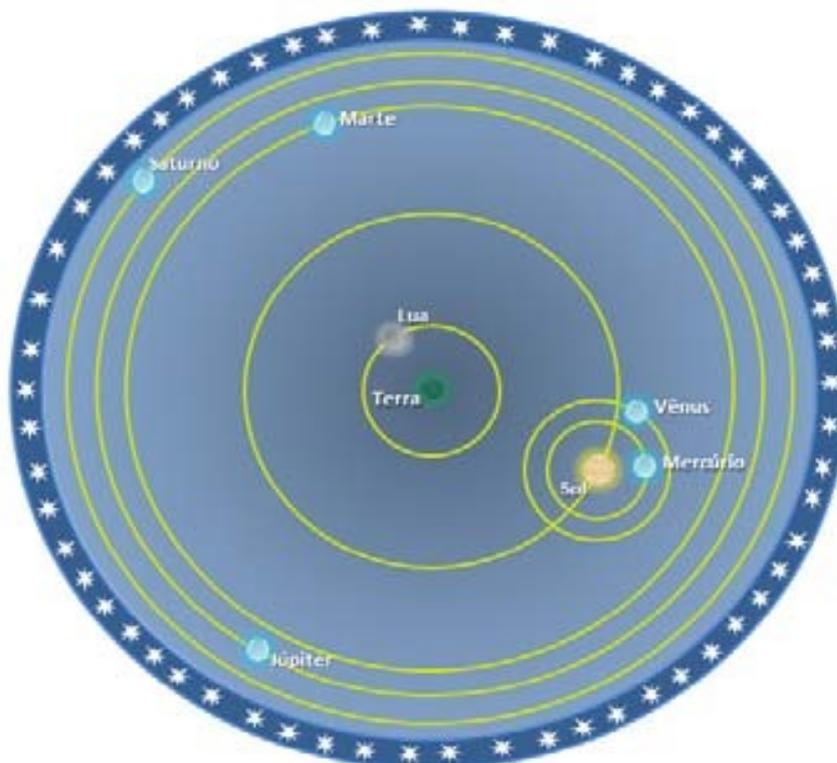
No segundo (Chalcidius), “ao descrever o caminho de Vênus e do Sol e apontar um ponto médio para ambos, Heráclides de Ponto mostrou como Vênus estava algumas vezes acima e outras vezes abaixo do Sol” (Ibid., p. 107).

De modo semelhante, em um terceiro relato, Vitruvius afirmara que no modelo cosmológico de Heráclides, “as estrelas de Mercúrio e Vênus faziam suas retrogradações e retardamentos em torno dos raios do Sol, fazendo uma coroa, por assim dizer, por seus cursos, tendo o Sol como centro” (Idem). Por fim, no quarto relato, Martianus Capella considerou que:

[...] embora Vênus e Mercúrio mostrassem ajustes diários, seus caminhos circulares não circundavam a Terra, mas ao redor do Sol, em movimento mais livres. Em suma, eles colocavam o centro de suas órbitas no Sol; de modo que, algumas vezes, se moviam acima e às vezes abaixo, isto é, mais perto da Terra. Vênus estava distante do pecado, Mercúrio estava mais perto da Terra, e quando estavam abaixo do Sol, Vênus estava mais perto, já que seu caminho circular era mais amplo e mais extenso. (COHEN MORRIS; DRABKIN, 1966, p. 107, tradução própria)

Em conformidade com esses relatos, um esquema meramente ilustrativo do modelo cosmológico de Heráclides é apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Modelo cosmológico de Heráclides.



Fonte: Peduzzi (2018a, p. 21).

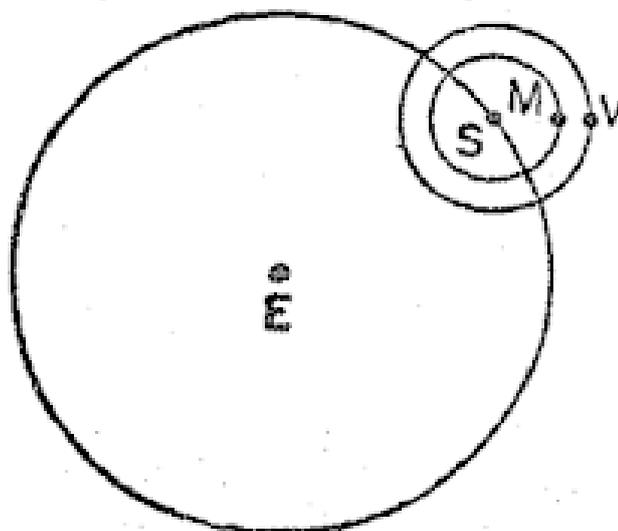
Nesta Figura 13, encontra-se a Terra no centro, a Lua girando ao seu redor, na primeira esfera concêntrica orbitando a Terra. Depois da esfera da Lua, encontra-se a esfera da órbita do Sol. Em torno deste astro, orbitam os planetas Mercúrio e Vênus, respectivamente. E nas demais esferas externas, encontram-se, orbitando a Terra, os planetas Marte, Júpiter, Saturno, por fim, a esfera das estrelas fixas. É importante ressaltar que, nesse esquema ilustrativo (Figura 13), mesmo ocupando a posição central no universo da cosmologia de Heráclides, a Terra é dotada de um movimento axial de oeste para leste, em 24 horas, em torno de um eixo que passa pelo centro desse modelo. Por sua vez, para Heráclides, assim como para Filolau, essa rotação axial terrestre explicava o movimento periódico das estrelas, que mantêm fixas as suas posições entre si.

Com esse engenhoso modelo, Heráclides forneceu uma “solução” para o problema empírico do brilho aparente dos planetas Mercúrio e Vênus, caracterizado pelas variações periódicas e movimentos alternados de aproximação e afastamento desses planetas, em

relação a Terra. Para isso, ele admitiu dois pressupostos: primeiro, considerou que Mercúrio e Vênus não giravam em torno da Terra, em uma órbita constante, como o movimento da Lua; segundo, pressupôs que os movimentos de Mercúrio e de Vênus estavam vinculados ao Sol, orbitando seu entorno (Figura 13).

Frente a essa tentativa de solucionar o problema empírico do brilho aparente dos planetas Mercúrio e Vênus, sabe-se que do ponto de vista conceitual, o modelo de Heráclides não explicava o *problema empírico do movimento retrógrado dos planetas*, o mais importante da tradição de pesquisa grega antiga. Mesmo assim, seu pressuposto acerca dos planetas Mercúrio e Vênus orbitarem o Sol, abriu o caminho para a ideia do “movimento epicíclico que desempenhou um papel muito importante no desenvolvimento final da astronomia matemática grega” (COHEN Morris; DRABKIN, 1966, p. 106). Posto que, “ao descrever órbitas circulares ao redor do Sol, enquanto o Sol descreve uma órbita circular em torno da Terra, Mercúrio e Vênus traçariam caminho epicíclicos” (Idem). Uma ilustração do mecanismo envolvendo o movimento epiciclo é apresentada na (Figura 14).

Figura 14 – O mecanismo do epiciclo.



Fonte: Cohen Morris e Drabkin (1966, p. 106).

É importante observar que é essa ideia do mecanismo do epiciclo foi adotada pelo astrônomo Apolônio de Perga, no século II a. C, como elemento essencial de sua teoria planetária do epiciclo-deferente. Posteriormente, a teoria de Apolônio adotada e aperfeiçoada por Cláudio Ptolomeu, no século II d. C. Período no qual, de fato, astronomia matemática instrumentalista da tradição de pesquisa grega antiga alcançou seu verdadeiro apogeu, vindo a ser colocada a prova, apenas a partir dos treze séculos que separam os trabalhos de Cláudio

Ptolomeu de Nicolau Copérnico. Mas, antes de chegar a esse momento histórico, a seguir, será apresentado e discutido o modelo cosmológico heliocêntrico de Aristarco de Samos, astrônomo também chamado de “*O Antigo Copérnico*”, pelo historiador da astronomia grega antiga Sir Thomas Heath (1861-1940).

## 6.2 A COSMOLOGIA DE ARISTARCO DE SAMOS

Na contemporaneidade de Aristóteles, o modelo cosmológico de Aristarco de Samos (310-230 a. C.) representou uma verdadeira objeção à visão de mundo geocêntrica, no contexto investigativo das cosmologias gregas. Como um excepcional astrônomo e geômetra de sua época, Aristarco imprimiu no pensamento astronômico e cosmológico grego a ideia de um modelo heliocêntrico, a fim de descrever o comportamento dos fenômenos celestes. Essa ideia ficou marcada no seu tratado *On the Sizes and Distances of the Sun and Moon* (HEATH, 2004) – *Sobre os tamanhos e distâncias do Sol e a Lua*.

As contribuições de Aristarco evidenciam uma das grandes marcas do crescimento científico, ao mostrar que “a ciência avança quando utilizamos hipóteses que contradizem teorias solidamente confirmadas” (FEYERABEND, 1985, p. 38). Haja vista que essas “hipóteses fornecem dados que não poderiam ser obtidos de outro modo”, da mesma forma que deve se observar que “não há ideia, por mais antiga e absurda, que não seja susceptível de melhorar o nosso conhecimento” (Ibid., p. 45).

Por ter defendido em seu modelo cosmológico, a imobilidade das estrelas fixas e do Sol, bem como os dois movimentos para a Terra – o movimento diurno de rotação em torno do próprio eixo e de translação ao redor do Sol, no centro do seu modelo cosmológico de universo –, Aristarco foi acusado de *impiedade*, isto é, falta de respeito com a tradição astronômica e cosmológica antiga, preconizada pelos compromissos metodológicos e ontológicos estabelecidos. De acordo com o historiador antigo Plutarco, em seu livro *Sobre a face visível no orbe da Lua*,

[...] os Gregos deviam fazer isso contra Aristarco de Samos, sob o pretexto de que ele movera o coração do mundo ao tentar salvar os fenômenos, supondo que o céu permanece imóvel e que a Terra se move ao longo de uma órbita oblíqua, ao mesmo tempo em que gira em redor do seu eixo. (PLUTARCO, 2010, p. 36)

Observando essa afirmação, o principal elemento constitutivo dessa tentativa contra a liberdade de pensamento de Aristarco reside no poder autoritário da visão de mundo

geocêntrica, que marcou profundamente a atividade astronômica e cosmológica e o pensamento científico ocidental tanto em sua época quanto em épocas posteriores. Porém, sua coragem e audaciosa, frente à observação de Plutarco, dentre outras coisa, permite mostrar a face da natureza do conhecimento científico que, segundo o filósofo da ciência Feyerabend (1985):

É antes um sempre crescente oceano de alternativas mutuamente incompatíveis (e talvez até mesmo incomensuráveis), forçando cada teoria isolada, cada conto de fadas particular, cada mito concreto que faz parte da coleção, os restantes, a uma expressão mais conseguida, e contribuindo o conjunto, através deste processo de competição, para o desenvolvimento da nossa consciência. Nada está definitivamente estabelecido, pois nenhuma concepção pode ser omitida da concepção geral. (FEYERABEND, 1985, p. 40)

Em conformidade, com esse aspecto da natureza do conhecimento científico, as ideias cosmológicas de Aristarco foram discutidas por seu jovem contemporâneo, Arquimedes de Siracusa (287 - 212 d. C). Acerca disso, Arquimedes afirmou o seguinte:

Aristarchos publicou um livro considerando certas hipóteses, no quais aparecem, como uma consequência destas suposições, que o universo é muitas vezes maior do que o “universo” mencionado [...]. Suas hipóteses são que as estrelas fixas, situada ao redor do mesmo centro que o Sol, é tão grande que o círculo, no qual ele supôs a Terra [...], mantém uma proporção tão grande em relação à distância das estrelas fixas quanto o centro da esfera mantém em relação à sua superfície. (HEATH, 2004, p. 510-511, tradução própria)

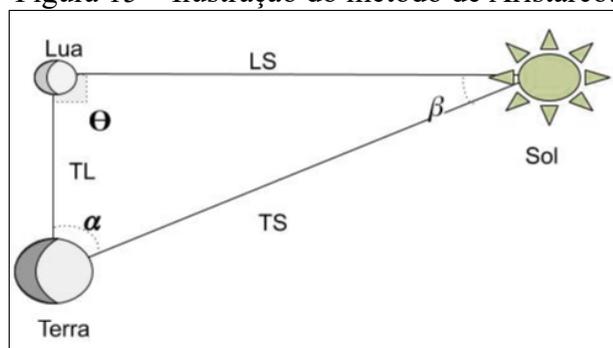
Em relação a essa discussão, Aristarco desenvolveu um método engenhoso e extenso, a fim de calcular as distâncias relativas entre o Sol, a Lua e a Terra. Os principais elementos que substanciam suas explicações encontram-se estabelecidas em seis hipóteses. As três primeiras preconizam, respectivamente, o seguinte:

1ª hipótese: a Lua recebe a luz do Sol; 2ª hipótese: a Terra se comporta como um ponto e centro para a esfera na qual a Lua se move e; 3ª hipótese: quando a Lua nos aparece dividida em duas partes iguais, o grande círculo que divide as porções clara e escura da Lua está na direção do nosso olho. (COHEN MORRIS; DRABKIN, 1996, p. 109, tradução própria)

Em conformidade com essas três hipóteses, Aristarco estabeleceu as relações entre as distâncias Terra-Lua (TL) e Terra-Sol (TS), considerando sua “4ª hipótese: a Lua recebe sua luz do Sol no momento da dicotomia claro-escuro” (ÉVORA, 1993, p. 49). Para tanto, ele

admitiu que os centros do Sol, da Lua e da Terra formam um triângulo retângulo, que permite calcular as distâncias relativas do Sol e da Lua em relação a Terra (Figura 15).

Figura 15 – Ilustração do método de Aristarco.



Fonte: Adaptado de Maria Lopes (2001, p. 112).

Na Figura 15, o ângulo teta ( $\Theta$ ) formado junto à Lua é um ângulo reto (medida de noventa  $90^\circ$  graus). Partindo-se disso, mas medindo o ângulo alfa ( $\alpha$ ), Aristarco pôde determinar a relação entre as distâncias Terra-Sol e Terra-Lua. Para tanto ele observou que a distância Terra-Sol deveria ser maior que dezoito, e menor que vinte vezes a distância Terra-Lua. Além disso, com sua quarta proposição (4<sup>a</sup> hipótese), Aristarco mediu o ângulo alfa, no momento da dicotomia da Lua, como sendo “menor do que um quadrante, por 1/30 de um quadrante, isto é,  $87^\circ$  graus” (ÉVORA, 1993, p. 51).

Assumindo a relação ( $\alpha + \beta + \Theta = 180^\circ$  graus) – Figura 15 – e sabendo que ( $\Theta = 90^\circ$  graus), Aristarco chegou à conclusão de que do valor do ângulo beta seria ( $\beta = 3,0^\circ$  graus). Sabendo o valor desses dois ângulos, ele aplicou-se a lei dos senos: ( $TS / \text{sen. } \theta = TL / \text{sen. } \beta$ ) ou ainda ( $TS / TL = 1 / \text{sen. } \beta$ ). Substituindo o valor de ( $\beta = 3,0^\circ$  graus) na última relação, Aristarco encontrou a relação ( $TS/TL \approx 19$ ), cuja distância Terra-Sol era dezenove vezes maior do que a distância Terra-Lua. Todavia, atualmente, sabe-se que o valor do ângulo  $\beta$  não é de  $87^\circ$  graus, mas ( $89, 85^\circ$  graus), logo ( $\beta = 0,15^\circ$  graus). Com isso, o valor aceito hoje é o da relação de distância ( $TS/TL = 382$ ) – (BERRY, 1971).

Sobre essas imprecisões dos cálculos de Aristarco, considera-se que, acima de tudo, isso não deve ofuscar a brilhante criatividade e engenhosidade do seu método de medidas das distâncias relativas (TS e TL). Isso porque, se por um lado, desde Pitágoras até esse momento, as explicações para esse importante problema empírico sempre foram apresentadas por vias especulativas e meramente qualitativas, por outro, as discrepâncias nos valores dos ângulos e, conseqüentemente, das distâncias relativas (TS/TL) obtidas por Aristarco, refletem em sua:

[...] dificuldade em determinar com precisão suficiente o momento em que a Lua está meio cheia: o contorno divisório das partes clara e escura da face da Lua é na realidade devido às irregularidades da superfície da Lua. Uma linha mal definida, tal que a observação na qual Aristarco baseou seu trabalho não poderia ter sido feita com qualquer precisão, mesmo com nossos modernos instrumentos, muito menos com aqueles disponíveis em seu tempo. (BERRY, 1971, p. 35, tradução própria)

Em função dessas dificuldades, o trabalho de Aristarco representou um grande avanço da tradição de pesquisa grega antiga, pois mostra claramente o substantivo deslocamento do pensamento científico nos estudos astronômicos e cosmológicos grego de seu tempo. Aristarco evitou as especulações filosóficas anteriores, a fim de buscar um tratamento matemático quantitativo para os problemas empíricos celestes, especialmente, o problema das distâncias das órbitas dos planetas.

Embora Aristarco tenha estimado (sem muita precisão) os diâmetros aparentes do Sol e da Lua, como sendo quase iguais, utilizando-se de um eclipse solar, para observar o fato de a Lua, alguns vezes, ocultar a superfície do Sol e, outras vezes, não cobri-lo completamente. Deve-se lembrar de que, ele “deduziu corretamente que os diâmetros reais do Sol e da Lua eram proporcionais às suas distâncias” (Ibid., p. 35).

Dando continuidade, a quinta e sexta hipóteses de Aristarco preconizam que “a largura da sombra da Terra, quando a Lua a atravessa, corresponde a duas Luas” (COHEN Morris; DRABKIN, 1966, p. 109); e “a Lua subentende (1/15) de um signo do zodíaco (1/15) de trinta graus (30°), portanto, o diâmetro aparente da Lua é de dois graus (2°)” (Idem).

Segundo Berry (1971), essa estimativa de dois graus para o diâmetro da Lua, ao invés do valor correto (0.5°) graus, é reflexo da própria imprecisão dos cálculos de Aristarco que, conseqüentemente, acarreta nas contradições de algumas de suas conclusões. Posto que, é sabido por Arquimedes, que “Aristarco descobriu que o diâmetro aparente do Sol era cerca de 1/720 do círculo do zodíaco, isto é, 0.5° graus” (HEATH, 1981, p. 19-20). Isso corresponde a um valor muito próximo do real (0.55° graus). Em face desse valor angular de (0.5° graus) para o diâmetro do Sol, ressalta-se que, mesmo como o relato de Arquimedes, não é sabido como Aristarco chegou a essa estimativa. Portanto, sua sexta hipótese não deve ser entendida como um dado determinado pela observação.

Com suas cinco primeiras hipóteses, Aristarco acreditava estar apto a demonstrar, por exemplo, a proposição número sete do seu tratado, nesta: “a distância do Sol a Terra é mais do que dezoito vezes maior, e menos do que vinte vezes a distância da Lua a Terra” (COHEN Morris; DRABKIN, 1966, p. 110). Sabe-se que pelo valor real atual, isto é, que o

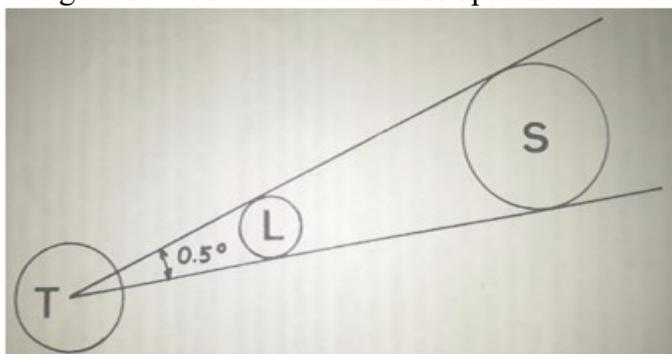
Sol está aproximadamente quatrocentas vezes mais distante da Terra, em comparação com a distância da Lua (384.400 km), a estimativa de Aristarco, infelizmente, era muito menor.

Mesmo assim, seu trabalho representou a primeira e mais ousada tentativa de resolver quantitativamente o problema empírico das distâncias dos planetas. Isso é o mais importante para a história da astronomia, da cosmologia e da física, justamente porque, sabe-se que com medidas mais precisas da distância TS, TL, Newton, muitos séculos depois, pôde dá um passo intelectual importante na direção da sua teoria da gravitação universal.

É relevante considerar os erros de Aristarco, a fim de poder refletir, a seguir, sobre a importância do erro na ciência. Acerca disso, Aristarco encontrou dificuldades para determinar, com acurácia, o ângulo junto a Terra, no momento da dicotomia. Na avaliação dele, esse ângulo media oitenta e sete ( $87^\circ$ ) graus, mas o valor real reside em ( $89,5^\circ$ ) graus (HEATH, 1981). Por conta disso, sua estimativa para o valor do ângulo junto ao Sol, isto é, de três ( $3^\circ$ ) graus, também se mostrou imprecisa.

Em outra dificuldade, ao tentar determinar os ângulos internos do triângulo formado pela Terra, Sol e Lua (Figura 16), no momento da dicotomia, ângulo interno ( $\Theta = 90^\circ$  graus), Aristarco se viu diante da impossibilidade de saber, exatamente, quando a metade do disco da Lua estava iluminada pela luz do Sol (ÉVORA, 1993).

Figura 16 – Medida do diâmetro aparente do Sol



Fonte: Évora (1993, p. 52).

Por sua vez, se por um lado essas dificuldades sintetizam os problemas de ordens técnicas ligadas aos instrumentos de medidas de Aristarco. Por outro, “na investigação de Aristarco é possível encontrar uma sequência lógica de proposições e rigor absoluto das demonstrações características da geometria grega” (HEATH, 1981, p. 54). E isso foi essencial para que a tradição de pesquisa grega antiga alcançasse o seu apogeu idealizado por Platão, anteriormente, quando, claramente, deixou registrado seu desejo e tarefa de prescrever

problemas para a astronomia, com o objetivo de desenvolver esta área da ciência, por meio da geometria.

Junto a esses fatores internos de dificuldades técnicas e imprecisão dos cálculos de Aristarco estavam as implicações ligadas ao *problema conceitual externo do componente visão de mundo*, que qualquer ideia contrária a visão geocêntrica enfrentava. Por exemplo, segundo Cohen Morris e Drabkin (1966), além de ser acusado de ter faltado com respeito para com a tradição, as ideias de Aristarco também contradiziam,

A doutrina de um fogo central (dos pitagórico) que, em várias formas, tornou-se uma matéria de crença religiosa. Os astrônomos, contudo, de um modo geral rejeitaram as hipóteses heliocêntricas sobre bases científicas. Se a Terra gira em uma órbita ao redor do Sol, a posição das estrelas fixas tal como observada, a partir de várias partes da órbita da Terra deveria variar. Uma vez que tal variação não era observada na antiguidade [...], Aristarco foi compelido a supor que a esfera das estrelas fixas era incomparavelmente maior do que a esfera que continha a órbita da Terra. (COHEN MORRIS; DRABKIN, 1966, p. 107, tradução própria)

Deve-se inferir dessa passagem que a resposta de Aristarco frente à dificuldade de ordem física para provar a mobilidade da Terra, residia na necessidade de observar o *fenômeno da paralaxe*. Fenômeno que só foi constatado, apenas em 1830, da nossa era, mediante a utilização de telescópios e técnicas observacionais bastante apuradas. Em face disso, sua premissa da incomensurabilidade da distância entre a Terra e as estrelas fixas foi a mesma exigência adota por Copérnico, no século XVI, quando também se viu diante desse mesmo problema empírico.

Em seu pequeno tratado *Commentariolus*, escrito muito antes de sua principal obra, *As Revoluções dos Orbes Celestes*, Copérnico postulou que: “a razão entre a distância do Sol a Terra e à altura do firmamento é menor do que a razão entre o raio da Terra e a sua distância ao Sol; e com muita razão, esta é insensível confrontada com a altura do firmamento” (COPÉRNICO, 1990, p. 104).

Outra objeção ao modelo cosmológico de Aristarco surgiu da dificuldade para explicar o problema empírico das desigualdades das estações do ano. Aristarco assumiu que os movimentos dos planetas eram circulares uniformes e, além disso, ele não atacou o problema do movimento retrógrado e do brilho aparente dos planetas, dois problemas atacados pelas cosmologias antecessoras e, por assim dizer, rivais.

Essa pode ter sido uma das prováveis razões de Hiparco de Nicéia e, mais tarde, Ptolomeu, terem adotado as hipóteses astronômicas e cosmológicas pertencentes à visão de

mundo geocêntrica. Por exemplo, esses astrônomos incorporaram, em suas teorias astronômicas, os artifícios matemáticos da teoria planetária do epiciclo-deferente desenvolvido por Apolônio de Perga, os quais, nem mesmo o próprio Copérnico hesitou em utilizar, posteriormente, para explicar os problemas empíricos mediante seu sistema astronômico. Adjacente a isso, afirma-se que um dos principais motivos do insucesso de Aristarco residiu nas mesmas razões que ultrapassaram os estudos de Aristóteles, Ptolomeu e Copérnico. Posto que essas razões materializaram-se na oposição a “toda hipótese não geocêntrica, isto é, a invencibilidade das objeções *físicas* contra o movimento da Terra” (KOYRÉ, 1973, p. 83). Por exemplo, nesse contexto, acredita-se que existia:

[...] uma ligação necessária entre o estado da física e o estado da astronomia. Ora, para a física antiga, o movimento circular (de rotação) da Terra no espaço se afigura — e deveria afigurar-se — como oposto a fatos incontestáveis e em contradição com a experiência cotidiana; em suma, como uma impossibilidade física. Ainda outra coisa constituía um obstáculo à aceitação da teoria de Aristarco, a saber, a grandeza desmesurada de seu Universo, pois, se os gregos admitiam que o Universo fosse bastante grande em relação a Terra - ele era até muito grande! Ainda sim, as dimensões postuladas pela hipótese de Aristarco lhes pareciam excessivamente inconcebíveis. (KOYRÉ, 1973, p. 83-84, tradução própria)

Complementando essa passagem, Koyré (1973) afirma também que:

Suponho que assim o era, pois em pleno século XVII ainda parecia impossível, a muita gente boa, admitir tais dimensões. Também se dizia — e isto é algo inteiramente razoável — que, se a Terra girasse em torno do Sol, isso se veria através da observação das estrelas fixas: que, se não se verificasse nenhuma paralaxe, é que a Terra não girava. Admitir que a abóbada celeste fosse tão grande que as paralaxes das fixas não fossem observáveis, parecia contrário ao bom senso e ao espírito científico. (KOYRÉ, 1973, p. 84, tradução própria)

Fica claro que, mesmo com a hipótese revolucionária do *heliocentrismo*, triunfante somente dois mil anos depois de Aristóteles, os entraves para o desenvolvimento científico são muitos e de naturezas diversas. Visto que Aristarco ofereceu uma “solução” para o problema das distâncias e o diâmetro angular do Sol e da Lua, mas não conseguiu resolver os demais problemas empíricos. Sua ideia aguçou o ímpeto do espírito científico, porém seu modelo cosmológico sofreu tanto com as dificuldades inerentes aos problemas conceituais internos, quanto ao componente conceitual externo da visão de mundo difundida pela cosmologia aristotélica e sua malha conceitual.

É preciso considerar que seu trabalho e seus erros de medidas revelam, antes de tudo, que *a ciência não existe sem o exercício constante da reflexão*. Neste exercício, seus erros,

em especial, mostram que o pensamento científico está em mobilização permanente, na qual, a substituição de um saber fechado e estático por um conhecimento aberto e dinâmico, oferece uma imagem mais clara de como a ciência funciona interna e externamente, em especial, na busca de solução de seus problemas empíricos e problemas conceituais, na história da astronomia, da cosmologia e da física.

Outro grande passo na direção do apogeu da tradição de pesquisa grega antiga será evidenciado na próxima seção, que aborda a medida da esfericidade da Terra realizada por Eratóstenes de Cirene, juntamente com adendo histórico ao protagonismo de Hipátia e o papel da Biblioteca de Alexandria nesse período histórico da ciência.

### 6.3 A MEDIDA DO TAMANHO DA TERRA POR ERATÓSTENES DE CIRENE

Eratóstenes de Cirene (276-194 a. C.) foi um jovem contemporâneo de Arquimedes, que se destacou na história da ciência pelos seus trabalhos na geometria e astronomia. Além disso, foi também o chefe da Biblioteca de Alexandria e, como tal, desenvolveu diversos estudos em diferentes áreas do conhecimento, por exemplo, “geografia, literatura, matemática e a astronomia, onde imortalizou seu nome” (KOYRÉ, 1973, p. 91).

Como uma das principais instituições do mundo antigo, juntamente como a Academia de Platão, a Biblioteca de Alexandria desempenhou um importante papel para o desenvolvimento da astronomia, da geometria, da arquitetura, da engenharia e, dentre outras áreas do conhecimento.

Sabe-se que após a morte do jovem conquistador grego, Alexandre o Grande (336 - 326 a. C.), isto é, durante a *Dinastia Ptolomaica* liderada inicialmente por Ptolomeu Soter, um dos generais, de Alexandre, a cidade de Alexandria foi elevada ao ponto máximo do seu apogeu, tornando-se o principal centro cultural do mundo antigo e a representação máxima da era helenística grega (MEY, 2004).

Estudiosos, sábios, artistas encaminhavam-se para lá, ou lá estudavam. Inúmeros avanços do conhecimento se deram naquele “centro de excelência”, em gramática, matemática, astronomia, geometria, mecânica e medicina. Cita-se entre os grandes nomes que lá estiveram e trabalharam: Eratóstenes, Aristarco, Hiparco de Bitínia, Euclides, Apolônio, Arquimedes, Heron, Herófilo, Erístrato, Hipátia - mulher sábia, astrônoma e matemática, cujo assassinato em 415 depois de Cristo, marca o fim da era científica de Alexandria, na Antiguidade. (MEY, 2004, p. 74-75)

Destacando-se um adendo para Hipátia de Alexandria (415 - 355 d. C.), afirma-se que ela foi a primeira mulher sábia, astrônoma e matemática, reconhecida na história grega. Além disso, é importante observar que Hipátia se destacou na história, por ter escrito comentários sobre duas importantes obras gregas: a Aritmética de Diofanto e as Seções Cônicas de Apolônio de Perga.

Essa última obra comentada por Hipátia foi fundamental para Johannes Kepler, no século XVII, solucionar o contundente problema empírico anômalo da órbita do planeta Marte, o planeta Vermelho e/ ou o Deus da Guerra, na mitologia Romana. Além disso, Hipátia (Figura 17), aos 30 anos de idade, tornou-se Diretora da Biblioteca de Alexandria (FONSECA, 2013).

Figura 17 – Hipátia de Alexandria.



Fonte: Mey (2004, p. 81).

Hipátia se dedicou aos estudos da matemática, filosofia, religião, poesia, oratória e retórica, além de, também, ter comentado o *Cânone Astronômico*. Porém, além de seu cruel assassinato, cometido por fanáticos fundamentalistas, seus escritos foram perdidos nos vários incêndios da Biblioteca de Alexandria (MEY, 2004). Para todas as mulheres que dedicam suas vidas à ciência, assim como para todas as jovens que aspiram um futuro na carreira científica, Hipátia de Alexandria deve ser vista e elogiada como uma expoente representante do protagonismo feminino na ciência. Ressalta-se que, apesar de não ter encontrado mais informações sobre essa ilustre pensadora grega, esta narrativa da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, reconhece a existência de Hipátia na história da ciência, como um símbolo importante para inspirar todas as jovens mulheres a trabalhar com e na ciência, especialmente, a física.

Retomando a atenção para o trabalho de Eratóstenes, especialmente, sobre a medida da esfericidade da Terra, sabia-se que, há muito tempo, Aristóteles buscou deduzi-la a partir de referências concretas no mundo dos sentidos, sem apresentar medidas do ponto de vista matemático. Seus argumentos foram os seguintes:

(i) Se a Terra não fosse esférica, os eclipses da Lua não exibiram segmentos da forma que o fazem; (ii) A observação das estrelas também mostra não só que a Terra é esférica, mas que também não é de grande dimensão, uma vez que uma pequena mudança de posição no nosso local para sul, ou para norte, altera visivelmente o círculo do horizonte, e assim as estrelas sobre as nossas cabeças mudam as suas posições consideravelmente, e nós não vemos as mesmas estrelas se nos deslocarmos para norte, ou para sul. (ARISTÓTELES, 1875, p. 297, tradução própria)

Com o desenvolvimento da ciência proporcionado pela fundação da Biblioteca de Alexandria, os estudiosos gregos não ficaram apenas nas especulações deduzidas das observações dos céus, pelo contrário, eles deram um passo à frente com Eratóstenes. Este geômetra, para chegar à medida do tamanho da Terra, sabia que em Siena – hoje Assuã, no Egito – as 12 horas, o Sol se encontrava no zênite e sua luz incidia perpendicularmente sobre os objetos. Em face disso, os raios solares iluminavam os poços profundos (PEDUZZI, 2018a). A Figura 18 ilustra a iluminação da água em um poço antigo na cidade de Assuã, no solstício de verão, sem sombras projetadas pelas paredes.

Figura 18 – Iluminação de um poço profundo na cidade de Assuã.



Fonte: Peduzzi (2018a, p. 28).

Eratóstenes calculou a distância angular entre essas duas cidades, considerando que “a cidade de Siena e de Alexandria possuíam a mesma longitude, isto é, o mesmo meridiano, e supondo que os raios solares incidiam paralelamente sobre a Terra, devido à grande distância entre os dois corpos celestes” (PEDUZZI, 2018a, p. 28). Ele mediu o comprimento

da sombra produzida por uma haste vertical no solstício de verão, as 12 horas em Alexandria e, a partir dos comprimentos da sombra e da haste, chegou a um ângulo de  $7,2^\circ$  graus (Figura 19).

Figura 19 – Elementos envolvidos nos cálculos de Eratóstenes



Fonte: Peduzzi (2018a, p. 28) adaptado de Corbisimages.

Com base nos elementos da Figura 7, em seus cálculos, Eratóstenes considerou o seguinte: sabendo-se que, em uma circunferência, a razão entre o comprimento de um arco e o ângulo por ele subtendido é constante, o perímetro da Terra estava para  $360^\circ$ , assim como a distância entre Siena e Alexandria estava para  $7,2^\circ$  ou  $1/50$  da circunferência. Matematicamente  $(2\pi/360^\circ)$  é igual a  $(x / 7,2^\circ)$ . Com isso, Eratóstenes colocara a determinação do tamanho da Terra em função da distância entre as duas cidades, cujo valor era estimado em 5.000 estádios (PEDUZZI, 2018a).

Com esse valor, Eratóstenes pôde medir a circunferência da Terra, realizando a seguinte operação:  $[2\pi r = (360^\circ/7,2^\circ) \times (5.000 \text{ estádios})]$ ; portanto, com  $(2\pi r = 250.000)$  estádios. Todavia, esse valor foi alterado para 252.000 estádios para, possivelmente, resultar em um valor exato de 700 estádios para cada grau sobre a Terra. Por sua vez, “esse valor de 5.000 estádios foi estimado tanto a partir de medidas feitas por agrimensores do rei, quanto por estimativas provenientes dos deslocamentos das caravanas que faziam o comércio entre esses dois lugares” (Ibid., p. 51).

Destaca-se que, o problema apontado acerca dessa medida é que não se sabe o valor que Eratóstenes atribuiu ao estádio, posto que a obra de sua autoria “*Sobre as medidas da Terra*” não sobreviveu ao tempo. Em vista disso, o detalhe mais importante é que, na época de Eratóstenes, havia muitas unidades com mesmo nome (*stadium*) e diferentes comprimentos, variando desde 156 até 210 metros.

Em razão dessa inexistência de padronização, diferentes fontes apontam diferentes valores para o resultado que teria sido encontrado por Eratóstenes. Entretanto, atualmente, é aceito que Eratóstenes tenha realmente utilizado o valor do *stadium* romano correspondente a 157.7 metros. Por esse valor, a circunferência da Terra medida por Eratóstenes, quando convertida para o sistema métrico moderno, passa a corresponder a, aproximadamente, 39.700 km. Um valor muito próximo do correto e atual (40.008 km). Destaca-se também que, é creditado a Eratóstenes todo o mérito de seu trabalho, ressaltando apenas algumas limitações que ele teve de contornar para estimar com precisão esse grande feito, a saber:

Por certo a Terra não é esférica, mas essa forma tão cara ao mundo antigo só vai ser questionada, no âmbito da ciência do século XVII. Os raios solares não incidem paralelamente na superfície terrestre. Siena e Alexandria não se encontram no mesmo meridiano. Há uma diferença de três graus entre as suas localizações. E o trópico de Câncer não passava por Siena nos dias de Eratóstenes. (PEDUZZI, 2018a, p. 52)

Pragmaticamente, essas limitações que Eratóstenes teve de contornar, assim como as dificuldades apresentadas pelo trabalho de Aristarco, são inerentes ao próprio fazer científico, em cada contexto histórico. O mais importante disso, é que suas investigações representaram os empreendimentos mais avançados de sua época, apesar da falta de precisão de suas medidas, devido aos problemas técnicos de seus instrumentos.

Certamente, tanto Eratóstenes como os demais estudiosos de seu tempo tinham plena consciência dessas dificuldades. Porém parece que elas funcionaram como combustível que alimentou o espírito científico na busca de novos conhecimentos. Nessa direção, no próximo capítulo, serão abordadas e discutidas, a teoria planetária do epiciclo-deferente de Apolônio de Perga, as contribuições de Hiparco de Nicéia, e o conjunto de teorias planetárias de Ptolomeu, bem como a distinção, anteriormente anunciadas, entre as correntes de pensamento instrumentalista e realista, para continuar demonstrando como a perspectiva da solução de problemas de Laudan operacionalizada na história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física permite, a cada capítulo, alcançar o principal objetivo desta tese.

## 7 AS NOVAS TEORIAS PLANETÁRIAS E O APOGEU DA TPGA

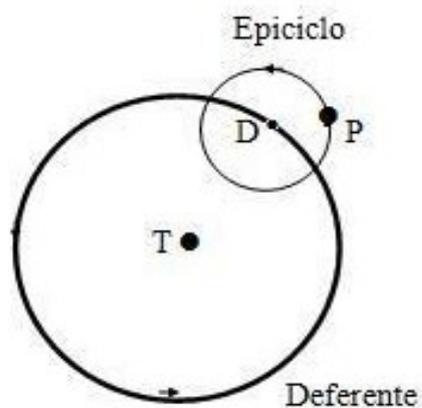
Neste capítulo, a teoria planetária do epiciclo-deferente de Apolônio, as contribuições astronômicas de Hiparco e o conjunto de teorias planetárias de Ptolomeu materializam o apogeu da tradição de pesquisa grega antiga, especialmente, por terem permitido uma explicação cinemática descritiva satisfatória, por meio da astronomia matemática instrumentalista, de todos os problemas empíricos abordados no contexto do desenvolvimento dessa tradição. Dessa forma, a primeira seção é dedicada à abordagem da teoria planetária do epiciclo-deferente de Apolônio, a segunda, às contribuições astronômicas de Hiparco, e a terceira, ao conjunto de teorias planetárias de Ptolomeu, incluindo, a distinção entre as correntes de pensamento instrumentalista e realista e alguns aspectos do seu importante livro *Almagesto*, representação máxima desse apogeu.

### 7.1 A TEORIA PLANETÁRIA DO EPICICLO-DEFERENTE DE APOLÔNIO

Após Eudoxo de Cnido apresentar uma explicação qualitativa das órbitas planetárias aparentes, o astrônomo, geômetra e matemático grego, Apolônio de Perga (262 - 190 a. C.), parece ter sido o primeiro a utilizar movimentos circulares simples para explicar o movimento de retrogradação dos planetas (NEUGEBAUER, 1983). Apesar disso, sabe-se que sua teoria planetária não se mostrou suficiente para explicar “a dependência dos arcos de retrogradação na longitude”, cuja representação correta consistia no objetivo principal de todas as teorias planetárias. Por isso, reside a importância das sofisticações que sua teoria experimentou posteriormente com Hiparco e Ptolomeu. Sabe-se também que sua teoria enfrentou os mesmos problemas conceituais internos que a teoria das esferas concêntricas de Eudoxo. Por exemplo, “a complexidade dos dados empíricos era tão grande que Hiparco (por volta de 150 a. C.) se absteve de formular uma teoria planetária consistente” (NEUGEBAUER, 1983, p. 311). Tarefa concretizada somente com os trabalhos *Almagesto* e *Hipóteses Planetárias* de Ptolomeu.

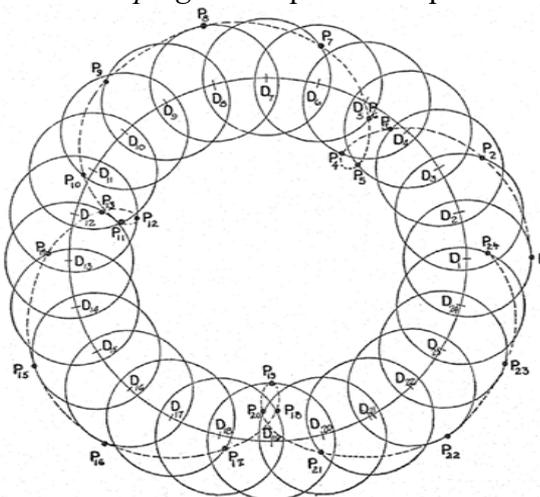
O principal foco da teoria de Apolônio residiu em explicar o movimento de retrogradação dos planetas externos, Marte, Júpiter e Saturno. De forma simplificada, sua teoria pode ser representada por um esquema ilustrativo que envolve um círculo pequeno (epiciclo). Este ciclo gira com velocidade uniforme em torno de um ponto que está localizado sobre a circunferência de outro círculo (o deferente - D) também em rotação (Figura 20).

Figura 20 – Esquema do epiciclo-deferente.



Fonte: Évora (1993, p. 56)

Sobre o esquema ilustrativo da (Figura 20), cada planeta (P) percorre a circunferência do epiciclo, cujo centro se movimenta ao longo da circunferência do deferente (D), que está centrada na Terra (T). Partindo disso, quando se observa o movimento do epiciclo, a partir do centro do deferente (D), esse movimento aparece alternado ora como acelerado, ora como retrógrado – como ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Os *loopings* no esquema do epiciclo-deferente.

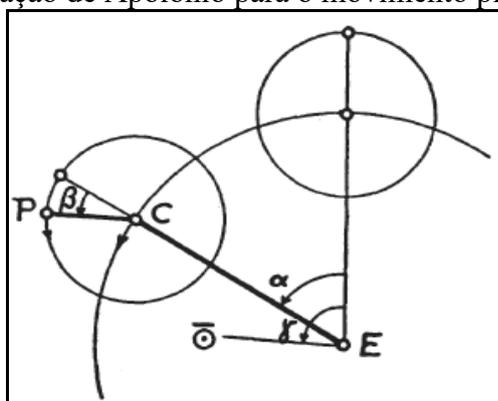
Fonte: Cohen Morris e Drabkin (1966, p. 129).

Na Figura 21, os vários *loopings* representam o movimento de retrogradação de um planeta (P) observado a partir da Terra. Nesse esquema ilustrativo da (Figura 21), as paradas e inversões de sentido do movimento acontecem quando as velocidades de rotação do planeta (P) e do deferente (D) possuem a mesma magnitude e estão em sentidos opostos. Destaca-se

que para elaborar sua teoria do epiciclo-deferente, Apolônio se fundamentou nos dados astronômicos utilizados nas teorias aritméticas dos astrônomos babilônios.

Esses dados consistiram nos números de rotações siderais de um planeta, mais o número de períodos sinódicos (ocorrências de conjunções), que são iguais aos números de anos. Por exemplo, em 79 anos, o planeta Marte realizava 42 rotações de longitude, juntamente com o Sol, que eram iguais a 37 rotações (NEUGEBAUER, 1983). Essa relação equivalia a um modelo de epiciclo, cuja condição satisfazia à relação  $(\alpha + \beta = \gamma)$  (Figura 22).

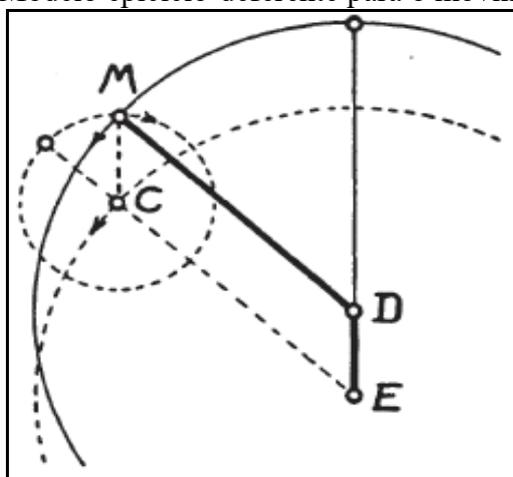
Figura 22 – Explicação de Apolônio para o movimento planetário retrógrado.



Fonte: Neugebauer (1983, p. 312).

Não se restringindo apenas ao movimento de retrogradação dos planetas externos, Apolônio também desenvolveu uma teoria para o movimento da Lua, semelhante ao movimento de epiciclo-deferente apresentado anteriormente, cuja representação é ilustrada na Figura 23.

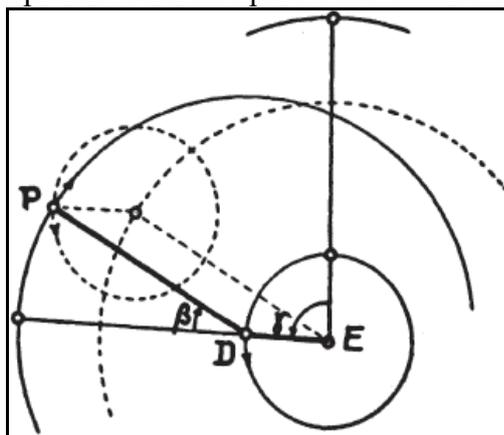
Figura 23 – Modelo epiciclo-deferente para o movimento da Lua.



Fonte: Neugebauer (1983, p. 313).

Na Figura 23, em um epiciclo, a Lua (M) descreve um círculo excêntrico, cuja excentricidade é igual ao raio do epiciclo. Por sua vez, isso implica dizer que, no caso de um planeta externo como Marte, Júpiter e Saturno, é exatamente esse esquema da teoria do movimento lunar que leva ao modelo epiciclo-deferente representado na (Figura 24), onde facilmente tem-se a construção de um paralelogramo simples.

Figura 24 – Modelo epiciclo-deferente para o movimento dos planetas externos.



Fonte: Neugebauer (1983, p. 314).

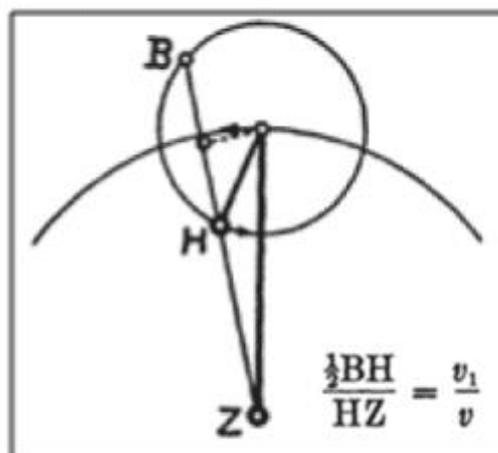
Observando a Figura 24, a relação  $(\alpha + \beta = \gamma)$  denota que os centros do deferente (D) e do epiciclo se movem com a velocidade média do Sol, em direção positiva ao redor do observador, que se encontra em E, enquanto isso, o planeta no epiciclo se move no sentido oposto, afastando-se do apogeu do epiciclo.

A equivalência da teoria do movimento lunar com a teoria epiciclo-deferente planetário foi possível, justamente, por Apolônio estar consciente das descrições heliocêntrica de Aristarco de Samos e geocêntrica de Heráclides de Ponto. Daí a razão dele ter utilizado a longitude do Sol como referência, por exemplo, ver a (Figura 22), apresentada anteriormente.

Com isso, as equivalências entre suas duas teorias passavam a depender apenas de qual dos vértices do paralelogramo era mantido fixo (NEUGEBAUER, 1983). Além desse seu engenhoso artifício, Apolônio desenvolveu um teorema para explicar os pontos estacionários dos planetas externos durante o período de retrogradação.

Nessa explicação, pelo esquema epiciclo-deferente, um planeta estaria estacionário em um ponto H de seu epiciclo para um observador em Z, desde que fosse considerada a validade da relação que segue ao lado da (Figura 25), a seguir, onde  $v_1$  representa a *velocidade angular do centro do epiciclo* e  $v$ , a *velocidade do planeta no epiciclo*.

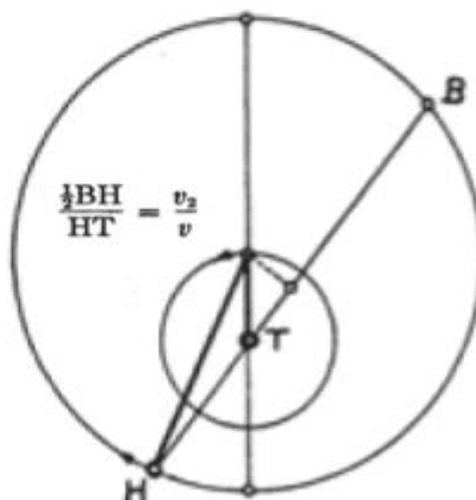
Figura 25 – Teorema de um ponto estacionário para os planetas externos.



Fonte: Neugebauer (1983, p. 314).

Em conformidade com a Figura 25, Apolônio considerou no esquema do deferente (Figura 26), que a condição para um ponto estacionário H, visto da Terra (T), seria dada pela relação que segue ao lado da Figura 26, em que  $v_2$  é a velocidade do centro do deferente e  $v$  é a velocidade do planeta.

Figura 26 – Esquema do deferente para um ponto estacionário H.



Fonte: Neugebauer (1983, p. 315).

Diante de todos esses esquemas ilustrativos, apresentados no contexto da teoria planetária do epiciclo-deferente de Apolônio, é possível perceber o grande esforço desse astrônomo para tentar explicar o movimento de retrogradação dos planetas externos (Marte, Júpiter e Saturno). Apesar da simplicidade explicativa de seus esquemas, em relação à teoria

das esferas concêntricas de Eudoxo, sua teoria também não se mostrou consistente, pois o uso dos dados observacionais babilônicos implicava na sua não *adequação empírica*.

Por sua vez, essa inconsistência, compreendida também como um *problema conceitual interno*, pesou muito contra a teoria de Apolônio, justamente, pela sua fraqueza epistêmica em “conformar com a precisão à experiência: em seu domínio, às consequências dedutíveis da teoria devem estar em clara concordância com os resultados da experimentação e da observação existente” (KUHN, 2011, p. 34). Nesse sentido, por exemplo, não se sabe se os dados empíricos sobre os arcos de retrogradação foram utilizados por Apolônio para determinar os valores numéricos dos parâmetros de seu modelo epiciclo-deferente (NEUGEBAUER, 1983).

Da mesma forma, sabe-se que os métodos usados por Ptolomeu foram forjados por ele próprio. Além disso, são justamente essas limitações que permitem apontar na direção das contribuições astronômicas de Hiparco de Nicéia, que incluiu os *epiciclos secundários* (pequenos ciclos complementares associados a um deferente), visando aperfeiçoar a teoria de Apolônio. A principal razão desses epiciclos secundários foi oferecer pequenos ajustes quantitativos entre a teoria de Apolônio, uma vez sofisticada, com as novas observações astronômicas realizadas por Hiparco (NEUGEBAUER, 1983).

## 7.2 AS CONTRIBUIÇÕES ASTRONÔMICAS DE HIPARCO DE NICÉIA

O astrônomo, cartógrafo, construtor de máquinas, matemático e representante da Escola de Alexandria, Hiparco Nicéia (190 - 120 a. C.) foi o primeiro a perceber a pouca acurácia dos dados astronômicos babilônicos. E, em face disso, ele trabalhou para fornecer novas observações astronômicas e organizá-las para uma análise apropriada pelas gerações posteriores. Por exemplo, Hiparco trabalhou nos *textos do ano meta* que combinavam, para um dado ano (o ano objetivo), fenômenos planetários ocorridos em um período anterior, a saber: para Saturno – (59) cinquenta e nove anos; Júpiter – (71) setenta e um anos e (83) oitenta e três anos; Marte – (79) setenta e nove e (47) quarenta e sete anos; Vênus (8) oito anos; Mercúrio – (46) quarenta e seis anos (NEUGEBAUER, 1983).

Destaca-se que a duplicidade de anos em Júpiter e Marte estava associada ao período sinódico que era de (71) setenta e um anos para Júpiter e (79) setenta e nove anos para Marte, bem como ao período sideral correspondente a (83) oitenta e três anos para Júpiter e (47) quarenta e sete anos para Marte. Adjacente a isso, acrescenta-se que são exatamente esses

cinco períodos planetários que Ptolomeu citou como os que foram usados por Hiparco para determinar os movimentos médios desses planetas (NEUGEBAUER, 1983).

O próprio Ptolomeu refinou esses períodos durante intervalos de tempo mais longos, justamente por existir quantidades de anos muito maiores para esses mesmo períodos. Por exemplo, para Saturno eles eram de (265) duzentos e sessenta e cinco anos; Júpiter (527) quinhentos e vinte e sete anos; Marte (284) duzentos e oitenta e quatro anos; Vênus (1151) mil cento e cinquenta e um anos; Mercúrio (480) quatrocentos e oitenta anos (NEUGEBAUER, 1983; LOPES Maria, 2001; SOBEL, 2015). Nesse contexto, Hiparco hesitou considerá-los devido à sua precisão fictícia. Em outras palavras, esses períodos não eram frutos de observações diretas, mas de combinações de períodos menores e ligeiramente imprecisos (LOPES Maria, 2001).

Continuando as contribuições astronômicas de Hiparco, ele mapeou as posições e o brilho comparativo de quase mil astros, fornecendo para os astrônomos posteriores uma base necessária para os estudos futuros (SOBEL, 2015). Nesse mapeamento, Hiparco fez uma das descobertas astronômicas mais notáveis de seu tempo. Ele constatou que a brilhante estrela Spica, na constelação de Virgem, estava a seis graus a oeste da posição do Sol no equinócio de outono. Uma observação importante, justamente porque “seu predecessor Timocharis, na primeira noite de outono do século IV a. C, teria observado a constelação Spica a oito graus a oeste” (SOBEL, 2015, p. 67-77). Nesse contexto, “cada estrela testada por Hiparco havia se movido os mesmo dois graus nesse intervalo de tempo - uma distância de quatro vezes a largura aparente da Lua” (Ibid., p. 77). A notabilidade desse *fato celeste* destaca-se, justamente, pois,

A minúscula diferença entre as duas estrelas passou despercebida noite após noite, mas causou um efeito cumulativo ao longo de décadas, chegando a cerca de um grau por século. Levaria muitas eras - muitos milênios, de fato - para que o círculo se tornasse um círculo completo. A extrema lentidão e velocidade variável de deslocamento, que veio a ser chamada de precessão dos equinócios, garantiu emprego para os astrônomos em futuros distantes. (SOBEL, 2015, p. 77)

Afirma-se que mediante o importante trabalho de Hiparco, torna-se de boa sorte ver no *Almagesto* como Ptolomeu utilizou esse material com habilidade suprema (NEUGEBAUER, 1983). Por exemplo, ele adicionou uma enorme quantidade de dados empíricos ao trabalho de Hiparco, os quais se associam também à incrível quantidade de cálculos numéricos contemplados no *Almagesto*.

Grande parte dos (13) treze livros que compõem seu célebre tratado astronômico consiste de tabelas trigonométricas, diagramas, fórmulas, demonstrações extensas, cálculos e longas listas de observações. Em razão disso, afirma-se que “não é por causa de preconceitos filosóficos que o sistema (sic)<sup>11</sup> ptolomaico dominou a astronomia por cerca de 1500 anos, mas por causa da solidez de seus fundamentos empíricos” (Ibid., p. 316). Nessa direção, Ptolomeu deu o último passo intelectual para o apogeu do desenvolvimento da *tradição de pesquisa grega antiga*, via astronomia matemática instrumentalista. De acordo com esse astrônomo,

[...] só a matemática pode fornecer conhecimento seguro e imperturbável a quem se dedica a ela, desde que o faça rigorosamente, já que esse tipo de teste procede por métodos inquestionáveis, à aritmética e a geometria. É por isso que fomos atraídos pela investigação dessa parte da filosofia teórica, isto é, da matemática, mas especialmente da teoria que lida com as coisas divinas e celestiais. (PTOLOMEU, 1987, p. 36, tradução própria)

No bojo da astronomia matemática evidencia-se que os astrônomos tinham como principal preocupação fornecer as explicações para os *problemas empíricos não resolvidos*, de uma forma matematicamente quantitativa. Isso é, sem pretender, ao mesmo tempo, encontrar, por exemplo, uma explicação da causa física dos movimentos dos planetas. Por essa razão, é importante distinguir as correntes de pensamentos (instrumentalista *versus* realista), que alicerçaram as investigações no campo da astronomia física e da própria astronomia matemática, no contexto da tradição de pesquisa grega antiga.

Em face disso, muitos debates calorosos, não somente sobre o *instrumentalismo* e o *realismo*, presente nesse contexto histórico, mas também sobre a existência do *empirismo*, do *positivismo*, do *relativismo*, que foram travados por filósofos e historiadores da ciência, ao longo dos séculos seguintes. Contudo, para além desses debates, é importante perceber-se precipuamente o caráter *não linear e não acumulativo do crescimento científico*, tendo em vista essa pluralidade de perspectivas epistemológicas, que criam tensões pela hegemonia da produção desse conhecimento.

---

<sup>11</sup> Destaca-se que não é correto atribuir o termo “sistema” ao trabalho de Ptolomeu, justamente devido às suas teorias planetárias, elaboradas individualmente para cada corpo celeste, não terem sido reunidas em um único esquema astronômico, como assim o fez Copérnico, posteriormente (GINGERICH, 2008).

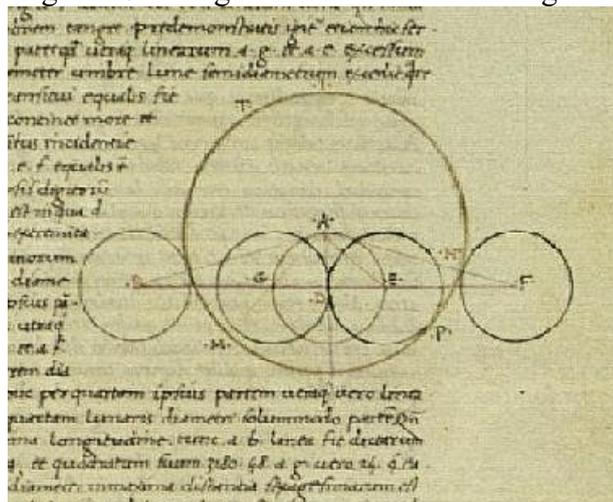
Nessa direção, na próxima seção serão apresentados alguns aspectos importantes sobre a obra *Almagesto* de Ptolomeu, a fim de esclarecer alguns equívocos encontrados em livros didáticos de física, especialmente, ensino médio.

### 7.3 ALGUNS ASPECTOS SOBRE O ALMAGESTO DE PTOLOMEU

As teorias planetárias de Ptolomeu estão contempladas no seu tratado astronômico *Syntax Matemática*. Também chamado de *Hè Mathèmatike Syntaxis – A compilação matemática* – e denominado pelos gregos de *Hè Magiste Syntaxis – A maior compilação*. Ao ser traduzido pelos árabes para *Al Majisti*, com o recurso gramatical da contração, esse tratado ficou finalmente conhecido como *Almagesto* (SEDEÑO, 1987).

No *Almagesto* estão sintetizados os dados observacionais dos antigos babilônios, organizados e aperfeiçoados posteriormente por Hiparco de Nicéia, bem como o seu escopo comporta novos dados produzidos pelo próprio Ptolomeu (NEUGEBAUER, 1983; KUHN, 1990; ÉVORA, 1993). Em termos astronômicos, essa obra é considerada de grande complexidade, justamente porque grande parte dos treze livros que a compõem, consiste de tabelas trigonométricas, diagramas, fórmulas, demonstrações extensas, cálculos ilustrativos e longas listas de observações. Para efeito ilustrativo, a (Figura 27) apresenta um fragmento de texto, cuja tradução, em latim, data do século XV, ano de 1451.

Figura 27 – Fragmento de texto do *Almagesto*.



Fonte: Domínio Público<sup>12</sup>.

<sup>12</sup> Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Almagesto#/media/Ficheiro:Almagest\\_1.jpeg](https://pt.wikipedia.org/wiki/Almagesto#/media/Ficheiro:Almagest_1.jpeg)>. Acesso: 6 jul., 2020.

Observa-se que, esse mesmo aspecto de complexidade do *Almagesto* é encontrado também no livro *De Revolutionibus Orbium Coelestium (As Revoluções dos Orbes Celestes)*, de Nicolau Copérnico, treze séculos depois da morte de Ptolomeu. Em seu livro *O Homem e o Universo*, Koestler (1989) afirma que, sobre o livro de Copérnico, nem mesmo o próprio Galileu, defensor mais proeminente das implicações filosóficas e físicas da astronomia copernicana, parece ter lido tal livro. Para ratificar essa afirmação, o especialista copernicano Owen Gingerich (2008) publicou seu livro com o título, *O Livro que Ninguém Nunca Leu: Em busca das Revoluções de Nicolau Copérnico*.

Voltando ao *Almagesto*, como grande tratado matemático, essa obra consagra o desenvolvimento de toda a astronomia matemática grega iniciada por Platão. Além disso, seu conteúdo expõe todas as *teorias planetárias* de Ptolomeu, que explicam cinematicamente os *problemas empíricos não resolvidos*: o movimento aparente do Sol e da Lua; o brilho aparente dos planetas internos e externos; as diferentes estações do ano; o movimento de retrogradação dos planetas (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno).

Em comparação com as teorias planetárias de Eudoxo e Apolônio e com os demais modelos cosmológicos, cujas explicações eram, em grande parte, de cunho puramente qualitativo e especulativo, “o *Almagesto* foi o primeiro trabalho matemático sistemático que deu uma explicação completa, detalhada e quantitativa a todos os movimentos celestes” (KUHN, 1990, p. 72).

Nesse sentido, devido aos valores epistêmicos de *consistência* e *coerência* interna das *teorias planetárias ptolomaicas*, os astrônomos posteriores, até depois da morte de Copérnico em 1543, preocuparam-se muito mais em aumentar suas capacidades preditivas, aumentando o número de epiciclos, do que com a realidade física dos artificios geométricos das teorias (epiciclo, deferente, excêntrico e equante). Em conformidade, destaca-se que o próprio Copérnico, cujo trabalho representa mais uma fonte de debate acerca das correntes *instrumentalista* e *realista*, aumentou o número de epiciclos para 48, em seu *sistema astronômico*<sup>13</sup>, enquanto que nas teorias ptolomaicas esse número era de 40 epiciclos.

Essa informação mostra claramente que é uma falácia o que circula em alguns livros didáticos de física da educação básica, acerca da aceitação da astronomia copernicana em detrimento da astronomia ptolomaica (MEDEIROS Alexandre; MONTEIRO, 2002). Nesses

---

<sup>13</sup> A utilização do termo *sistema astronômico* atribuído ao trabalho de Copérnico se dá justamente porque Copérnico reuniu todas as suas explicações em um único sistema, enquanto Ptolomeu apresentou suas explicações separadamente.

livros, transmite-se erroneamente que essa aceitação se deu devido à astronomia de Copérnico ser mais simples do que a de Ptolomeu. Mas, pelo contrário, sobre essa simplicidade é possível afirmar que: (i) ela representa a sistematização das explicações copernicanas dos problemas empíricos astronômicos em um único esquema, em detrimento das explicações individuais das teorias ptolomaicas; (ii) ela tem um caráter estético e econômico da linguagem científica para expressar ideias, esquemas e/ou sistemas conceituais, equações matemáticas, princípios e leis; (iii) como um valor epistêmico estético e simbólico, tem origem na doutrina filosófica pitagórica; (iv) foi resgatada pelo movimento neoplatônico revivido pelos professores de Copérnico, os quais o iniciaram nesse movimento que também alcançou, por exemplo, Giordano Bruno, Galileu, Kepler, dentre outros renascentistas; e (v) ela é utilizada até hoje em dia pela comunidade científica, como um valor epistêmico simbólico do alcance das ideias científica. Em outras palavras, quanto mais simples uma ideia científica, mais facilmente será compreendida e operacionalizada.

Retomando ao *Almagesto*, Ptolomeu estabeleceu que sua principal meta nos estudos dos fenômenos celestes residia em:

[...] encontrar aquilo que é evidente e aquilo que é aparente, a partir das observações feitas pelos antigos e por nós próprios, para aplicar as consequências 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 esfericamente; 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 local. (ÉVORA, 1993, p. 63)

Do exposto, embora Ptolomeu tenha afirmado que pretendia encontrar o que era evidente e aparente, a partir da observação dos céus, ele não estava preocupado com a realidade física de seus artifícios geométricos, isto é, seus *referentes no plano celeste*.

Para apoiar suas explicações astronômicas, em um quadro cosmológico mais amplo, as considerações de Ptolomeu foram duas: primeiro, que o formato e o movimento do céu são esféricos; segundo, que a Terra é esférica, porém encontra-se imóvel em relação às estrelas fixas, e ocupa o centro geométrico do universo – pressuposto fundamental de suas teorias planetárias (KUHN, 1990).

Essas considerações demonstram claramente adesão de Ptolomeu à visão de mundo e à malha conceitual aristotélica, em detrimento das ideias cosmológicas rivais, representadas pelos trabalhos de Heráclides e de Aristarco. Contudo, é válido observa-se que no *Almagesto*

não existem evidências claras que Ptolomeu acreditava na realidade física das esferas celestes aristotélicas. Isso porque, mesmo para o grupo de astrônomos helênicos – pertencentes à Grécia Antiga –, as esferas celestes possuíam apenas uma realidade física metafórica (KUHN, 1990).

No entanto, em termos dos fenômenos celestes, isso consistia em um problema secundário, sem muita importância do ponto de vista das previsões e cálculos matemáticos. Em contrapartida, afirma-se que essas suposições de Ptolomeu não foram arbitrárias, justamente, por que:

[...] sem tentar prová-las absolutamente, ele tentou torná-las mais plausíveis possíveis. De fato, na sua escolha de suposições e hipóteses, Ptolomeu foi guiado, parece, não por critérios arbitrários, mas antes por considerações físicas e metafísicas, que ele as via como empiricamente testado. (CROMBIE, 1953, p. 96, tradução própria)

Em face dessa tentativa,

Deve-se admitir que em suas teorias planetárias, 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 como um cientista (sic)<sup>14</sup> instrumentalista. (CROMBIE, 1953, p. 97, tradução própria)

Em contrapartida, o próprio Ptolomeu foi bem explícito sobre seu objetivo em tentar “salvar os fenômenos”, quando afirmou o seguinte, “Cremos que o objetivo que o astrônomo deve tentar atingir é este: demonstrar que todos os fenômenos do firmamento são produzidos por movimentos circulares” (KOESTLER, 1989, p. 43). Além disso, ele afirmou também que:

Tendo-nos proposto a tarefa de provar que as irregularidades aparentes dos cinco planetas, do Sol e da Lua podem ser representadas por meio de movimentos circulares uniformes, por somente tais movimentos serem adequados à divina natureza deles [...] podemos considerar a realização dessa tarefa como fim último da ciência matemática baseada na filosofia. (KOESTLER, 1989, p. 43)

Ptolomeu procurou esclarecer que os astrônomos deviam renunciar a todas as tentativas de explicar a realidade física das esferas, posto que os corpos celestes, sendo de natureza divina, obedeciam a leis diferentes das encontradas na Terra. Sem elos em comum

---

<sup>14</sup> A denominação de cientista dada a Ptolomeu não é correta, uma vez que essa palavra só foi cunhada no final do século XIX, isto é, 1840.

entre o Céu e a Terra, não era possível saber a física do firmamento. Diante dessas discordâncias entre a realidade física e as conjecturas puramente matemáticas, com certeza, Ptolomeu aderiu às ideias aristotélicas: universo esférico, finito e dividido por dois mundos distintos (supralunar – perfeito e imutável; e sublunar – imperfeito e corruptível), o geostatismo e geocentrismo.

Em termos matemáticos e devido à utilização do artifício geométrico *equante*, ele também assumiu, em parte, a premissa platônica acerca de que todos os movimentos celestes poderiam ser explicados em termos de movimento circular uniforme. Por conseguinte, esses indícios epistemológicos distintos fomentam a importância das principais características das duas correntes de pensamento representadas pelas perspectivas *instrumentalista* e *realista*, a seguir.

#### 7.4 AS CORRENTES DE PENSAMENTO INSTRUMENTALISTA E REALISTA

A compreensão de algumas características principais das *correntes de pensamentos instrumentalista versus realista* perpassa por enfatizar a divisão do conhecimento no tempo de Ptolomeu. Nesse período existiam duas vertentes principais e mais uma secundária, criadas pela tradição aristotélica, respectivamente, a *filosofia teórica*, a *filosofia prática* e a *filosofia técnica* – um conhecimento ligado à área da arquitetura e da medicina.

Segundo Sedeño (1987), Aristóteles considerava que a *filosofia prática* não produzia objetos externos a ela, pois tinha o fim em si mesmo. Em conformidade, Ptolomeu assinalava para a necessidade fundamental de distinguir o conhecimento prático do conhecimento teórico, pois, para ele, era possível ter o primeiro sem a necessidade de uma formação teórica, mas o contrário não. A partir desse argumento, é possível compreender o interesse de Ptolomeu em desenvolver o conhecimento da *filosofia teórica*, campo que exerceu suas atividades mais importantes, como a óptica, a astronomia e a astrologia (SEDEÑO, 1987).

Por outra perspectiva, o conhecimento teórico era dividido em três outras subcategorias: a *teologia*, a *matemática* e a *física*. A *teologia*, de alto grau de abstração, não estava ligada com a realidade perceptível, mas com coisas imateriais, ser, existência, causa. Os sentidos não eram capazes de analisar o mundo real em movimento, formas e assuntos puros que os compõem (SEDEÑO, 1987). Em última instância, era possível que a razão pudesse separá-los, mostrando uma causa primeira ou primeiro movimento que produz toda a mudança natural. Todavia, por causa da natureza do objeto não ser fenomenológico nem

atingível, a *teologia* era vista por Ptolomeu como uma conjectura e não como um conhecimento do tipo físico e matemático.

Diferente do conhecimento teológico, a *física* era compreendida como uma *filosofia teórica* ou *filosofia natural*, como foi chamada até a época de Isaac Newton, e possuía menor grau de abstração. Seu objeto era o mundo material, a natureza sempre em mudança. Ou seja, estudava as qualidades dos objetos terrestres, como “frio”, “quente”, “doce”, objetos que estavam no mundo sublunar, imperfeito e mutável. Na concepção aristotélica, a *física* lidava com a natureza em movimento ou em mudança constante, com objetos materiais sujeitos à corrupção e à geração (SEDEÑO, 1987).

Já a *matemática* estava entre a teologia e a física, porém subdividida em aritmética, geometria e astronomia. Portanto, é neste contexto disciplinar que se encontra uma possível explicação ptolomaica para a distinção entre a astronomia matemática grega e a astronomia física – atualmente, denominada de *astrofísica* – que se consolidou, no contexto europeu renascentista, a partir dos trabalhos de Kepler. Além disso, é importante dizer também que a astronomia de posição, responsável por descrever as disposições das coordenadas celestes, continua sob o domínio da matemática e da geometria.

Ptolomeu afirmava que a matemática “determinava a natureza envolvida nas formas e em seus movimentos de um lugar para outro, servindo para investigar a forma, o número, o tamanho e o lugar, o tempo e coisas semelhantes” (PTOLOMEU, 1987, p. 18). Valendo-se dessas características e levando em conta suas considerações sobre o universo e a Terra, Ptolomeu reduzia os corpos celestes a meros pontos da esfera celeste – uma técnica computacional utilizada até os dias de hoje.

Nesse contexto, as explicações dos problemas empíricos traduziam-se em determinar as trajetórias dos corpos, seguindo esses pontos na esfera celeste. Desta forma, desde os babilônios, a ideia principal era poder sempre estabelecer padrões temporais de variadas utilidades: construir calendários lunares e solares, prever eclipses e estações do ano rigorosas, dentre outros fins.

Por outro lado, como a astronomia também estava fundamentada na geometria, os modelos cosmológicos gregos tinham como meta traduzir teoricamente como o mundo realmente deveria ser considerado. Para um astrônomo pertencente a *corrente de pensamento realista*, essa interpretação estaria no domínio da *filosofia natural* – isto é, da *física*.

Para os adeptos das duas *correntes de pensamento*, existiam duas formas de fazer astronomia. De um lado, estava a *astronomia matemática*, tradicionalmente platônica e

computacional, que se interessava em resolver os problemas empíricos mediante construções teóricas que permitissem fazer previsões corretas. Do outro, a *astronomia física*, cujo foco de interesse era desenvolver cosmologias que descrevessem o mundo tal como ele é de verdade.

Por serem supostamente irreconciliáveis, essas duas perspectivas filosóficas passaram a implicar no estado cognitivo das teorias planetárias. Estado esse, que permite a construção de mais um *vínculo epistemológico* com outro aspecto, característica, princípio da natureza da ciência.

Ao contrário de uma *visão empírico-indutivista ingênua* da produção de conhecimento científico, frente à existência dessas duas correntes filosóficas, “leis e teorias científicas são elaborações/criações do intelecto humano. Não são meras sínteses indutivas do observado, do experimentado. Os dados, per se, não geram teorias” (PEDUZZI; RAICIK, 2020, p. 25).

Com isso, essa questão é reduzida à discussão que gira em torno de pensar se uma teoria pode ser ou não um aparato conceitual, com o qual se organiza as experiências científicas e determinam-se as previsões fenomenológicas. Ou ainda, se uma teoria pode ser considerada um instrumento, que não pode ser julgado como verdadeiro ou falso melhor ou pior, apropriado ou não para o propósito para o qual foi concebido (SEDEÑO, 1987; LAUDAN, 2011).

Para os *instrumentalistas*, conseqüentemente, não é preciso se comprometer com a existência dos referentes no mundo celeste dos artifícios postuladas por suas teorias. Por exemplo, para os epiciclos, deferente, equante ou excêntricos, pois as teorias planetárias podem usar todo tipo de artifício sem que tenha realidade física. Já para os *realistas*, as entidades postuladas pelas teorias não são meras ferramentas de cálculo, que permitem previsões mais ou menos precisas, mas elas tentam explicar como é mundo, de fato, mediante esses mesmos referentes.

No bojo desse debate epistemológico, o historiador e filósofo da ciência Norwood H. Hanson (1924 -1967) afirmou o seguinte sobre o trabalho de Ptolomeu:

Devemos distinguir o aristotélico ptolomaico astrônomo geocêntrico de Ptolomeu cosmólogo. Nós nos encontramos aqui com dois pensadores diferentes unidos na mesma pessoa histórica. O cosmologista Ptolomeu repetiu ao pé da letra as visões do mundo da antiguidade ao discutir sua filosofia do universo. No entanto, o astrônomo Ptolomeu nega que a explicação completa dos problemas planetários esteja dentro das possibilidades humanas. Assim, a explicação astronômica é virtualmente inconcebível para Cláudio Ptolomeu. Limita-se a fornecer meras previsões. (HANSON, 1973, p. 16 *apud* SEDEÑO, 1987, p. 21-22, tradução própria)

Diante dessa exposição, a tradutora da obra de Ptolomeu, *Las Hipótesis de los Planetas*, e filósofa da ciência contemporânea, Eulália Sedeño (1987) considera que Hanson, provavelmente, não conhecia essa obra, para tecer tal afirmação.

Para essa filósofa, Hanson viu Ptolomeu como o expoente máximo do instrumentalismo, assim como também o responsável por fornecer um modelo matematicamente preciso. Isto é, um modelo capaz de fazer as previsões dos fenômenos celestes e resolver todos os problemas empíricos astronômicos, sem se importar com as causas físicas dos movimentos, nem com a veracidade no mundo celeste, de tal modelo.

Segundo Sedeño (1987), a partir da obra “Las Hipótesis...”, pode-se atribuir a Ptolomeu o crédito pela consistência e coerência de suas teorias planetárias, bem como mostrar que nesse debate epistemológico envolvendo as duas correntes de pensamento, Ptolomeu contemplou as duas perspectivas, em seus trabalhos astronômicos.

Ressalta-se que, para esse caso, a coexistência de perspectivas epistemológicas rivais, como uma regra e não exceção, dentro de uma mesma tradição de pesquisa, realmente pode demonstrar o caráter não linear e acumulativo do pensamento e do crescimento científico. Esse caráter se tornará ainda mais evidente na segunda parte desta história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, especialmente, a partir dos antecedentes da astronomia copernicana até a gravitação universal newtoniana.

## 7.5 PTOLOMEU E A SOLUÇÃO DOS PROBLEMAS EMPÍRICOS DA TPGA

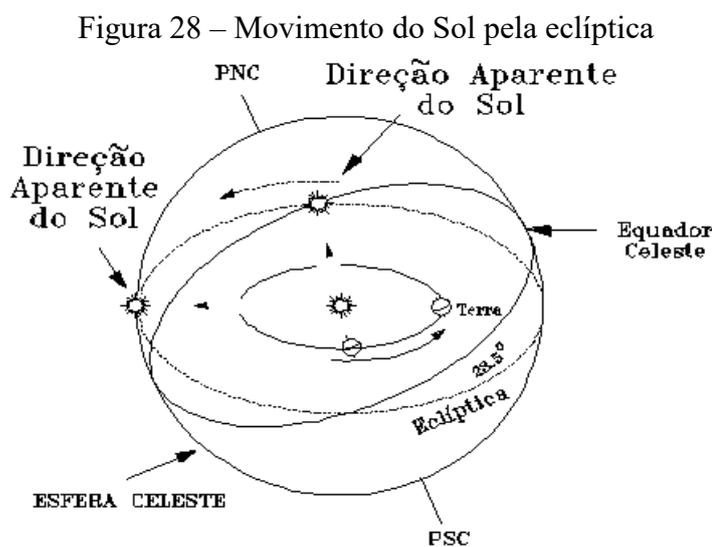
A porta de acesso para a solução dos problemas empíricos da tradição de pesquisa grega antiga, realizada pelo conjunto das teorias planetárias de Ptolomeu, perpassa pela caracterização dos fenômenos celestes observados no contexto dessa tradição.

No conjunto dos movimentos dos corpos celestes associados aos problemas empíricos, encontra-se o *movimento aparente das estrelas fixas*, que vale ser descrito antes dos demais. Nesse movimento, as posições relativas das estrelas fixas apresentam-se como invariáveis, do mesmo modo que o movimento das constelações que essas posições compõem.

Quando vistas da Terra, aparentemente, as estrelas fixas são arrastadas como um todo pelo movimento geral do céu. Nesse percurso, a *velocidade de arrasto* é em torno de 15° graus por hora, completando uma “volta de 360° graus, no final de 24 horas, no sentido anti-

horário, “atrasando-se” pouco menos de  $1^\circ$  grau por dia, no sentido horário, em torno do eixo celeste Norte-Sul” (ÉVORA, 1993, p. 149).

Por conseguinte, o *movimento aparente do Sol* se traduz na composição de dois movimentos: o movimento diurno, isto é, o movimento de rotação para oeste, no sentido anti-horário, seguindo o movimento da esfera das estrelas; e um movimento lento, oposto para leste, simultâneo ao anterior, mas no sentido horário, ao longo de uma curva denominada eclíptica, que corresponde ao movimento anual do Sol (Figura 28).



A Figura 28 ilustra a plotagem diária, em um mapa celeste, das posições do Sol no momento dele se pôr, durante o período de um ano. Com os pontos dessa plotagem traça-se uma curva regular *eclíptica*, cuja forma é a de um círculo, em certa medida, deformado e consideravelmente descentralizado, em relação ao polo celeste.

Na eclíptica, o Sol em movimento aparente ocupa sempre algum ponto, justamente por seu movimento anual ser sempre sobre essa curva. Além disso, a própria eclíptica é arrastada através do céu pelo movimento diário normal do sistema estelar. Portanto, o Sol se comporta como uma estrela que se encontra sobre determinado ponto da eclíptica, deslocando-se com o conjunto do céu. Ademais, o Sol também se desloca lentamente ao redor dela, ocupando posições diferentes a cada época do ano.

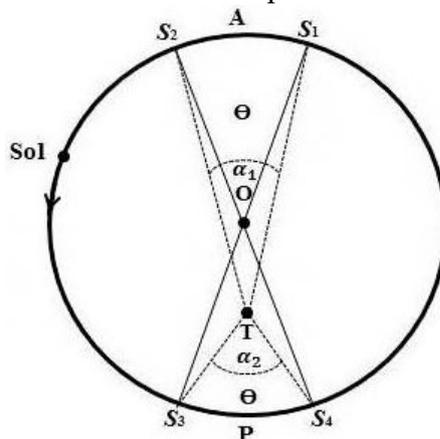
Em função das explicações desses movimentos, especialmente, as variações de velocidade do Sol em relação a Terra, que também está associado ao problema empírico das

<sup>15</sup> Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://200.144.244.96/cda/aprendendo-basico/esfera-celeste/esfera-celeste.htm>>. Acesso em: 22 out., 2020.

diferentes estações do ano, Ptolomeu desenvolveu o artifício geométrico matemático denominado *excêntrico*.

Conforme esse artifício, o Sol orbita com velocidade angular constante em torno de um ponto que não coincide com o centro da Terra (Figura 29), a seguir. Por essa razão, a sua velocidade angular é variável para um observador terrestre (PEDUZZI, 2108a).

Figura 29 – Modelo Excêntrico para o movimento do Sol.



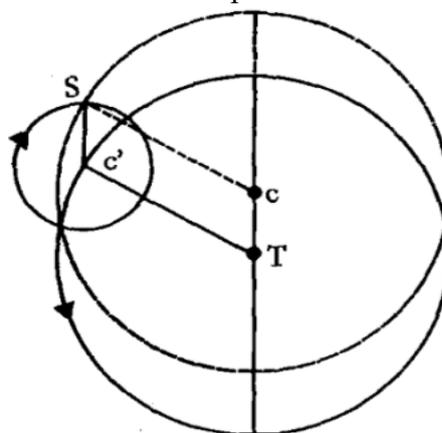
Fonte: Peduzzi (2018a, p. 32).

Na Figura 29, observa-se que, com um movimento uniforme em torno de **O**, o ângulo  $\Theta$  (teta) é descrito pelo Sol em seu deslocamento de **S**<sub>1</sub> a **S**<sub>2</sub>, e de **S**<sub>3</sub> a **S**<sub>4</sub>, durante um intervalo ( $\Delta t$ ), para um observador em **O**; e esse mesmo ângulo é, respectivamente, igual a  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , para um observador na Terra. Como ( $\alpha_1 < \Theta$ ) e ( $\alpha_2 > \Theta$ ), isso implica que ( $\omega_1 = \alpha_1/t < \omega = \Theta/t < \omega_2 = \alpha_2/t$ ). Assim, o Sol se movimenta mais rápido no perigeu **P** (ponto mais próximo da Terra), do que no apogeu **A** – ponto mais afastado da Terra (PEDUZZI, 2018a).

A *teoria planetária epiciclo-deferente* de Apolônio, discutida anteriormente, em sua forma mais simples, também explica esse movimento do Sol. Por essa razão, pode-se afirmar que o artifício *excêntrico* desenvolvido por Ptolomeu tornou-se o equivalente dessa teoria, pois conduz rigorosamente aos mesmos resultados.

Por exemplo, o epiciclo-deferente (raio **TC'**) e o excêntrico (raio **CS**) são equivalentes para a descrição do movimento orbital do Sol (**S**). E, além de serem idênticos os raios do deferente (**TC'**) e do excêntrico (**CS**), também são iguais os segmentos (**C'S** e **TC'**), bem como os períodos de revolução de (**S**) em torno de (**C'**) e de (**C'**) ao redor de (**T**). Movimentos estes que se processam, respectivamente, no sentido horário e anti-horário, como ilustrado na (Figura 30).

Figura 30 – Equivalência dos modelos epiciclo-deferente e o modelo excêntrico.



Fonte: Sedeño (1987, p. 28).

No que diz respeito ao *movimento aparente dos planetas* internos e externos, assim como o movimento do Sol, todos possuem um movimento diurno para oeste, arrastando-se pelo movimento do céu, mas, simultaneamente, deslocando-se lentamente para leste, até retornarem aproximadamente às suas posições de origem. Além desse movimento normal, os planetas Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno, durante alguns breves intervalos de tempo, substituem o movimento para leste por um movimento de retrogradação para oeste. Esse retrocesso ocorre da seguinte forma:

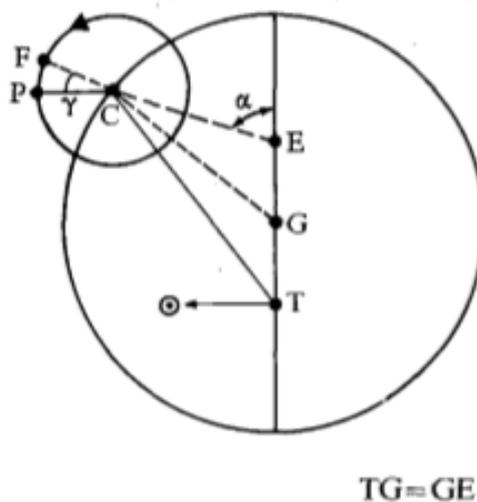
[...] cada um dos cinco planetas se desloca em seu movimento normal para leste, porém todos e cada um deles momentaneamente começam a perder velocidade de forma gradual, até chegar a um momento em que a direção de seu movimento se inverte, retrocedendo a partir daí para oeste, e em seguida retomando seu movimento normal para leste. Os retrocessos têm uma forma e duração muito similares, porém nem sempre se produzem na mesma data nem dentro do mesmo setor do Céu. (ÉVORA, 1993, p. 152)

Para explicar esse movimento de retrogradação, a teoria planetária de Ptolomeu serviu-se de dados observacionais, mais precisos, dos períodos sinódicos de cada planeta. Levando em consideração que para um observador na Terra, esses movimentos mostram-se de extrema complexidade – retrocessos ao longo da eclíptica e seus pontos estacionários –, Ptolomeu partiu da disposição habitual das esferas celestes, considerando que o Sol marca o limite entre os planetas superiores – Saturno, Júpiter e Marte, em ordem descendente, em relação a Terra – e os planetas inferiores Vênus e Mercúrio. Todavia, ele afirmou que essa disposição pode ser considerada como arbitrária, pois:

[...] tal critério parece ter um elemento de incerteza, já que é possível que alguns planetas estejam de fato abaixo do Sol e nosso observador, mas em outro, e, portanto, não poderia ser visto passar na frente dele, como acontece no caso da Lua, quando passa sob o Sol em conjunção, sem escurecê-lo na maioria dos casos. (SEDEÑO, 1987, p. 29, tradução própria).

Ao lançar mão ao modelo de epiciclo simples, Ptolomeu percebeu que sua utilização para explicar esses fenômenos produzia arcos de retrogradação de igual longitude e intervalos regulares. Porém, como essa descrição não era consistente com suas observações, ele se viu obrigado a modificá-lo. Para tanto, Ptolomeu determinou os períodos sinódicos dos planetas, estabelecendo que um número inteiro de anos solares fosse igual a certo número de voltas ou retornos à mesma longitude mais outro número de voltas anômalas. Com isso, para os planetas externos (Júpiter, Marte e Saturno), Ptolomeu utilizou-se do modelo epiciclo, introduzindo nele a inovação do artifício matemático geométrico *equante* (Figura 31).

Figura 31 – Modelo equante para o movimento dos planetas externos.



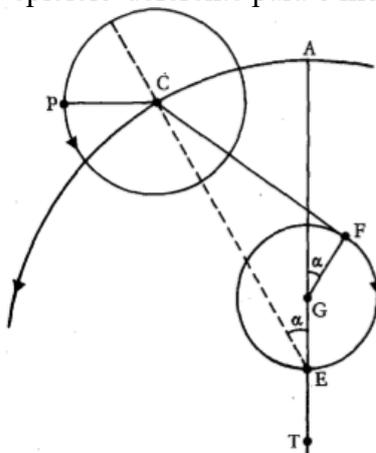
Fonte: Sedeño (1987, p. 31).

Na Figura 31, o movimento médio de um planeta externo é expresso por C, que é o centro do epiciclo. Assim, o planeta (P) se move em torno desse epiciclo, no mesmo sentido que o círculo de centro (G), que está equidistante da Terra (T) e do ponto (E), que é o equante, ponto cujo centro se move. A linha imaginária (CP), que une o centro do epiciclo com o planeta, é paralela a linha que une (T) ao Sol, representado pelo círculo no lado esquerdo de (T). Seguindo esse modelo do epiciclo, o movimento anômalo dos planetas externos é medido a partir do ângulo gama ( $\gamma$ ), desde o ponto (F). Assim, como no caso desses planetas, Ptolomeu conseguiu estabelecer que um número inteiro de períodos solares equivalesse a

certo número de voltas anômalias e determinados retornos à mesma longitude. A linha (PC) é sempre paralela à linha traçada desde o ponto (T) ao centro do Sol.

Já para o caso de um planeta interno, Vênus, o ângulo ( $\gamma$ ) – Figura 31 acima – varia de forma independente da posição do Sol, aumentando na mudança o ângulo alfa ( $\alpha$ ), segundo a longitude desse mesmo ângulo. Em outras palavras, o epiciclo é dado pela observação das máximas elongações. Por exemplo, para Mercúrio (Figura 32), a explicação é mais complexa, pois precisa dar conta da variação do *excêntrico*.

Figura 32 – Modelo epiciclo-deferente para o movimento de Mercúrio.

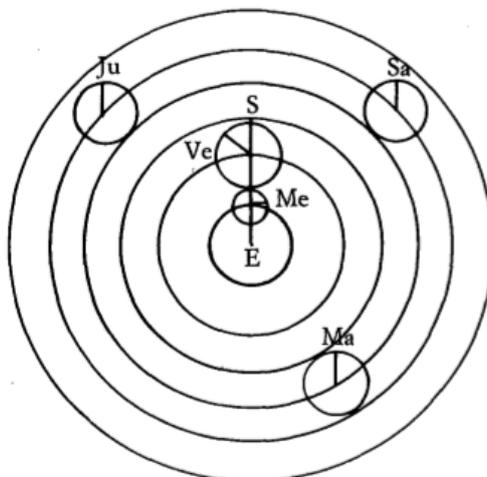


Fonte: Sedeño (1987, p. 32).

Na Figura 32, o planeta Mercúrio se move em torno de um epiciclo, cujo centro (C) também se move em círculo do *deferente* de centro (F) que não é fixo. Por sua vez, o planeta move-se em torno do centro (G) em sentido oposto, em torno do epiciclo, mas na mesma velocidade do epiciclo.

Nesse sentido, o raio desse círculo de centro (G) é igual à distância entre a Terra (T) e o equante (E). Assim, o segmento (TE) é igual ao (GE), e o ângulo alfa ( $\alpha$ ) formado pelos segmentos (AGF) é igual ao ângulo alfa ( $\alpha$ ) formado por (AEC). Em face dessas explicações, observa-se que, em todos os planetas internos e externos, um dos movimentos que determinava suas posições na eclíptica estava relacionado com o Sol (Figura 33), a seguir.

Figura 33 – Esquema para o movimento do Sol e os planetas internos e externos<sup>16</sup>.



Fonte: Sedeño (1987, p. 32). Extraída de Lloyd (1973).

No caso dos planetas externos (Figura 33), a linha que vai do centro do epiciclo ao planeta, é paralela à linha que une o Sol a Terra, enquanto que, nos planetas internos, o centro do epiciclo está precisamente nessa linha. Portanto, a grande façanha dos modelos, na teoria planetária de Ptolomeu, apresentados individualmente (Figuras 29, 30, 31, 32), foi permitir que os astrônomos pudessem calcular a excentricidade dos planetas, o tamanho do epiciclo e as magnitudes e durações dos movimentos retrógrados de cada planeta (SEDEÑO, 1987).

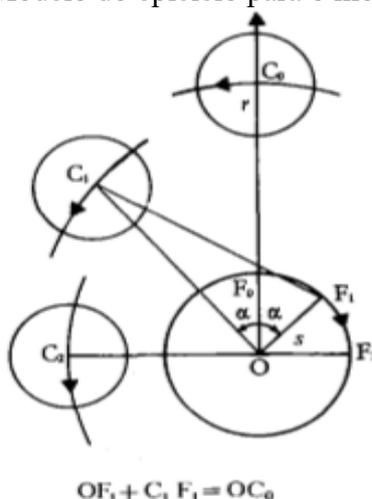
Com essas teorias, eles também construíram tabelas, mediante as quais determinavam as longitudes e latitudes de cada um dos planetas, em um dado momento. Não obstante a essa relação entre o Sol e os planetas internos e externos, para o movimento da Lua, bastante complexo também, Ptolomeu compilou os períodos lunares e construiu um modelo para poder explicá-lo.

Na perspectiva do modelo epiciclo simples era fácil explicar o movimento da Lua, quando em conjunção, Sol, Lua e Terra alinhados. Contudo, nas quadraturas (fases da Lua), quando o ângulo formado pelos três corpos é de (90° graus) ou (270° graus), a Lua não se comporta de acordo com o predito pelo modelo simples do epiciclo. Em outras palavras, nessas posições angulares, o diâmetro do epiciclo cresce e a posição observada da Lua parece estar, às vezes, maior, às vezes menor do que o calculado.

Para resolver esse problema, Ptolomeu idealizou o mecanismo engenhoso que cerca o epiciclo quando este se aproxima da quadratura (Figura 34), a seguir.

<sup>16</sup> É importante destacar que, apesar da apresentação desse esquema simplificado, isso não significa que Ptolomeu apresentou suas soluções aos problemas empíricos a partir dele.

Figura 34 – Modelo do epiciclo para o movimento da Lua.



Fonte: Sedeño (1987, p. 33). Extraída de Lloyd (1973).

Com esse mecanismo da Figura 34, é o centro do epiciclo lunar ( $C_0$ ), de raio ( $r$ ), que se move em torno da Terra, isto é, o centro do círculo ( $O$ ), no qual se move o epiciclo, no deferente de raio ( $OC_0$ ). Com esse esquema, quando o raio ( $OC_0$ ) e o Sol estão alinhados, ocorre a conjunção. Ademais, se for considerado o epiciclo de centro ( $C_1$ ), este já não se move em torno de ( $O$ ), mas de ( $F_1$ ), que se move em torno de ( $O$ ), segundo um círculo de raio ( $s$ ). Assim, o centro do epiciclo muda de ( $C_0$ ) para ( $C_1$ ), formando um ângulo alfa ( $\alpha$ ) igual ao formado pelo ponto ( $F_0$ ) ao mudar para ( $F_1$ ), ( $OF_1 + C_1F_1 = OC_0$ ). Por sua vez, o centro do epiciclo se aproxima de ( $O$ ) quando ( $\alpha$ ) aumenta e alcança sua maior proximidade na quadratura, isto é, quando ( $\alpha = 90^\circ$  graus), caso em que o centro do epiciclo é ( $C_2$ ). Quando a Lua se encontra em oposição ( $\alpha = 180^\circ$  graus), momento no qual ( $OF_1 + C_1F_1 = OC_0$ ), ela volta à sua posição inicial ( $OC_0$ ). Facilmente, percebe-se que para ( $\alpha = 270^\circ$  graus), ocorre o mesmo fenômeno, quando o ângulo em questão é igual a  $90^\circ$  graus (SEDEÑO, 1987).

Mesmo em face da engenhosidade de Ptolomeu e da consistência de suas explicações, tanto sua teoria lunar quanto as demais teorias foram criticadas, posteriormente, por Copérnico cuja perspectiva de investigação já se coaduna, um pouco, com a corrente e pensamento realista. Acerca da crítica de Copérnico, ele considerou que ao introduzir o artifício geométrico *equante*, para explicar o movimento dos planetas, do Sol e da Lua, Ptolomeu afastou-se da premissa platônica do movimento circular. Para Copérnico, Ptolomeu fez “os planetas moverem-se com velocidades não uniformes, em relação aos seus centros, de maneira excêntrica. Embora, ao ter feito o equante girar com velocidade angular uniforme, tentou de alguma forma preservar o princípio de Platão” (ÉVORA, 1993, p. 67).

A objeção de Copérnico à violação do princípio platônico pode ser evidenciada em um pequeno trecho de resumo escrito por ele próprio, por volta de 1510. Nesse trecho Copérnico afirma o seguinte:

[...] as teorias planetárias de Ptolomeu e de muitos outros astrônomos, embora consistentes com os dados numéricos, apresentavam, igualmente, dificuldades que não 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. Consequentemente, um sistema deste tipo não parece ser nem suficientemente absoluto, nem suficientemente agradável ao espírito. (ÉVORA, 1993, p. 67-68).

Mesmo não havendo uma essencial diferença entre e a teoria lunar geocêntrica ptolomaica e a teoria heliocêntrica copernicana, a Lua gira em torno da Terra, em ambas as teorias. No entanto, no modelo explicativo de Ptolomeu, Copérnico introduziu as maiores alterações e realizou o principal ataque técnico à explicação ptolomaica (MARTINS Roberto, 1990). Por exemplo, para o movimento da Lua e seu diâmetro aparente, Copérnico utilizou um deferente concêntrico a Terra e dois pequenos epiciclos (de raios 0,113 e 0,026 do raio do deferente), enquanto Ptolomeu utilizou apenas um *excêntrico* (Idem).

Na teoria lunar copernicana, as variações das distâncias entre a Lua e a Terra eram sempre pequenas, enquanto na teoria lunar ptolomaica, essas variações de distância eram significativas, quase cem por cento. Copérnico, então, afirmou que Ptolomeu estava errado, pois o tamanho aparente da Lua não variava tanto assim durante o mês – as medidas de paralaxes lunares foram descritas por Rético na obra *Narratio Prima*, mas, desde a antiguidade, os astrônomos já sabiam desse detalhe.

Com efeito, essa falta de percepção de Ptolomeu para com esses parâmetros (diâmetro aparente da Lua e sua distância em relação a Terra) mostra o quanto ele não estava preocupado com a realidade física desses fenômenos, em comparação à preocupação de Copérnico (MARTINS Roberto, 1990).

Em face disso, afirma-se que, como praticante da astronomia matemática, preocupado em salvar os fenômenos, as teorias planetárias ptolomaicas explicavam muito bem os deslocamentos da Lua em longitude e latitude. Por isso, a preocupação com a real distância da Lua para a Terra era irrelevante. Assim, essa crítica de Copérnico à teoria lunar de Ptolomeu, pelo que tudo indica, não impressionou muito os astrônomos matemáticos de seu tempo.

Por essa perspectiva, historiadores da ciência concordam plenamente que: “entre os treze séculos que separam a morte de Ptolomeu do nascimento de Copérnico, não foi produzida nenhuma mudança fundamental no sistema (sic) ptolomaico” (KUHN, 1990, p. 123). Da mesma forma, o pensamento cosmológico aristotélico do universo de duas esferas permaneceu dominante, até mesmo depois da morte de Copérnico, particularmente, até os estudos de Tycho Brahe (1546-1601) sobre o aparecimento da estrela nova (em 1572) e do cometa (em 1577). Em face dessas importantes considerações e observando o fato de Copérnico ter proposto seu sistema astronômico sobre a complexa base de dados do Almagesto, mediante uma nova reinterpretação neoplatônica da astronomia, é relevante pontuar os três objetivos do próximo capítulo.

O primeiro, abordar os *fatores externos à ciência* no período histórico que separa Ptolomeu de Copérnico. O segundo, assinalar os fatores internos à astronomia – problemas empíricos e os problemas conceituais – que permitem tomar a astronomia copernicana como fio condutor da mudança dos compromissos metodológicos e ontológicos da tradição de pesquisa grega antiga, para a nova tradição de pesquisa europeia renascentista do século XVII. E o terceiro, continuar construindo os vínculos epistemológicos entre os aspectos, características, princípios da natureza da ciência e o conteúdo da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física.

Adjacentes a esses objetivos, é oportuno pontuar os aspectos sociais, políticos, econômicos, culturais (Renascimento artístico e científico), religiosos (Reforma e Contra Reforma), filosóficos e metafísicos (o neoplatonismo), que influenciam a prática científica e o pensamento científico ocidental. Assim como, destacar os *fatores internos a ciência*: as críticas ao sistema de mundo aristotélico e sua dinâmica de forças; as discussões acerca da possibilidade da mobilidade da Terra; os feitos astronômicos de Copérnico e a natureza das críticas que o seu trabalho sofreu, tanto de ordem empírica – provar que a Terra gira em torno do próprio eixo e translada em torno do Sol – quanto de ordem conceitual, apresentar uma explicação teórica para a queda dos corpos próximos à superfície da Terra.

## 8 OS FATORES EXTERNOS E INTERNOS À CIÊNCIA NO CONTEXTO EUROPEU MEDIEVAL

Em uma direção particular, o tratado astronômico de Nicolau Copérnico (1473-1543) *De Revolutionibus Orbis Coelestium – As Revoluções dos Orbes Celestes* – é visto como uma herança direta da tradição de pesquisa grega antiga. Copérnico estudou profundamente as traduções e comentários do *Almagesto* de Ptolomeu, no final do século XV, a ponto de propor uma reforma nos meandros mais técnicos da astronomia praticada em seu tempo. Copérnico reinterpretou os dados astronômicos produzidos por Ptolomeu, sob uma *lente epistemológica pitagórica e/ou platônica* que impulsionou, dentre outras coisas, o rompimento com a *visão de mundo geocêntrica*, amplamente difundida e sistematizada no pensamento científico europeu medieval e renascentista.

Dentre as traduções e comentários estudados por Copérnico, encontrava-se o texto astronômico *Sphaera Mundi*, publicado no século XIII, ano de 1233, que foi escrito por John de Halifax, mais conhecido por Johannes de Sacrobosco (1195-1256). Esse texto foi considerado o mais difundido e ensinado nas universidades europeias, no tempo de Copérnico. Nesse contexto, astronomia copernicana e suas implicações astronômicas, cosmológicas e físicas evidenciaram como os principais fundamentos científicos, filosóficos, lógicos, metafísicos, teológicos, dominantes no pensamento ocidental, foram colocados em xeque. Contudo, para alguns estudiosos, o trabalho de Copérnico foi impulsionado, muito mais, por *fatores externos* à ciência do que por *fatores internos*.

Considerando essa divergência, este capítulo marca o início da narrativa da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, para além das fronteiras da Grécia Antiga, que culminará no nascimento de uma *nova tradição de pesquisa europeia*, no século XVII, cognitivamente distinta da grega antiga, especialmente, pelo aporte conceitual de uma nova visão de mundo e a concepção newtoniana da teoria da gravitação universal. Para compreender todo esse processo, é preciso começar contextualizando os aspectos culturais, científicos, econômicos, políticos, sociais e religiosos que influenciaram a prática da astronomia, da cosmologia e da física. Neste capítulo, *os fatores externos à ciência nos treze séculos que separam Ptolomeu de Copérnico; a fase do lento declínio da atividade científica europeia medieval; a fase do desaparecimento do saber tradicional grego antigo; os fatores internos à ciência nos antecedentes medievais ao trabalho de Copérnico; os problemas*

*conceituais nas críticas à dinâmica de forças de Aristóteles; o resgate medieval da discussão sobre a possibilidade do movimento da Terra; e a discussão sobre a cosmologia medieval.*

## 8.1 OS FATORES EXTERNOS À CIÊNCIA DE PTOLOMEU A COPÉRNICO

Os fatores externos à ciência, isto é, extra científicos, que marcaram os treze séculos entre a data da morte de Ptolomeu e o nascimento de Copérnico, podem ser caracterizados pelos aspectos de cunhos culturais, econômicos, políticos, religiosos e sociais circundantes à prática científica europeia medieval e o saber antigo grego, do século II ao XIII d. C. Nesse longo período de tempo, a notória perda da ciência grega pela sociedade europeia medieval, ocorreu em duas fases importantes: a fase do lento declínio da qualidade e da quantidade da atividade científica, bem como a fase do desaparecimento do saber grego antigo (KUHN, 1990).

### 8.1.1 A Fase do Lento Declínio da Atividade Científica Europeia Medieval

A fase do lento declínio da atividade científica europeia medieval ocorreu entre o século II ao século VII. Nesse período, a atividade científica se reduziu à produção de enciclopédias e de comentários, das obras de filósofos e matemáticos gregos, por exemplo, Platão, Aristóteles e Euclides. Contudo, apenas fragmentos da ciência grega antiga foram preservados. Além disso, enquanto Ptolomeu ainda era desconhecido, Aristóteles era conhecido apenas pelo seu tratado de lógica.

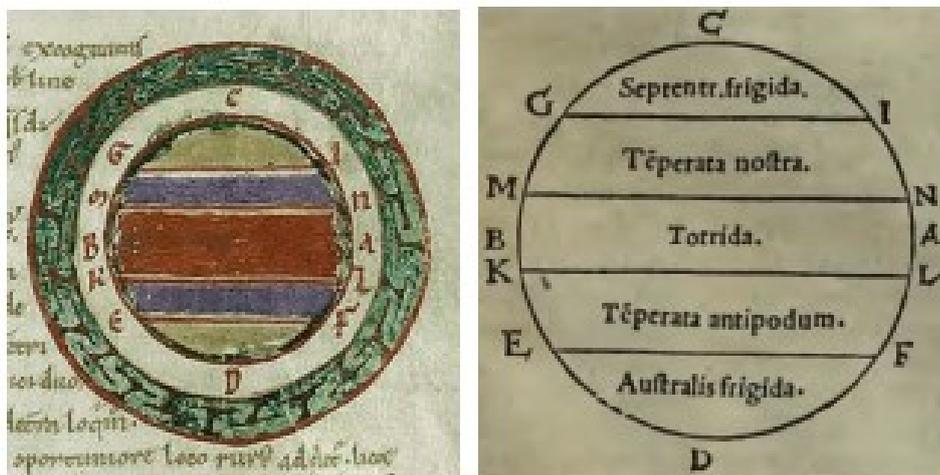
Atentando para os *externos à ciência*, especialmente, de cunhos sociais, políticos, econômicos e religiosos, esse período ficou conhecido como a era dos primeiros cristãos. Uma classe social e religiosa sem poder econômico, mas com preocupações políticas focadas na organização religiosa e na consolidação de uma autoridade espiritual e intelectual (GRANT, 2009). Nesse contexto, “a ciência para os primeiros padres era vista como um saber profano, salvo quando necessária para a vida cotidiana, era, no melhor dos casos, inútil, e, no pior, uma perigosa distração” (KUHN, 1990, p. 106). Esses padres acreditavam que todo saber necessário ao homem estava contido nas *Escrituras Sagradas – A Bíblia*.

Por sua vez, essa convicção produziu a primeira *tensão ideológica* entre a doutrina cristã e as ideias filosóficas gregas, muito antes da cristianização das ideias de Aristóteles pelos escolásticos da Idade Média. A saber: *a discussão acerca do mito bíblico de uma Terra*

*plana versus Terra esférica e o problema dos antípodas de Parmênides* (séc. V a. C.). Com efeito, essa tensão é importante criar mais vínculo epistemológico com mais um aspecto, característica, princípio da natureza da ciência, que perpassa por todo contexto europeu medieval e renascentista, até o nascimento da ciência moderna no século XVII, a saber, “que as concepções filosóficas, religiosas, culturais, sociais em que a ciência é desenvolvida influenciam profundamente o trabalho dos investigadores desde tempos remotos” (PEDUZZI; RAICIK, 2020, p. 30).

Nessa direção, para Parmênides, a esfera terrestre era dividida em cinco zonas, duas geladas nos polos e duas temperadas e habitáveis separadas por uma zona tórrida equatorial (Figura 35).

Figura 35 – As cinco zonas climáticas da Terra.



Fonte: Peduzzi (2018a, p. 106).

A Figura 35 representa as cinco zonas climáticas da Terra, difundidas por um manuscrito, século XII da nossa era, baseado na obra de Macrobius (~370 -?). A zona tórrida, no centro, separa as zonas frígidas e temperadas, em cada um dos hemisférios. Em função dessa divisão, um conjunto de ilhas gregas, denominadas de “ilhas de Crates”, foi reduzido apenas em duas regiões: “uma situada na zona temperada boreal, habitada, e outra situada na zona temperada austral, que não se tinha certeza se podia ser habitada” (PEDUZZI, 2018a, p. 81). Era isso que levava à discussão do problema dos antípodas.

Esse problema estava no foco do pensamento religioso, representado por um antigo teólogo cristão chamado Lactâncio (240-317). Este teólogo defendia que a Terra era plana, pois erravam “os que pensavam na redondeza da Terra [...]”, uma vez que era inconcebível de “se admirar alguém que falasse em jardins suspensos [da Babilônia], quando os filósofos

converteram em suspensos os campos, as cidades, os mares e os montes” (PÉREZ, 2009, p. 20 *apud* PEDUZZI, 2018, p. 82).

Com esse pensamento de Lactâncio, uma passagem de seu texto expressa bastante essa tensão entre sua visão terraplanista e a visão dos antípodas de Parmênides, a saber:

Os que defendem a existência dos antípodas têm um sentimento razoável? Há alguém tão extravagante para se persuadir de que há homens que tenham os pés no alto e a cabeça embaixo, que tudo o que está deitado neste país esteja suspenso naquele lá; que as gramas e as árvores lá cresçam descendo, e que a chuva e o granizo lá caiam subindo? [...] Então, como eles puderam sustentar que existam antípodas? [...] O céu sendo redondo, era preciso que a Terra, que é limitada em sua extensão, fosse também redonda. Sendo redonda, ela vê o céu de qualquer lado da mesma maneira, e opõe-lhe, por todos os lados, mares, planícies e montanhas. Então, segue-se daí que não há parte alguma que não seja habitada. Eis aí então como a redondeza, que atribuíram ao céu, permitiu a invenção dos antípodas. Quando se pergunta aos que defendem estas opiniões monstruosas, como pode acontecer que aquilo que está sobre a Terra não caia em direção ao céu, respondem que é pelo fato de que os corpos pesados tendem sempre para o meio de uma roda, e que os corpos leves, como as nuvens, a fumaça e o fogo elevam-se no ar. Confesso que não sei o que dizer destas pessoas que se tornaram obstinadas em seus erros, e sustentam essas extravagâncias, a não ser que, quando discutem, não têm outro objetivo se não o de se divertir ou demonstrar o seu humor. Seria mais fácil para mim, provar com argumentos imbatíveis, que é impossível que o céu esteja abaixo da Terra. Mas sou obrigado a terminar este livro aqui. (RANDLES, 1994, p. 16-17 *apud* PEDUZZI, 2018a, p. 82)

Para Lactâncio, “se existissem pessoas e outros seres vivos abaixo da zona tórrida da Terra, essas pessoas não poderiam ser descendentes de Adão, nem os seres poderiam ser descendentes dos animais que Noé abrigou em sua arca” (PEDUZZI, 2018a, p. 82). No ponto máximo dessa tensão, esse teólogo propôs uma visão cosmológica alternativa à visão de aristotélica, baseada em princípios bíblicos, porém, sua ideia jamais foi adotada oficialmente pela Igreja.

Ao contrário de Lactâncio, outros pensadores cristãos, do século II ao VII, especialmente, Santo Agostinho (354 - 430), tentaram reconciliar as ideias das escrituras com as ideias filosóficas gregas, por uma perspectiva que considerou a filosofia e a ciência grega como “*servas da teologia*” cristã. Em sua obra *Da Doutrina Cristã*, Agostinho expressou fortemente sua ideia sobre o papel subordinado da filosofia grega, declarando o seguinte:

Se aqueles que são chamados de filósofos tiverem dito algo de verdadeiro e condizente com nossa fé, os platônicos acima de tudo, não apenas não devemos temê-los, como deveríamos até resgatar o que disseram para o nosso próprio uso, assim como de seus injustos detentores. É como os egípcios, que não apenas tinham ídolos e pesados fardos, os quais o povo de Israel abominava e fugia deles, mas também vasos e ornamentos de ouro e prata, e finos trajes, dos quais as pessoas secretamente se apropriaram; e, melhor ainda, usaram-nos ao saírem do Egito, e isso

não por sua iniciativa própria, mas sob as instruções de Deus, com os egípcios inadvertidamente emprestando a eles, coisas das quais eles próprios não faziam bom uso. (GRANT, 1969, p. 311, tradução própria)

Agostinho admitia que, para sanar o conflito travado por Lactâncio, no que cabe a Terra, sua parte inferior podia estar coberta com água: “disso, [a forma esférica] não decorria que o outro lado do mundo fosse desprovido de mares, nem decorria imediatamente que, sendo desprovido de mares, fosse habitado” (GRANT, 1969, 311). A perspicácia de Agostinho, um dos pensadores mais importantes da cristandade medieval, revela-se também por ele ter sido:

Provavelmente muito devotado ao esquema catequista, ele resguarda o princípio da unicidade da humanidade oriunda de Adão e, partindo de um ecúmeno plano, denuncia o “absurdo de sustentar que os homens tenham passado a navegar desta parte à outra, através do imenso oceano”. Para ele, o problema dos antípodas reduz-se a um obstáculo físico: a imensidão do Oceano. (RANDLES, 1994, p. 18)

Contudo, os argumentos e trabalho de Agostinho não foram suficientes para resolver essa tensão. Na Alta Idade Média, por exemplo, as críticas sobre a incompatibilidade entre as ideias cosmológicas aristotélicas e as *Escrituras Sagradas* se materializaram, em Paris, ano de 1212, nas proibições do ensino da física e da metafísica (CROMBIE, 1953).

No entanto, essa proibição “não era [...] válida em toda a cristandade, embora pudesse ser reconhecida por todos aqueles que se formavam na [...] universidade (de Paris) e depois ensinavam em outras instituições” (RANDLES, 1994, p. 25). Portanto, as ideias astronômicas, cosmológicas e físicas aristotélicas continuavam sendo ensinadas.

### **8.1.2 A Fase do Desaparecimento do Saber da Tradição de Pesquisa Grega Antiga**

Sobre o desaparecimento do saber da tradição de pesquisa grega antiga, os fatores políticos e culturais estavam implicados no papel dos árabes, do século VII, com a invasão muçulmana da Bacia do Mediterrâneo. Esse fator político se desdobrou na mudança do centro geográfico da cristandade europeia, para o norte do Mediterrâneo, forçando ainda mais o declínio do saber antigo grego continente europeu.

Durante o século VII, os europeus foram destituídos até mesmo dos documentos da tradição antiga, de modo que todo o conhecimento científico no continente europeu ocidental limitava-se às compilações e comentários de algumas obras, muitas vezes, imprecisos e

intelectualmente adulterados (KUHN, 1990). Nesse “isolamento intelectual da cristandade ocidental, dificilmente se poderia esperar qualquer contribuição para o conhecimento humano do universo material” (CROMBIE, 1953, p. 32). Isso porque “tudo o que o Ocidente foi capaz de fazer, foi preservar as coleções de fatos e interpretações já feitas pelos enciclopedistas” (Idem).

Por outro lado, a invasão árabe na *península ibérica* proporcionou aos muçulmanos um grande renascimento científico no Islã. Esse renascimento contribuiu para preservar a tradição antiga grega que os cristãos haviam perdido depois do século VII. Por exemplo, nos estudos de óptica e perspectiva, os neoplatônicos Alkindi (século XI) e Alhazen (? 965 - 1039) estudaram espelhos esféricos e parabólicos, câmara escura, lentes e a visão humana (CROMBIE, 1953). Além disso, os árabes trabalharam na reconstrução da ciência grega antiga, realizando traduções de versões siríacas dos textos originais gregos para o árabe e acrescentaram contribuições próprias na astronomia, na matemática, na química e na óptica (CROMBIE, 1953).

Na astronomia, especialmente, os árabes fizeram novas observações celestes e desenvolveram novas técnicas para o cálculo das posições planetárias, mas preservaram os fundamentos da tradição de pesquisa grega antiga, especialmente, da astronomia matemática instrumentalista e da cosmologia e visão de mundo geocêntrica aristotélica. O povo islâmico, em última instância, contribuiu para o desenvolvimento da astronomia, da cosmologia e da física da nova tradição de pesquisa europeia, pois preservou os registros da antiga ciência grega para os novos eruditos, no começo do século X, e no início do *Renascimento*, no século XII. Nesse itinerante, as primeiras traduções latinas foram aceitas e multiplicaram-se, desde o século X. Nos séculos XII e XIII foram criadas as primeiras universidades europeias (KUHN, 1990).

Um novo tipo de instituição culta peculiar à Europa. Começando como centros de propagação oral do saber antigo, estas universidades rapidamente se transformaram no domínio da erudição europeia e de uma tradição original criativa, a tradição filosófica e combativa conhecida como Escolástica. (KUHN, 1990, p. 125)

Nessas instituições, especialmente, no século XIII, o *Almagesto* e a maioria dos textos astronômicos e de física de Aristóteles foram seletivamente incluídos nos currículos acadêmicos. O texto *Sphaera Mundi* de Sacrobosco, em particular, embora mesmo não apresentasse nem introduzisse nenhum progresso astronômico teórico e observacional, foi o mais estudado nas universidades de (Paris, Viena, Oxford, Bolonha, Praga, etc.), até os finais

do século XVII (GRANT, 2009). Em face disso, destaca-se que a manutenção da visão de mundo aristotélica, nesse período, era bem notória, como mostra uma passagem do texto de Sacrobosco:

A máquina universal do Mundo divide-se em duas regiões, a região do éter e a região dos elementos. A região dos elementos, que está sujeita a uma contínua alteração, divide-se por sua vez em quatro partes. A terra é como que o centro do mundo; está situada no meio de todas as coisas. Em torno da terra está a água; em torno da água, o ar; em torno do ar, está o fogo puro e isento de agitação que, como diz Aristóteles no livro dos Meteoros, atinge o orbe da Lua [...]. Cada um dos três últimos elementos envolve a terra sob a forma de uma camada esférica, salvo onde a secura da terra resiste à umidade da água, a fim de conservar a vida dos seres humanos. [...]. (SACROBOSCO, 2011, p.10-11)

Acerca dessa manutenção da visão de mundo aristotélica, com exceção desse texto de Sacrobosco, muitos problemas de ordem técnica estavam presentes nas traduções dos textos antigos gregos. Muito disso, por suas recuperações terem sido realizadas por um trabalho aleatório e sem um objetivo acadêmico muito claro. Por isso, uma real preocupação em trabalhar diretamente com as fontes gregas, somente surgiu com o astrônomo austríaco Georg von Peurbach (1423 - 1461), em parceria com seu discípulo, o alemão Johann Müller von Königsberg (1436 - 1476), conhecido como Regiomontanus (KOYRÉ, 2006).

Peurbach foi o primeiro a introduzir algum progresso na astronomia. Sua principal preocupação residia, então, em corrigir as imprecisões produzidas pelos modelos ptolomaicos, que estavam associadas às inexatidões das *Tabelas Alfonsinas*, fruto da má qualidade das traduções árabes (KUHN, 1990). Preocupação essa, que foi frutiferamente transmitida para Copérnico, quando trabalhou e estudou junto a Regiomontanus em Roma (GINGERICH, 2008). Nesse contexto, Peurbach acreditava que era necessário o estudo dos originais de Ptolomeu, para reverter esses problemas, porém ele morreu antes de completar o trabalho. Essa tarefa ficou a cargo de Regiomontanus, que publicou, no ano de 1496, a tradução do *Almagesto* diretamente do original em grego (BERTRAND, 2008).

No longo período histórico que separa Ptolomeu de Copérnico, pode-se afirmar que pouco avanço ocorreu na astronomia. Primeiramente, porque os eruditos europeus se preocuparam com a assimilação da herança cultural grega. Segundo, durante essa assimilação, os problemas de interpretação e de reunificação da ciência grega se avolumaram no pensamento escolástico. Em outras palavras, esses eruditos apenas tentaram estabelecer um sistema de conhecimento extenso e coerente modelado segundo o pensamento do próprio Aristóteles (KUHN, 1990).

## 8.2 OS FATORES INTERNOS À CIÊNCIA NOS ANTECEDENTES DA ASTRONOMIA COPERNICANA

Dentre os fatores internos à astronomia e à cosmologia, que fazem parte dos antecedentes medievais, especialmente, ao advento da astronomia copernicana (assunto do próximo capítulo 9), encontram-se, respectivamente: *os problemas conceituais internos de incompatibilidade lógica entre a cosmologia aristotélica e a astronomia de Ptolomeu; as críticas à dinâmica de forças de Aristóteles; e o resgate da discussão sobre a mobilidade da Terra e a discussão sobre a cosmologia medieval*, abordados individualmente, a seguir. A razão de existir desses problemas internos é mostrar que a *Europa não dormiu uma longa noite de mil anos*. Bem como observar que o advento da astronomia copernicana não surgiu como marco no pensamento científico europeu, sem precedentes de debates profundos e responsáveis por aplainar o caminho de Copérnico.

A luz desses fatores internos à ciência, especialmente, à astronomia, cosmologia e a física, é oportuno criar mais um *vínculo epistemológico* entre seus conteúdos e mais um aspecto, característica, princípios da natureza da ciência, que carrega uma ideia fundamental, pela qual “a dinâmica da produção de conhecimentos na ciência mostra um processo vivo, criativo, polêmico, questionador, argumentativo. Essa realidade contrasta com a falsa imagem de uma ciência que se apresenta como um corpo árido de fatos e conclusões” (PEDUZZI; RAICIK, 2020, p. 42).

### 8.2.1 O Problema Conceitual Interno Entre a Astronomia de Ptolomeu e a Cosmologia de Aristóteles

No curso do desenvolvimento da nova tradição de pesquisa europeia, muitas contradições caracterizavam a prática da astronomia e da cosmologia da tradição de pesquisa grega antiga. Como foi observado no capítulo 7, o próprio Aristóteles nem sempre era consistente em suas argumentações filosóficas. Ao mesmo tempo, sua cosmologia e visão de mundo não impediram nem evitaram que seus contemporâneos, Heráclides de Ponto e Aristarco de Samos propusessem ideias contrárias às suas, por exemplo, sobre a imobilidade da Terra. Embora tenham sido extremamente ampliadas pelos comentadores helênicos e islâmicos, durante os séculos que separam Aristóteles e Ptolomeu, de seus discípulos europeus.

A cosmologia de Aristóteles foi adotada como quadro teórico para fundamentar as explicações de Ptolomeu frente a todos os fenômenos celestes da tradição de pesquisa grega antiga. Bem como sua visão de mundo e sua malha conceitual se tornou dominante no pensamento e na prática científica ocidental do continente europeu medieval e renascentista. É nesse contexto que se encontra o conflito cognitivo entre a realidade das esferas celestes, da cosmologia aristotélica, e os mecanismos matemáticos das teorias planetárias ptolomaicas fundamentadas nos artificios geométricos dos epiciclos, deferentes, excêntricos e equantes.

Como um *fator interno* à ciência, esse problema conceitual de incompatibilidade lógica desempenhou um papel significativo no desenvolvimento da astronomia, pois se constitui na principal bifurcação dessa área (KUHN, 1990). Sua materialidade constituiu-se na ideia de que a cosmologia aristotélica, mesmo por especulações, preconizava a realidade física da divisão do cosmos em duas esferas celestes.

Nessa divisão, os movimentos no mundo supralunar explicavam os movimentos dos planetas, mas no mundo sublunar encontravam-se as mudanças ocorridas no mundo terrestre, geração, corrupção, vida, morte, e as estações do ano. Em contrapartida, as teorias planetárias de Ptolomeu buscavam apenas calcular e prever as posições planetárias, ignorando os ajustes, por exemplo, dos epiciclos, deferentes, excêntricos e equantes, à necessidade psicológica da racionalidade cosmológica (KUHN, 1990). Quatro séculos antes de Copérnico, os escolásticos, equivocadamente, consideravam que Aristóteles e Ptolomeu eram contemporâneos.

Por conta disso, a incompatibilidade lógica entre essas duas áreas da ciência era vista como parte de uma única doutrina do saber da tradição de pesquisa grega antiga. Em outras palavras, as mudanças que Ptolomeu concebia como parte da evolução natural do conhecimento, ao longo dos cinco séculos que o separam de Aristóteles, aos olhos dos escolásticos, elas eram vistas como contradições irreconciliáveis, que lançavam dúvidas sobre toda a tradição de pesquisa grega (KUHN, 1990).

Significativamente, esse problema foi um dos precedentes agudos que forneceram a Copérnico as motivações para propor sua reforma na astronomia. No contexto copernicano, as mudanças promovidas pelo Renascimento e a influência do pensamento neoplatônico também tiveram um peso importante. Portanto, embora a ciência ocupasse um lugar de grande destaque no pensamento científico europeu ocidental, na fase final da Idade Média, as forças intelectuais dominantes eram teológicas. Em razão disso, a prática científica nesse meio teológico alterou tanto as forças quanto as fraquezas da tradição de pesquisa grega antiga.

## 8.2.2 Os Problemas Conceituais nas Críticas à Dinâmica de Forças de Aristóteles

As críticas à dinâmica de forças de Aristóteles podem ser compreendidas como os problemas conceituais internos presentes no contexto da prática científica europeia, no início da Idade Média. Dentre os diversos pensadores e críticos das ideias de Aristóteles dessa época, encontrava-se o cristão neoplatônico Philoponus de Alexandria (490 - 570). Porém, muito antes dele, parte dessa dinâmica de forças, por exemplo, sobre o movimento de projéteis, já havia sido criticada pelo astrônomo Hiparco de Niceia, no século II a. C.

Para acessar essas críticas, é preciso recapitular as ideias aristotélicas a esse respeito. A primeira delas é que, a *força motriz* era a causa de todos os movimentos (violentos). Cessada a ação que essa força exercia sobre um corpo em movimento, cessava-se o movimento, uma vez que tudo que era movido deveria ser movido por algo. Em outras palavras, Aristóteles afirmava que “todas as coisas, cujo movimento era violento e não natural, eram movidas por algo diferente delas próprias, e todas as coisas, cujo movimento era natural, eram movidas por algo” (ÉVORA, 1993, p. 85).

Depois que os projéteis não estavam mais em contato direto com o motor responsável pelo lançamento, a manutenção desse movimento dependia de uma força em contínuo contato com eles. Para tal força, Aristóteles postulou que o motor, em tais casos, movia algo a mais (o ar), ao mesmo tempo em que os projéteis eram lançados. Ao ser movido, esse ar tornava-se também um motor. Por esse raciocínio, Aristóteles considerava que:

[...] os projéteis eram movidos adiante mesmo depois que aquilo que deu a eles seu impulso, não estivesse mais os tocando, ou pela razão da substituição recíproca, de acordo com a qual o ar era empurrado adiante pelo projétil, voltava e tomava o lugar do projétil, e então o empurrava adiante, como alguns sustentam; ou pelo fato de que o ar que era empurrado, no instante em que o projétil era inicialmente disparado, movia-se com um movimento mais rápido do que a locomoção natural, para baixo do projétil, empurrando assim o projétil adiante. (ÉVORA, 1993, p. 86)

Nesse sentido, o movimento retilíneo violento era mantido até que a *força motriz*, originalmente impressa nessa porção de ar, se dissipasse. O meio oferecia tanto a *força motriz* como a resistência ao movimento do objeto.

Conceitualmente, essa explicação foi chamada de *antiperistasis*: um processo lógico pelo qual se assume que o corpo  $P_1$  empurra  $P_2$  para o lugar de  $P_3$ ,  $P_2$  empurra  $P_3$  para o lugar de  $P_4$ , ...,  $P_{n-1}$  empurra  $P_n$  para o lugar de  $P_1$ . Ilustrativamente, esse processo é representado pelo lançamento de um projétil (flecha) – Figura 36.

Figura 36 – A ideia da Antiperistasis de Aristóteles.



Fonte: Peduzzi (2018a, p. 49). Tradução de Franklin (1978, p. 202).

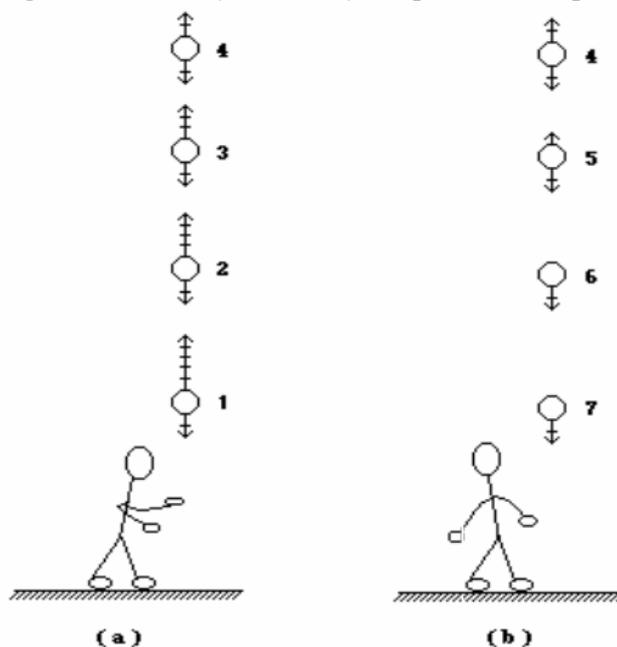
Em face da ideia da (Figura 36), pelo conceito de *antiperistasis* de Aristóteles, nenhum movimento no vácuo era possível, pois sem o meio, o movimento violento não teria causa, devido à perda de contato entre o corpo móvel e o motor que o lançou. Da mesma forma, pensava-se que, se a resistência do meio fosse nula, as velocidades de todos os objetos, em movimento natural ou violento no vácuo, seriam iguais e infinitas, deixando margens à existência de movimentos instantâneos, o que para Aristóteles era logicamente um absurdo.

Frente a essas ideias, resgatam-se as primeiras críticas à dinâmica de força de Aristóteles, proferidas por Hiparco. Este astrônomo e inventor de máquinas considerava que no movimento violento de projéteis, a força impressa era seu agente causal, pois era ela quem dominava a tendência dos projéteis para cima ou para baixo. Hiparco acreditava que, quando a força diminuía,

1. O movimento para cima continuava, mas não na mesma proporção; 2. O corpo movia-se para baixo sob a influência de seu impulso interno, embora a força original subsistesse em alguma medida; e 3. Como esta força continuava a diminuir, o objeto movia-se para baixo mais rapidamente, e mais rapidamente quando esta força estivesse inteiramente perdida. (ÉVORA, 1993, p. 84, em nota)

Na Figura 37, um esquema ilustrativo demonstra qualitativamente esses argumentos de Hiparco. Nesse, encontra-se a representação da ação da *força impressa* atuando sobre um corpo lançado verticalmente para cima, que ao retornar para baixo, devido ao cessar dessa força impressa, aumenta a velocidade de queda do corpo.

Figura 37 – Atuação da força impressa de Hiparco.

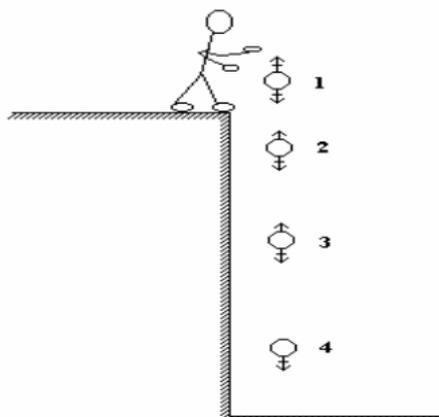


Fonte: Peduzzi (2018a, p. 58).

Na figura 37, as forças sobre uma pedra atirada verticalmente para cima, durante a subida (a), e a sua descida (b). No ponto 1, a pedra já teria deixado o contato com a mão do lançador; o ponto 4 indica a posição mais alta atingida pelo projétil; os pontos 2 e 3 representam posições de subida da pedra, enquanto 5, 6 e 7 indicam pontos da sua descida.

Por outra perspectiva, para os corpos em queda livre, Hiparco considerava que “a força que os seguravam permanecia com eles até certo ponto, e este era o fator restritivo que respondia pelo movimento mais lento junto ao início da queda” (ÉVORA, 1993, p. 84, em nota). Por sua vez, essa ideia de Hiparco é ilustrada pela Figura 38.

Figura 38 – Força sobre um objeto movendo-se em direção ao solo.



Fonte: Peduzzi (2018a, p. 58).

Na figura 38, acima, observa-se que, no ponto 1, não há mais contato com a mão da pessoa; os pontos 2 e 3 denotam que sobre a pedra ainda existe parte da “força projetora” para cima; no ponto 4, no entanto, até no choque da pedra contra o solo, fica evidente o cessar dessa força, estando presente apenas a ação da lei natural do movimento dos corpos para baixo.

Em razão desses argumentos, nas críticas de Hiparco à dinâmica de força de Aristóteles, encontra-se seu conceito de *força impressa, que se configura em uma força interna armazenada no projétil*. Conceito diferente da *força motriz* de Aristóteles, que era proveniente do meio, como ar, por exemplo.

Com essa diferença conceitual, na Idade Média, a explicação de Philoponus será muito semelhante à explicação de Hiparco. Philoponus afirmava que os argumentos de Aristóteles não eram convincentes, pois não apresentavam nada que fosse satisfatório para provar que o movimento violento fosse causado pelo processo descrito pela *antiperistasis*. Criticando esse conceito aristotélico, Philoponus afirmou o seguinte:

Sobre esta suposição seria difícil dizer o que é (uma vez que parece não haver força contrária) que faz o ar, uma vez empurrado adiante, mover-se de volta, isto é, ao longo dos lados da flecha, e depois alcançar a traseira, voltando uma vez mais e empurrado a flecha adiante. Pois, nesta teoria, o ar em questão deve realizar três movimentos distintos: ele deve ser empurrado para frente pela flecha, então mover-se para trás, e finalmente voltar e continuar para frente uma vez mais. Todavia, o ar é facilmente movido, e uma vez colocado em movimento atravessa uma distância considerável. Como, então, pode o ar, empurrado pela flecha, deixar de mover-se na direção do impulso impresso, mas em lugar disso virar, como por algum comando, e retrair seu curso? Além disso, como pode este ar, ao virar, evitar ser disperso no espaço, mas colidir precisamente sobre o entalhe final da flecha e novamente empurrar a flecha adiante e presa a ele? Tal visão é inteiramente inacreditável e chega a ser fantástica. (CLAGETT, 1961, p. 508, tradução própria).

De acordo com essas críticas, Philoponus se viu obrigado a encontrar outra explicação conceitual para a causa do movimento violento. Concebendo que o meio apenas retardava o movimento de um corpo, ele postulou a existência de uma *força motriz incorpórea*, na qual “era necessário que alguma força motriz incorpórea fosse cedida pelo propulsor ao projétil, e que o ar, se estivesse presente no movimento, ou não contribuiria de forma alguma ou então muito pouco para este movimento do projétil” (COHEN Morris; DRABKIN, 1966, p. 217).

Para Philoponus, essa *força motriz incorpórea* não era de natureza permanente, pois desaparecia gradualmente, de tal forma, que essa diminuição ocorria devido a uma dupla resistência: devido ao meio e à tendência do corpo pesado ir para o seu lugar natural.

Seguindo essa concepção, Philoponus desenvolveu uma *lei de movimento*, que, em linguagem matemática atual, pode ser escrita na forma:  $v \propto (F - R)$ , em que  $v$  é a velocidade,  $F$  a *força motriz* e  $R$  é a resistência do meio. A principal implicação dessa lei, para a dinâmica de força de Aristóteles, é que ela tornava plausível o movimento no vácuo, no qual os corpos se movimentariam sem resistência e com velocidade finita, proporcional à *força motriz*. Por certo, uma possibilidade inconcebível para Aristóteles.

Para exemplificar “um tipo de movimento sem resistência, mas com velocidade finita, contemplado por sua lei, Philoponus cita o movimento das esferas celestes” (CROMBIE, 1953, p. 68). Esse exemplo, pela primeira vez, indica que as leis mecânicas do movimento natural e violento, de algum modo, parecem ter sido direcionadas tanto para o mundo sublunar quanto para o mundo supralunar aristotélico.

Adjacente, a isso, destaca-se que pela destruição do cosmos aristotélico ser um dos marcos importantes da revolução científica do século XVII (KOYRÉ, 2002), parece que, com Philoponus, esse velho cosmos começou a ter suas bases filosóficas colocadas à prova, muito antes do surgimento da supernova e do cometa, registrados sistematicamente por Tycho Brahe, em 1572 e 1577.

Posteriormente, a lei de movimento de Philoponus foi desenvolvida pelo árabe Avicena (980 - 1037). No século XII, tanto essa lei quanto a tese da possibilidade do movimento no vácuo foram advogadas pelo espanhol Avempace (1106 - 1138). Por serem integrantes da corrente de pensamento neoplatônica, Philoponus e Avempace procuraram as “naturezas e as causas reais dos fenômenos celestes, não na experiência sensível aristotélica imediata, mas, pelo contrário, em fatores abstraídos pela razão, a partir da experiência” (CROMBIE, 1953, p. 69).

Por outra perspectiva, opondo-se a esses pensadores, Averrões levantará as principais linhas do debate sobre as leis de movimento, no início do século XIII. Mas embora isso tenha acontecido, a visão de Philoponus e de Avempace foi defendida por vários escolásticos: pelo frade italiano Santo Tomás de Aquino (1225 - 1274), o mais importante deles; seguido por Roger Bacon (1214 - 1292), padre e filósofo inglês, que deu bastante ênfase ao empirismo e ao uso da matemática no estudo da natureza.

Tomás de Aquino, mesmo rejeitando a ideia da existência do vazio, por conta das consequências inerciais do movimento, admitia a existência de um vácuo hipotético, concordando com Avempace, no que diz respeito à sua concepção da finitude da velocidade de um corpo que não encontra resistência em seu deslocamento (PEDUZZI, 2018a).

No entanto, no final do século XIII e início do século XIV, vários comentaristas vão se unir a Aristóteles e Averrões, contra Aquino e Avempace, para debater esse tema. Posteriormente a essa discussão, no século XIV, ano de 1320, o conceito de *força impressa auto extingüível* foi retomado pelo teólogo e filósofo franciscano italiano Francisco de Marchia (1290 - 1344), cujos trabalhos colocaram em evidência sua influência sobre a tese do *impetus* do filósofo francês Jean Buridan (1300 - 1358).

Francisco de Marchia, por exemplo, pontuou que a força cedida a um projétil pelo seu agente impulsionador não era permanente, mas:

Era uma qualidade accidental, extrínseca e violenta que, por ser oposta às inclinações naturais do corpo, era tolerada somente durante um tempo. Dizia que a força motriz de um projétil era uma “forma” que não era inteiramente permanente, como a brancura ou o calor do fogo, nem inteiramente transitória, como o processo do aquecimento ou o do movimento, mas algo intermediário que durava um tempo limitado. (CROMBIE, 1953, p. 62, tradução própria)

Para esse filósofo, tanto o conceito de *antiperistasis* quanto o papel do meio no movimento dos corpos eram sem valor cognitivo, diante das muitas experiências. Em conformidade, Jean Buridan utilizou-se de uma experiência muito semelhante ao exemplo da flecha de Philoponus, que contradizia *antiperistasis* de Aristóteles. E de outra diferente, para o papel do meio, que refletia a ideia de que no curso de um navio, mesmo contra a corrente, depois que seu impulso cessa, ele continua seu movimento. Da mesma forma, estando um marinheiro no convés do navio, este não sentiria o ar atrás dele o empurrando, por essa razão, a experiência mostrava que o papel do meio era falso.

Em contrapartida, Buridan propusera uma explicação alternativa, afirmando que, em uma pedra ou projétil, havia algo impresso que era a *força motriz (virtus motiva)* do objeto, sendo essa ideia muito melhor do que recorrer à afirmação de que o ar continuava a mover o objeto, quando o ar parecia mais resistir ao movimento. Para Buridan, o que devia ser dito era que o motor, ao mover um corpo (um projétil), imprimia certo ímpeto (*impetus*) ou certa *força motriz (viz motiva)* ao corpo em movimento (no qual agia o *impetus*), na direção para a qual o motor estava movendo o corpo para cima ou para baixo, ou lateralmente ou verticalmente (ÉVORA, 1993).

Nesse sentido, quanto mais rapidamente o motor movia o corpo, mais forte seria o *impetus* que ele lhe imprimia. Assim, era por esse *impetus* que a pedra era movida depois que o atirador parava de movê-la. Porém, esse mesmo *impetus* era continuamente reduzido pela

resistência do ar e pela gravidade da pedra, que a inclinava em uma direção contrária àquela a qual o *impetus* estava naturalmente predisposto a movê-la (ÉVORA, 1993). Portanto, o movimento da pedra tornava-se continuamente mais lento e, finalmente, o *impetus* diminuía tanto que a gravidade da pedra o vencida e movia a pedra para baixo, isto é, para o seu lugar natural.

Por outro lado, se não fosse pela ação da resistência do meio e da gravidade, o *impetus* de Buridan seria uma coisa de natureza permanente distinta do movimento local no qual o projétil era movido. Por isso, Buridan caracterizou o *impetus* como sendo diretamente proporcional à velocidade do projétil e à quantidade de matéria contida nele – distinta de uma concepção newtoniana de matéria –, ideia muito próxima do conceito newtoniano de quantidade de movimento (ÉVORA, 1993).

Nesse contexto, a teoria do *impetus* de Buridan desempenhou um papel muito importante na revolução cosmológica, dos séculos XVI e XVII, uma vez que fora concebida como uma tentativa mais assertiva de unificar os movimentos terrestres e celestes, sob o mesmo conjunto de leis (CLAGETT, 1961). Ao utilizar a teoria do *impetus* para esse propósito, Buridan afirmou que:

Assim se poderia imaginar que é desnecessário postular inteligências como motoras dos corpos celestes (*intelligentias moventes corpora coelestia*), uma vez que as Sagradas Escrituras não nos informa que inteligências devem ser postuladas. Pois se poderia dizer que quando Deus criou as esferas celestes, Ele começou a mover cada uma delas como quis; e elas são movidas até agora pelo *impetus* que Ele lhes deu, pois não havendo resistência, o *impetus* nem corrompe nem diminui seus movimentos. (CLAGETT, 1961, p. 561, tradução própria)

Mesmo diante dessas evidências históricas escritas, observa-se que elas não são suficientes para afirmar, convictamente, que houve por parte de Buridan uma clara tentativa de formular uma única mecânica para todo o universo. Mesmo assim, o uso do *impetus* para explicar o movimento celeste e terrestre representou, evidentemente, um primeiro passo para o rompimento da dicotomia aristotélica entre dinâmica celeste e mecânica terrestre.

Da mesma forma, embora a ênfase dos argumentos escolásticos em favor da possibilidade do movimento diário da Terra ter sido sobre a relatividade do movimento – assunto a seguir –, a *teoria do impetus* possibilitou ao filósofo e matemático Nicolas de Oresme (1323 - 1382) supor que a Terra, em movimento, fosse capaz de dotar de propulsão interna os corpos que a abandonam, à medida que esses fazem parte do sistema mecânico de sua rotação e seguem o seu movimento.

### 8.2.3 O Resgate da Discussão Sobre a Possibilidade do Movimento da Terra

O resgate medieval sobre a discussão da possibilidade do movimento da Terra foi um dos debates mais importantes nos antecedentes ao advento da astronomia copernicana. Como um problema empírico agudo, os eruditos como Jean Buridan, mesmo sendo críticos ferrenhos da dinâmica aristotélica, não aceitavam a possibilidade do movimento da Terra.

No século XIV, o próprio Buridan serviu-se da *teoria do impetus* para argumentar contra essa possibilidade. Ele partiu da discussão acerca do problema de uma flecha cair no mesmo lugar, em um ponto na Terra, a partir do qual foi lançada verticalmente para cima. Buridan afirmava que:

[...] os defensores da possibilidade da rotação da Terra afirmam que isto acontece porque o ar, movendo-se com a Terra, carrega a flecha, embora ela nos pareça mover-se simplesmente em linha reta, pois ela é carregada adiante conosco. Portanto, nós não percebemos aquele movimento pelo qual ela é carregada com o ar. Mas este subterfúgio não é suficiente, pois o violento *impetus* da flecha ao subir resistiria ao movimento lateral do ar, de tal forma que ela não se moveria tanto quanto o ar. (CLAGETT, 1961, p. 596, tradução própria)

Para argumentos com esse, o discípulo de Buridan, Nicolau Oresme, acreditava não haver opinião contrária, isto é, a de que a Terra pudesse se mover com movimento diário, mas o céu não. Em face disso, Oresme acreditava que era possível pensar o contrário: em primeiro lugar, por qualquer observação (experiência) e, em segundo, mediante a razão, pela qual poderia apresentar argumentos em favor de sua opinião (CLAGETT, 1961).

Prosseguindo, Oresme afirmou que uma flecha ou pedra poderia ser movida muito rapidamente para leste, como ar através do qual ela poderia passar e com toda a massa da parte inferior do universo, que era movida como o movimento diário. Em razão disso, a flecha retornaria ao lugar de onde foi lançada e sua trajetória real seria uma composição de dois movimentos – retilíneo e circular. Sabe-se que Oresme só veio compreender muito tempo depois, que não era o ar a causa do movimento lateral da flecha, mas o fato dela ser parte do sistema mecânico da rotação da Terra (CLAGETT, 1961).

Quanto à falta de observação do movimento composto da flecha, Oresme conhecia as ideias sobre a relatividade óptica do movimento desenvolvida pelos árabes. Acerca disso, ele argumentou que uma pessoa em um navio, que se movimentasse para leste muito rápido, não estaria ciente de seu movimento (CLAGETT, 1961). De acordo com essa opinião, ele acreditava que a flecha subia e descia em linha reta. No caso da possibilidade do movimento

da Terra, de forma semelhante, ele acreditava que todo movimento pareceria como se a Terra estivesse em repouso. Portanto, não se podia demonstrar por qualquer experiência que o céu era movido com o movimento diário, e não a Terra.

Apesar desse argumento em favor da possibilidade do movimento da Terra, pelo princípio da relatividade óptica do movimento, opositores aristotélicos utilizavam a lei de movimento natural retilíneo de Aristóteles, para dizer que os corpos elementares só podiam possuir um único movimento (GRANT, 2009). Por exemplo, no caso das coisas terrestres, o movimento era naturalmente retilíneo e para baixo, tal como era observado.

Em razão disso, os opositores da mobilidade da Terra defendiam que o movimento de rotação axial da Terra teria de ser *não natural* e, portanto, provocado por um agente externo (motor) que permanecesse em contato direto com ela. Mas na visão aristotélica, era impossível uma coisa movida por uma magnitude finita durar um tempo infinito. Isso porque, cessada a ação do motor, cessaria o movimento da Terra, logo seu movimento não poderia ser eterno, e a ordem do mundo também não poderia ser eterna (GRANT, 2009).

Mantendo-se firme a favor da possibilidade do movimento da Terra, Oresme proferiu um contra-argumento ainda mais contundente que o anterior, afirmando que:

Cada corpo simples ou elemento do Universo, exceto, talvez, o Céu Supremo, move-se em seu lugar próprio (lugar natural) com movimento circular. Se qualquer parte de tal corpo é retirada do seu lugar e para fora do corpo principal, ela para lá retorna tão diretamente quanto possa, uma vez removido o impedimento. [...] Eu digo que este movimento (circular) é natural para a Terra, como um todo e em seu lugar; contudo, suas partes têm um movimento natural diferente, retilíneo e para baixo, quando estão fora de seu lugar natural. (DUHEM, 1958, p. 335 *apud* ÉVORA, 1993, p. 100)

Nesse contra-argumento, encontra-se a ideia de sistema mecânico, pelo qual os corpos terrestres podem compartilhar do movimento de rotação da Terra, embora isso não possa ser provado pela experiência, uma vez que o observador também compartilha desse movimento (ÉVORA, 1993). Além disso, Oresme pressupõe algo muito importante, isto é, de que o movimento de rotação da Terra podia ser eterno também, uma vez que é circular – movimento característico dos corpos celestes. Isso, por sua vez, implica em um rompimento das ideias de perfeição aristotélica associadas aos mundos supralunar e sublunar. Em conformidade, após demonstrar pela razão e pelo princípio da relatividade do movimento, que não se podia provar que é o céu que se move, e não a Terra. Oresme acreditava que, embora ele mesmo pensasse nessa possibilidade, isso não era claramente evidente. Portanto, o contrário, embora plausível, também era contra intuitivo (ÉVORA, 1993).

Posteriormente, Copérnico teve de lidar com os argumentos aristotélicos contra a possibilidade do movimento da Terra. Adiantando um pouco esse momento, ele também se fundamentou no princípio da relatividade do movimento, para dizer o seguinte:

E por que não havemos de admitir que a rotação diurna seja aparente no Céu, mas real na Terra? E é assim que as coisas se passam na realidade [...] Na verdade, quando um navio navega com bonança, tudo o que está fora dele parece aos navegantes mover-se pelo reflexo daquele movimento e, por outro lado, pensam que estão imóveis com todos os objetos juntos deles. Naturalmente, a mesma coisa acontece com o movimento da Terra, de maneira que todo o Universo parece rodar. (COPÉRNICO, 1984, p. 40)

Por fim, a discussão sobre a cosmologia medieval, cujo debate sobre a *infinitude do universo* e a *pluralidade dos mundos* tornou-se fundamental para ampliar a visão de mundo do pensamento científico europeu medieval e renascentista, no contexto histórico que antecedente o advento da astronomia copernicana, em meados do século XVI.

#### 8.2.4 A Discussão Sobre a Cosmologia Medieval

Nos antecedentes ao advento da astronomia copernicana, dois temas repudiados pela doutrina aristotélica estavam no centro das discussões filosóficas envolvendo a cosmologia medieval: o problema das grandezas infinitas e o da existência de vários universos (GRANT, 1969). Por conseguinte, sob a lente do problema conceitual externo do componente da visão de mundo, eles produziram uma forte tensão com as ideias aristotélicas, justamente, por estas negarem a possibilidade da existência de qualquer espaço (infinito ou não) além da esfera celeste. Posicionamento sustentado pelas teses aristotélicas da unicidade da Terra e do universo.

Com essas duas teses, Aristóteles defendia o seguinte: se fosse possível existir vários universos, eles deveriam ser semelhantes ao nosso, em natureza e composição básica de seus elementos constituintes (terra, água, ar, fogo e seus intermediários). Em razão disso, o que acontecesse no nosso universo deveria acontecer também nos outros universos existentes. Por exemplo, para o fogo que se movia para longe da Terra, e a terra que se movia para o centro do nosso universo, Aristóteles defendia que:

Então, a partícula de Terra em outro mundo mover-se-ia naturalmente também para o *nosso centro* e o fogo para *nostra circunferência*. Isto, contudo, é impossível, já que, se fosse verdade, a Terra devia, em seu próprio mundo, mover-se para cima e o

fogo para o centro; do mesmo modo, a Terra do nosso Mundo devia mover-se naturalmente para longe do centro, quando ela move-se para o centro de outro Universo. Isto resulta a suposta justaposição dos Mundos. Pois, ou nós devemos nos negar a admitir a natureza idêntica dos corpos simples em vários Universos, ou, admitindo isto, devemos fazer o centro e a extremidade como sugerido, e sendo assim segue que não pode haver mais do que um Mundo. (ARISTÓTELES, 1922, p. 279<sup>b</sup>, tradução própria)

Criticando essas duas teses de Aristóteles, Oresme abriu a discussão mais importante de sua época, questionando a lei do movimento natural aristotélica pela qual o elemento terra, por ser pesado, tenderia a ocupar o seu lugar natural, o centro do universo.

No conteúdo de seu questionamento, o lugar natural de um corpo não poderia ser determinado exclusivamente pela natureza de seu elemento constituinte, mas também pela posição relativa desse corpo em relação aos outros. Para Oresme, existindo a possibilidade de vários universos, poderia existir também, em cada um deles, uma Terra que podia se mover naturalmente para o centro do seu próprio universo. Isso não implicava dizer, por exemplo, que, nesse universo, uma parte da Terra não pudesse tender para um centro e outra parte para o outro centro. A principal implicação desse argumento de Oresme é que, não era a lei do movimento natural retilíneo de Aristóteles que impunha o lugar próprio dos corpos terrestres nem no nosso universo nem em outros (GRANT, 1969).

Já em relação à tese da unicidade do universo, Aristóteles defendia que era impossível existir um espaço (infinito ou não) além da esfera celeste, pois o céu era único e completo, logo não havia necessidade de existir, nem vazio nem tempo fora dele. Para Aristóteles, em todo lugar deveria estar presente um corpo, pois o vazio era algo no qual a presença de um corpo, embora não real, era possível – para Aristóteles, isso era uma concepção lógica impossível (GRANT, 1969).

Fazendo frente a essa defesa aristotélica da inexistência do vazio além da esfera celeste, destacam-se, aqui, os trabalhos de Nicolau Oresme e Nicolau de Cusa (1401-1464), porém existiram outros nomes importantes – Richard de Middleton (século XIV), Thomas Bradwardine (1290-1349), Johannes de Ripa (século XIV), Willian de Ockham (1280-1349), dentre outros (GRANT, 1969).

Abordando a defesa de Oresme, por exemplo, sabe-se que em conformidade com a fé cristã, para esse filósofo, não poderia haver espaço fora do céu, “mas era possível conceber que fora do céu pudesse haver um vazio, porque Deus podia criar um corpo ou um lugar nele” (GRANT, 1969, p. 48). Por essa fé, se perguntassem o que era o vazio fora do céu, era possível dizer que o vazio era o próprio Deus, em “sua própria imensidade indivisível e Sua

própria eternidade como um todo e todos em um” (Idem). Em conformidade, Nicolau de Cusa, ao refletir sobre a “relação entre Deus universo-infinito” (PEDUZZI, 2018a, p. 94) produziu uma nova concepção, qual seja, a de um universo extremamente vasto e sem limites de confinamento.

Em comparação com a concepção de universo autocontido de Aristóteles, de acordo com Cusa, embora:

[...] o mundo não seja infinito, não pode, porém, ser concebido como finito, uma vez que não possui limites entre os quais se confine. A Terra, por conseguinte, que não pode ser o centro, não pode carecer de todo movimento; mas é necessário que se mova de modo tal que pudesse ser movida infinitamente menos. Da mesma forma que a Terra não é o centro do mundo, também a esfera das estrelas não é sua circunferência, ainda que, se compararmos a Terra com o céu, a Terra pareça estar mais perto do centro, e o céu, da circunferência. (KOYRÉ, 2006, p. 247, em nota)

Diferente dos limites do universo imposto pela esfera das estrelas fixas na cosmologia aristotélica, na visão cosmológica de Cusa:

[...] o universo não é infinito no sentido positivo deste termo, mas indeterminado, o que significa apenas que ele não tem limites e que não está contido na carapaça exterior das esferas celestes; o que também quer dizer que ele não está “terminado” nos seus constituintes, ou seja, que ele carece completamente de precisão e de determinação rigorosa. Ele nunca atinge o seu limite; no sentido pleno do termo ele é indeterminado. É por isso que ele não pode ser objeto de uma ciência total e precisa, mas apenas de um conhecimento parcial e conjectural. (Koyré, 2006, p. 14, em nota).

Por ser um cardeal católico, Nicolau Cusa construiu uma relação Deus-universo-infinito, a partir de uma compreensão de que o infinito representa Deus, em sua grandeza e perfeição, e a verdade absoluta que está em Deus não está acessível ao homem. Porém, esse homem, “em sua tentativa de entender o mundo em que vive, tem consciência das limitações do seu saber” (PEDUZZI, 2018a, p. 94), isto é, de sua *douta ignorância*. *A Doutra Ignorância* (1440) foi também uma obra mestra de Cusa, cuja originalidade para a época medieval não se enquadra em nenhum quadro conceitual pré-estabelecido. Para a cosmologia, Cusa representou a afirmação de uma concepção de mundo que preconizava a unidade do universo, sem referência às hierarquias aristotélicas.

Nessa concepção de universo, Cusa evoca a relatividade do movimento, já presente nas discussões sobre a possibilidade da mobilidade da Terra, para afirmar que no universo não existem corpos imóveis, nem um referencial absoluto para qualquer movimento. Para o caso

da Terra, “a constatação de que tudo parece girar em torno dela, estacionária, é um dos aspectos dessa relatividade” (PEDUZZI, 2018a, p. 95).

Tomando a Lua ou outro astro celeste como referência, quem estivesse nesse referencial iria percebê-lo também como um centro imóvel, estando os demais astros girando em seu entorno. A principal implicação dessa relatividade é que não existe um centro fixo no universo, “pois em qualquer parte do cosmos em que o observador se encontre, ele verá o universo girar em torno de si” (Idem). No foco dessa visão cosmológica, a unicidade do universo não permitia qualquer distinção entre os elementos constituintes (terra, água, ar e fogo). Em razão disso, a Terra não ocupava um plano inferior aos demais astros, sendo tão imperfeita quanto perfeita.

Por conseguinte, Cusa concebe que a semelhança da Terra em relação aos demais corpos celestes materializa a potência criativa de Deus e a exuberância de sua obra representada nos infindáveis mundos espalhados no universo extremamente vasto. Nesse contexto, a possibilidade de existir vidas em outros corpos celestes, semelhantes às existentes na Terra, como preconizava os gregos antigos, dentre eles, Filolau, Demócrito e Anaxágoras, era uma constante do enaltecimento do Criador. Porém, o mais importante para o desenvolvimento da ciência é a concepção de universo aberto e ilimitado, em detrimento de um universo fechado e finito defendido pela cosmologia aristotélica, dominante no pensamento científico ocidental europeu, até Cusa, por cerca de 1700 anos.

Em relação a essa ideia, sabe-se que Copérnico não entrou na discussão sobre a infinitude ou finitude do universo. Apenas ele afirmou que o mais poderoso argumento em favor da ideia de que o mundo é finito é o movimento, uma vez que “segundo aquele axioma da física - o infinito não podia ser percorrido nem movido de forma alguma - o céu (se infinito) teria que permanecer imóvel” (COPÉRNICO, 1984, p. 40). Copérnico afirmara também que:

[...] eles diziam que fora do Céu não há corpo nem espaço vazio ou lugar - nada, numa palavra - e assim não existe nenhuma parte para onde o Céu possa desviar-se. Neste caso, é certamente espantoso que alguma coisa possa ser apenas limitada pelo nada. Mas se o Céu é infinito e apenas finito na sua cavidade interior, talvez se possa demonstrar melhor que nada existe fora do Céu, uma vez que todas as coisas estão dentro dele, seja qual for o espaço que ocupem, mas o Céu permanecerá imóvel. (COPÉRNICO, 1984, p. 40)

Cem anos depois de Nicolau de Cusa, suas ideias foram retomadas por Giordano Bruno (1548 - 1600), para fundamentar uma nova filosofia em oposição à escolástica, mas

pela qual foi julgado e condenado à morte pelo Tribunal da Inquisição. Retomando a ideia dos problemas conceituais externos do componente visão de mundo, essa tensão provocada pelas discussões da unicidade da Terra e da unicidade do universo, em relação à possibilidade da existência de outros mundos e a existência de espaço vazio e infinito além da esfera celeste, vai exercer uma profunda influência na *revolução científica* do século XVII, isto é, no nascimento da nova tradição de pesquisa europeia.

A solução dessa tensão está ligada fundamentalmente ao desenvolvimento da lei da inércia, para a qual o conceito de infinito é essencialmente pensado em termos de um movimento inercial no vácuo. Adjacente a isso, os temas sobre a *possibilidade do vácuo, do movimento no vácuo, a teoria da força motriz incorpórea, a teoria do impetus, a rotação diurna da Terra, a existência de mundos semelhantes a Terra e, a existência de um espaço infinito além da esfera celeste*, mostram que uma atividade intelectual muito ativa já estava no foco do pensamento científico-filosófico europeu medieval, contradizendo a falácia histórica de que a Europa tenha vivido “uma noite longa e tenebrosa de mil anos” em relação à baixa produtividade científica. Embora não existam evidências claras da ligação direta da influência dos trabalhos de Buridan e Oresme sobre Copérnico, os críticos escolásticos criaram um estado de opiniões muito bem fundamentado. Por exemplo, sobre a possibilidade do movimento da Terra, que, sem dúvidas, por fazer parte dos temas de discussão nas universidades europeias medievais, prepararam o caminho e deram confiança para Copérnico propor uma reforma na astronomia. Nessa direção, no próximo capítulo 9 procura-se abordar os fatores externos – a escola de pensamento neoplatônica – e internos – os problemas conceituais da astronomia ptolomaica – que impulsionaram o advento da astronomia copernicana e suas implicações científicas, filosóficas, metafísicas e religiosas.

## 9 O ADVENTO DA ASTRONOMIA COPERNICANA SOB A LENTE DA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS

No capítulo anterior, as discussões sobre os fatores externos e internos à ciência implicaram no próprio desenvolvimento da astronomia e da cosmologia, e da física, no período medieval que separa Ptolomeu de Copérnico. Os debates travados nesse contexto histórico permitiram observar a existência de uma calorosa atividade intelectual, fomentada principalmente pelos argumentos a favor e contra as ideias e conceitos aristotélicos, especialmente, sobre a *imobilidade da Terra, a infinitude e unicidade do universo, e a sua dinâmica de forças*. Sob a lente desses debates, é possível afirmar que o advento da astronomia copernicana é tanto um resultado integrante desse contexto quanto uma consequência especial do crescimento científico cognitivo em direção a uma nova tradição de pesquisa e visão de mundo, que a sociedade europeia começou a experimentar nesse período histórico.

Como observado no final do capítulo anterior, neste, os objetivos perpassam por: discutir como os fatores externos e internos à astronomia, à cosmologia e a física, motivaram Copérnico a propor uma importante reforma astronômica em seu tempo. Inicialmente, aborda-se a influência da filosofia neoplatônica, expressada pela *Escola de Pensamento Neoplatônico* e pelo significado metafísico do *Culto ao Sol*, nos finais da Idade Média, que se tornou um dos principais fatores responsáveis pela mudança no estilo de pensamento científico europeu. Em seguida, o advento da astronomia copernicana na perspectiva da solução dos problemas empíricos e dos problemas conceituais, destacando os principais aspectos das explicações de Copérnico e dos novos problemas que o seu sistema astronômico fomentou.

### 9.1 A INFLUÊNCIA FILOSÓFICA DA ESCOLA DE PENSAMENTO NEOPLATÔNICO

A influência da escola de pensamento neoplatônica sobre o advento da astronomia copernicana, juntamente com papel metafísico do culto ao Sol, próxima seção, no contexto renascentista europeu, novamente fortalece o vínculo epistemológico criado no capítulo 8 anterior, especialmente, nos componentes culturais e filosóficos – como um aspecto, característica, princípio da natureza da ciência, “as concepções filosóficas, religiosas, culturais, sociais, em que a ciência é desenvolvida influenciam profundamente o trabalho dos investigadores desde tempos remotos” (PEDUZZI; RAICIK, 2020, p. 30).

Observado esse ponto importante, nos finais da Idade Média, Copérnico, seus professores e colegas universitários passaram a comungar das ideias da *escola de pensamento neoplatônico*, considerada um dos elementos culturais e filosóficos mais importantes do movimento renascentista (BERTRAND, 2008). Sobre as reflexões disseminadas por essa *Escola*, destacam-se algumas que representam a forma como seus adeptos pensavam sobre o mundo. Para esses pensadores de orientação neoplatônica:

[...] formas e ideias eternas existiam inteiramente à parte de qualquer objeto material. A mente humana era uma dessas essências eternas e tinha sido formada para conhecer outras, se existissem. No processo do conhecimento, os órgãos dos sentidos fornecem meramente um estímulo, impelindo a mente a compreender as formas universais. Uma importante classe de tais formas universais eram as matemáticas. (CROMBIE, 1953, p. 33)

Observando o poder da matemática, como instrumento de compreensão do mundo, sua utilização tem como objetivo, então, explicar o universo eterno das formas e das ideias nesse mundo terrestre, transitório e imperfeito. Ideias essas, que se constituem em arquétipos, modelos e exemplares eternos das coisas transitórias que escapam do mundo terreno (KOYRÉ, 2006). Esse pensamento filosófico está alinhado, desde sua raiz, com a cosmovisão pitagórica, na qual o universo era visto pela perspectiva geométrica, na qual o mundo terrestre é concebido como uma sombra de um mundo eterno, isto é, o mundo da matemática.

Nessa cosmovisão pitagórica, o universo tinha como estrutura básica dois elementos principais: a harmonia mística dos números e/ou os arranjos geométricos para as unidades de espaço. Os números e os esquemas de relações de números, por exemplo, como figuras geométricas (esfera, quadrado, triângulo, retângulo, dodecaedro, hexaedro), tinham o poder de fornecer a estrutura última do universo pitagórico. Em outras palavras, “quanto mais simples a relação, mais pura ela seria matematicamente e, portanto, mais perfeita e mais próxima à natureza” (ÉVORA, 1993, p. 14).

Essa concepção de que a natureza pode ser matematizada tornou-se parte estrutural da filosofia neoplatônica. Na Idade Média, ela forneceu uma das principais contribuições para o desenvolvimento da ciência, isto é, “a extensão das matemáticas a toda a ciência física, ao menos em princípio” (CROMBIE, 1953, p. 118). Isso garantiu não somente uma oposição à restrição aristotélica, que distinguia nitidamente as funções explicativas das matemáticas e físicas – divisão assinalada anteriormente no contexto da tradição de pesquisa grega antiga, mediante o trabalho de Ptolomeu, como também pela existência do “método aristotélico lógico-verbal de investigação” (JAMMER, 2010, p. 273).

A *escola de pensamento neoplatônica* permitiu, por um lado, eliminar essa distinção entre as funções explicativas da filosofia natural (física) e da matemática e, por outro, contribuiu para que a matemática se tornasse um *aporte intelectual estruturante* muito poderoso para a produção de conhecimentos astronômicos, cosmológicos e físicos.

No ponto máximo dessa influência filosófica neoplatônica, o que se pode observar, a partir do trabalho de Copérnico, são alguns aspectos importantes: (i) uma efetiva preocupação com a realidade das entidades matemáticas das teorias astronômicas, cosmológicas e físicas; (ii) um possível início de mudança nos compromissos metodológicos e ontológicos na abordagem dos problemas empíricos e dos problemas conceituais; e com essa mudança (iii), a construção de uma nova ontologia, que sustentará os conceitos, leis e princípios científicos, alinhando-se a novos e/ou velhos pressupostos filosóficos, matemáticos e metafísicos, sobre a natureza e o universo, no contexto de uma nova tradição de pesquisa que começa a florescer com o advento da astronomia copernicana.

É importante observar que na tradição de pesquisa grega antiga, a astronomia matemática de orientação teórica puramente descritiva, não tinha preocupação com a causa física do movimento dos corpos celestes. Já na nova tradição de pesquisa europeia nascente, pelo contrário, a nova astronomia desenvolvida por Kepler terá uma preocupação explícita acerca desse ponto.

Nesse sentido, é possível afirmar que essa nova tradição de pesquisa irá proporcionar novas diretrizes metodológicas e ontológicas, para solucionar os problemas astronômicos, cosmológicos e físicos, mediante uma abordagem dinâmica causal, em detrimento da abordagem cinemática descritiva. Ao mirar nessa abordagem dinâmica, o crescimento científico cognitivo vai se materializar na construção de novos aportes: conceitos de força, de matéria, de movimento, repouso, leis de movimento dos corpos terrestres e celestes, etc., cuja síntese final será realizada por ninguém menos que Isaac Newton. Sem pretensões reducionistas, essa possibilidade da mudança da tradição de pesquisa grega antiga para a europeia renascentista, proporcionada pela escola de pensamento neoplatônica, permite compreender um dos significados da expressão máxima do *Renascimento científico*.

Nessa direção, a influência neoplatônica sobre o advento da astronomia copernicana esteve refletida pela ideia de *simplicidade e de harmonia pitagórica*, que Copérnico utilizou para propor sua reforma astronômica. Contudo, isso não implica na ideia de que sua proposta era mais simples do que a astronomia de Ptolomeu. Como já observado, anteriormente, por exemplo, em termos dos mecanismos epiciclos utilizados para explicar o movimento de

longitude do Sol, da Lua e dos planetas, Copérnico requereu 18 círculos, em comparação aos 15 requeridos por Ptolomeu (GINGERICH, 2008). Portanto, esse é mais um aspecto que demonstra a ingenuidade acerca da ideia de simplicidade da astronomia copernicana, veiculada por alguns livros didáticos de física, como fator de sua aceitação, em detrimento da astronomia ptolomaica. Com essa ingenuidade superada, a *simplicidade* e a *harmonia*, como pressupostos metafísicos pitagóricos, levaram Copérnico a sistematizar suas explicações dos movimentos planetários em um único esquema astronômico. E esta sistematização é que representa a ideia da expressão, *sistema copernicano* (TOSSATO, 2004).

No início do seu livro, *De Revolutionibus – A Revolução dos Orbes Celestes –*, especialmente, na carta-prefácio endereçada ao Papa Paulo III, encontra-se a evidência da influência desses dois pressupostos metafísicos no pensamento de Copérnico, quando ele próprio afirmou:

Eles [os ptolomaicos] nem têm sido capazes de distinguir nem reproduzir a coisa principal - a saber, a forma do Universo e a simetria fixa de suas partes. Com eles é como se um artista reunisse mãos, pés, cabeça e outros membros na imagem de diversos modelos, cada parte muitíssimo bem desenhada, mas sem relação com o mesmo corpo. Uma vez que elas não se adaptam umas às outras de forma alguma, o resultado seria antes um monstro que um homem. (COPÉRNICO, 1984, p. 8)

Observando essa passagem com a lente dos *problemas conceituais internos*, o monstro que Copérnico sinalizou correspondia à falta de harmonia e de simplicidade das explicações de Ptolomeu, por serem apresentadas de maneira individualizadas. Na visão de Copérnico, a utilização do *equante* nas teorias planetárias ptolomaicas era uma clara oposição “aos princípios fundamentais acerca da regularidade do movimento” (Ibid., p. 8), que era defendida pelos pitagóricos e por Platão. Essa crítica reforçava a ideia de que somente uma perspectiva neoplatônica seria capaz de enxergar, na falta de harmonia e na introdução do *equante*, a geração de um monstro metafórico denunciado por Copérnico.

Isto porque, apenas os olhos platônico-pitagóricos consideram “o semelhante infinitamente mais belo que o dessemelhante”; apenas o sentido neoplatônico de beleza e harmonia poderia privilegiar os movimentos regulares e simétricos em detrimento dos movimentos não uniformes e assimétricos. (ÉVORA, 1993, p. 117-118)

Para essas ideias de simetria e ligação harmoniosa da matemática entre movimento e magnitude das esferas, sabe-se atualmente que:

[...] cada um dos argumentos [empregados por Copérnico para tentar persuadir seus contemporâneos da validade de seu novo enfoque], se refere a um aspecto das aparências que pode ser explicado tanto pelo sistema de Copérnico como pelas teorias de Ptolomeu, tentando mostrar em todos e cada um dos casos, quanto mais harmonioso, coerente e natural é a explicação copernicana. O número dos tais argumentos é elevado e a soma de provas em favor da harmonia é, antes de tudo, impressionante.

[...] Os argumentos de Copérnico não são pragmáticos. Não apelam para o sentido utilitário de quem pratica a astronomia, senão única e exclusivamente para o seu sentido estético. [...] Eles não chamaram a atenção do astrônomo de forma especial, pois as harmonias sobre as quais fincava o pé de Copérnico não lhes permitiam efetuar melhor o seu trabalho. As novas harmonias não aumentavam nem a precisão nem a simplicidade. Assim, pois, podiam atrair essencialmente (e assim o fizeram) a este grupo limitado e, talvez um pouco irracional, que se ocupava da astronomia matemática e cujo neoplatônico interesse pelas harmonias matemáticas não podia ver-se obstruído por páginas e mais páginas de complexas matemáticas, que finalmente conduziam as previsões numéricas apenas um pouco melhores do que as que haviam conhecido até então. (KUHN, 1990, p. 180)

A adoção da astronomia copernicana, no primeiro momento do nascimento da tradição de pesquisa europeia, foi claramente influenciada pelo neoplatonismo, corrente filosófica que fecundou o pensamento científico astronômico, cosmológico e físico, no contexto do Renascimento Científico. Nesse momento, pode se dizer, então, que a opção por seu sistema tem caráter muito mais estético do que objetivo – Kuhn chega a usar o termo *irracional*, por isso, “a preferência seria objetiva somente se houvesse razões “objetivas” para o platonismo contra o aristotelismo” (FEYERABEND, 1985, p. 5, *apud* ÉVORA, 1993, p. 118). Atrelado a essas influências filosóficas neoplatônicas, na próxima seção, o *fator extra científico* neoplatônico de *culto ao Sol*, substantivou ainda mais essas influências filosóficas sobre o advento da astronomia copernicana.

## 9.2 A INFLUÊNCIA METAFÍSICA NEOPLATÔNICA DE CULTO AO SOL

A segunda influência neoplatônica, isto é, de cunho metafísico sobre Copérnico, correspondeu à ideia de *culto ao Sol*. Esta ideia permitiu a Copérnico romper com a visão de mundo geocêntrica, postulando que no lugar da Terra devia estar o Sol. Por sua vez, esse rompimento cognitivo aparece explicitamente nas primeiras três exigências, dos sete postulados encontrados em sua pequena obra *Commentariolus*. Esta obra foi escrita para sintetizar qualitativamente e fazer circular em um grupo pequeno de astrônomos, as principais ideias astronômicas que seriam publicadas, mais tarde, no extenso livro *De Revolutionibus Orbis Coelestium*.

Na primeira exigência de Copérnico, *não existe um centro único de todos os orbes celestes ou esferas* (COPÉRNICO, 1990, p. 103), o que implica na negação da existência de esferas homocêntricas, cujo centro comum fosse a Terra. Na segunda exigência, o *centro da Terra não é o centro do mundo, mas apenas o da gravidade e do orbe lunar* (Idem). Por essa exigência, Copérnico abandonou a visão geocêntrica, ao destronar a Terra do centro do universo, associando a ela o status apenas de centro da gravidade e da órbita da Lua. Claramente, essa suposição tornou-se uma afronta cognitiva às ideias dos aristotélicos, que acreditavam na lei do movimento natural e na explicação de que os corpos pesados tendiam para o centro geométrico do universo, coincidentemente com o mesmo centro da Terra.

Por ter postulado essas exigências, Copérnico precisou substituir a teoria dos movimentos naturais por outra que explicasse a queda dos corpos. Sem necessariamente ter feito isso, ele explicou que os corpos caem em direção a Terra, independentemente de sua localidade. Nesse sentido, o seu argumento foi de que: “É de se crer que esta tendência exista também no Sol e na Lua, assim como nos outros planetas, para que por seu efeito, eles possam conservar a forma esférica com que se apresentam” (COPÉRNICO, 1990, p. 145). Por isso, “a motivação para rejeitar a hipótese geocêntrica era metafísica. Nenhuma descoberta astronômica fundamental, nenhuma espécie nova de observação astronômica, persuadiu Copérnico da imperfeição da antiga astronomia ou da necessidade de uma mudança” (KUHN, 1990, p. 157).

Outro aspecto novo introduzido por essa exigência, para a época, diz respeito ao fato de que quase todos os astros giram em torno do Sol, mas a Lua gira em torno da Terra. Algo um tanto estranho, pois satélites orbitando outros planetas só seriam conhecidos a partir das observações telescópicas de Galileu, a partir de 1609. Portanto, para um questionamento desta natureza, “se Copérnico estava identificando a Terra como um planeta, por que motivo só ela possuía outro “planeta” girando a seu redor?” (MARTINS Roberto, 1990, p. 104).

Na terceira exigência copernicana, *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* (COPÉRNICO, 1990, p. 157). Destaca-se que, Copérnico não colocou o Sol exatamente no centro do seu sistema astronômico. Ele apenas achou conveniente utilizar círculos excêntricos para satisfazer à explicação dos fenômenos, em termos de movimentos circulares uniformes, excluindo a necessidade do *artificio matemático equante* de Ptolomeu. Esse artifício permitiu que o sistema copernicano fosse chamado de sistema astronômico *heliostático*, ao invés de *heliocêntrico* (MARTINS Roberto, 1990).

Em última instância, essa terceira exigência tornou-se uma premissa metafísica, porque Copérnico não justificou o motivo de colocar o Sol parado em uma localização quase central no seu sistema astronômico. Isso fica evidente quando ele discutiu a posição do Sol no universo, ao tecer a indagação: “Ora, quem haveria de colocar neste templo, belo entre os mais belos, tal luzeiro em qualquer outro lugar melhor do que naquele onde é possível iluminar todas as coisas ao mesmo tempo?” (COPÉRNICO, 1984, p. 52). Refletindo sobre isso, ele afirmou o seguinte:

Na verdade não é sem razão que o Sol foi chamado por alguns de farol do mundo e por outros de seu Espírito, chegando alguns a chamar-lhe o seu governador. Hermes Trismegisto 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 sua volta. [...] A Terra é fecundada pelo Sol resultando um parto anual. Nós verificamos, portanto, nesta ordenação, a maravilhosa simetria do Universo assim como uma segura união harmoniosa do movimento e da grandeza das esferas que não se pode verificar em qualquer outra circunstância. (COPÉRNICO, 1984, p. 52-53)

Para Copérnico, “certamente nenhuma posição inferior no espaço ou no tempo podia ser compatível com a dignidade do Sol e com sua função criativa” (KUHN, 1990, p. 155). Sem dúvidas, suas fontes motivacionais externos à ciência foram realmente de naturezas neoplatônicas. Para dimensionar um pouco mais essa influência, posteriormente, em defesa do sistema astronômico copernicano, Galileu escreve sobre a “nobreza do Sol”, dizendo que esse astro era: “Ministro máximo da Natureza e, de certo modo, alma e coração do mundo, que infunde outros corpos que o circundam não só com luz, mas também com movimento, ao girar sobre si mesmo” (NASCIMENTO, 1983, p. 121). Sobre essa mesma influência neoplatônica, Johannes Kepler também afirmou que:

Em primeiro lugar, a menos que talvez um cego possa negá-lo perante ti, dentre todos os corpos do Universo, o mais notável é o Sol, cuja essência integral nada mais é que a mais pura das luzes [...], a fonte da visão, pintor de todas as cores [...], denominado rei dos planetas [...], coração do mundo [...], olho do mundo; por sua beleza, é o único que podemos considerar merecedor do Deus Altíssimo [...] Pois se os germânicos elegem como César o que tem o poder máximo em todo o império, quem hesitaria em conferir votos dos movimentos celestes àquele que já vem administrando todos os demais movimentos e mudanças por graça da luz, que é a sua posse exclusiva? [...] Nenhuma parte do mundo e nenhuma estrela é merecedora de tão grande honra; então, pelas razões mais elevadas, voltamos ao Sol, o único que parece, em virtude de sua dignidade e poder, adequado a essa missão motora, é digno de tornar-se a morada do próprio Deus. (BURT, 2003, p. 45-46, tradução própria)

Diante desses argumentos de Kepler, a pertinência influenciadora desses fatores filosóficos e metafísicos torna-se ainda mais evidentes, como fontes motivacionais que guiaram Copérnico no seu trabalho astronômico. Pode-se afirmar que a inovação proporcionada pelo sistema astronômico copernicano não nasceu da observação de novos fatos, nem da falta de explicação de fatos antigos, mas de uma nova interpretação de fatos bastante conhecidos pelos astrônomos do século XV (ÉVORA, 1993).

Copérnico “foi um supremo exemplo de um homem que revolucionou a ciência ao olhar fatos velhos de um novo modo, basicamente neoplatônico” (CROMBIE, 1953, p. 175). Portanto, sua inovação astronômica foi influenciada por *fatores interno e externos* a ciência. Estes foram abraçados por Copérnico e todos que tornaram o *Renascimento Científico* um marco histórico expressivo do avanço cognitivo do pensamento astronômico, cosmológico e físico, na direção do nascimento de uma nova tradição de pesquisa europeia.

Por outro lado, embora essas influências estivessem presentes no contexto da astronomia copernicana, ainda sim, é bem difícil compreender os motivos mais pessoais que guiaram o pensamento de Copérnico (KOYRÉ, 2006). Para Alexandre Koyré, por exemplo, a principal razão é porque, nos meandros mais técnicos da reforma da astronomia, houve um motivo físico, isto é, a impossibilidade de uma explicação mecânica da astronomia matemática. Por isso, Koyré (2006) conclui que, se nos guiarmos pelo que o próprio Copérnico nos diz a respeito da forma como ele chegou a seu sistema, certamente, não chegaremos à sua astronomia, mas sim a uma astronomia no gênero da que Tycho Brahe desenvolveu, a qual, aliás, deveria logicamente se colocar entre Ptolomeu e Copérnico, e não depois deste último. Por fim, Koyré (2006) considera que o episódio da astronomia copernicana foi muito importante, pois:

[...] nos mostra que a história do pensamento científico não é inteiramente lógica. Assim, para compreender a evolução, é mister levar em conta fatores extra lógicos. Dessa forma, uma das razões – provavelmente a mais profunda – da grande reforma astronômica operada por Copérnico não era absolutamente científica. De minha parte, penso que se Copérnico não se deteve no estágio de Tycho Brahe – admitindo que ele tenha tido essa intenção – foi por uma razão estética, ou de metafísica, por consideração de harmonias. Sendo o Sol a fonte de luz, e sendo a luz o que há de mais belo e de melhor no mundo, parecer-lhe-ia de acordo com a razão que governa o mundo e que o cria, essa luminária deveria ser colocada no centro do Universo, que ela está encarregada de iluminar. Copérnico o diz expressamente e creio que não há razão alguma para não acreditar na adoração que tinha pelo Sol; tanto mais que o grande astrônomo Kepler, que verdadeiramente inaugura a astronomia moderna, é ainda mais heliótra do que Copérnico. (KOYRÉ, 2006, p. 95)

Certamente, essa ponderação de Koyré evidencia que, mesmo existindo um forte motivo interno de natureza física – explicação mecânica da astronomia matemática –, os fatores filosóficos e metafísicos acentuaram a reforma astronômica copernicana. Por conseguinte, é preciso discutir, nesse âmbito interno, quais foram os *problemas conceituais* que também contribuíram para impulsionar o trabalho de Copérnico.

### 9.3 OS PROBLEMAS CONCEITUAIS NO CONTEXTO DE COPÉRNICO

No contexto Copérnico, devido à consistência e a coerência interna das teorias astronômicas ptolomaicas na explicação de todos os problemas empíricos da tradição de pesquisa grega antiga, os novos astrônomos europeus preocuparam-se em aumentar o número dos artifícios geométricos dessas teorias (epiciclos, excêntricos e equantes). Conseqüentemente, esse crescente aumento produziu os principais problemas conceituais internos à astronomia dessa época. Por exemplo, conta-se em uma história apócrifa antiga, que:

Alfonso, o Grande, ao olhar por cima dos ombros de seus astrônomos, os quais estavam compilando as Tabelas Alfonsinas, comentou que, se ele estivesse vivo na época da Criação, poderia ter dado ao Bom Deus algumas dicas. A interpretação óbvia era de que os astrônomos do rei Alfonso, no intuito de cuidar das discrepâncias observadas entre as previsões ptolomaicas e a posição real dos planetas, tinham sido obrigados a acrescentar mais círculos [...]. (GINGERICH, 2008, p. 81)

Esse acréscimo no número de artifícios implicava em uma prática astronômica cada vez mais complexa, cobrando o ônus metodológico acerca da ideia de “salvar os fenômenos”. No foco dessa complexidade, as teorias planetárias ptolomaicas sofriam de pequenas *inexatidões e confusões*, cujas implicações se desdobravam em problemas de precisão das *Tabelas Alfonsinas* e, conseqüentemente, na construção de calendários confiáveis (KUHN, 1990).

Essa inconsistência interna das tabelas contribuiu para evidenciar um problema técnico latente, cuja solução apropriada deveria ser encontrada o mais breve possível. E pela primeira vez,

[...] um astrônomo tecnicamente competente [Copérnico] havia se oposto à tradição científica consagrada por razões intrínsecas a seu campo de estudo, e este reconhecimento profissional pela solução de um erro técnico, inaugurava a

revolução copernicana. Essa necessidade se encontrava na raiz do trabalho de Copérnico, mas era de um tipo completamente novo. (KUHN, 1990, p. 138)

A solução dessas inconsistências técnicas das *Tabelas Alfonsinas* foi apresentada por Copérnico, no ano de 1500, em dezesseis folhas extras, acrescentadas em uma cópia original do *De Revolutionibus Orbis Coelestium*. Em uma dessas folhas, estão os dados referentes às previsões de Marte e Saturno, para os quais Copérnico registrou que: “Marte ultrapassa os números em mais de dois graus. Saturno é ultrapassado pelos números por um grau e meio” (GINGERICH, 2008, p. 84). A principal implicação dessas anotações residiu no fato de que:

Em 1504, logo após Copérnico ter retornado à Polônia, depois de sua estadia na Itália, com seu recém-adquirido doutorado, os dois planetas lentos a olho nu armaram um espetáculo esplêndido quando o mais veloz Júpiter ultrapassou o menos veloz Saturno. Essa grande conjunção, que ocorre apenas a cada vinte anos, proporcionou um teste sensível das tabelas, uma vez que não foram necessários instrumentos elaborados para determinar em qual noite os planetas iriam passar um pelo outro. E dessa vez Marte se juntou ao balé. Entre outubro de 1503 e março de 1504, o mais veloz Marte passou por Júpiter e depois por Saturno, e, por fim em movimento retrógrado, passou de volta por Saturno e Júpiter e, por fim, em movimento direto, ultrapassou mais uma vez Júpiter e Saturno. Foi uma grande exibição celeste, e com certeza Copérnico não a teria perdido. (GINGERICH, 2008, p. 84)

Como especialista nos estudos de Copérnico, Otto Gingerich compilou as *Tabelas Alfonsinas* em programas de computador, na forma que essas tabelas posicionavam esses planetas, não apenas nesse período, mas também por várias décadas do século XVI. Em seus resultados, os cálculos indicaram apenas um erro de assinatura de Copérnico, para fevereiro e março de 1504. Durante esse intervalo, as previsões para Júpiter foram excelentes, mas Saturno ficou atrás das tabelas por um grau e meio, enquanto Marte ficou à frente das previsões por quase dois graus. De fato, os erros combinaram com as anotações de Copérnico, apenas nesse intervalo, logo, a evidência comprovou que ele tinha observado a “dança cósmica” nesse período e estava perfeitamente ciente das discrepâncias nas tabelas (GINGERICH, 2008).

Frente a esses problemas técnicos das *Tabelas Alfonsinas*, no prefácio do *De Revolutionibus Orbis Coelestium*, dedicado ao Papa Paulo III, Copérnico demonstrou suas preocupações com os problemas conceituais internos da astronomia, afirmando o seguinte:

Não quero que Vossa Santidade ignore que nenhum outro motivo me levou a pensar num método diferente de calcular os movimentos das esferas do Universo, senão o fato de ter verificado que os matemáticos não estão de acordo entre si na

investigação de tais movimentos. E que, em primeiro lugar, eles se encontram de tal maneira inseguros quanto ao movimento do Sol e da Lua que, nem a duração regular do ano corrente, são capazes de explicar e formular. Em segundo lugar, ao determinarem os movimentos das esferas do Universo e dos cinco planetas, não usam os mesmos princípios e premissas que nas demonstrações dos movimentos e revoluções aparentes. Pois enquanto alguns empregam somente círculos concêntricos, outros se utilizam de círculos excêntricos e de epiciclos, porém eles não atingem completamente seus objetivos. Pois embora aqueles que se baseiam nos círculos concêntricos demonstrem que alguns movimentos não uniformes poderiam ser, a partir deles, estabelecidos, eles não foram capazes de obter, por este meio, qualquer resultado, indiscutível, que estivesse em concordância absoluta com os fenômenos. Por outro lado, aqueles que imaginaram os excêntricos, embora pareçam, em grande parte, ter resolvido o problema dos movimentos aparentes com cálculos apropriados, introduziram, no entanto, muitas ideias que parecem contradizer os princípios fundamentais acerca da uniformidade do movimento.

Essas preocupações de Copérnico apontavam para um problema conceitual interno de *inconsistência* que estava presente nas teorias planetárias de Ptolomeu. Segundo Copérnico (1984, p. 7), os astrônomos “não foram capazes de obter, por este meio (uso de círculos concêntricos), qualquer resultado, indiscutível, que estivesse em concordância absoluta com os fenômenos”. Nessa perspectiva, o uso do *equante*, por exemplo, inseria no céu um movimento não uniforme, que violava a premissa platônica da regularidade dos movimentos. Portanto, esse foi o ponto central de sua crítica conceitual às teorias planetárias ptolomaicas.

Além desse problema conceitual interno, o problema empírico do *fenômeno da precessão dos equinócios* também foi solucionado por Copérnico, no contexto em que seu velho amigo e colega de faculdade, o reverendo e cartógrafo polonês Bernard Wapowski (1450 - 1535), pediu sua opinião sobre um pequeno tratado escrito pelo clérigo e astrônomo Johann Werner de Nuremberg (1468 - 1522), publicado em 1522, versando sobre *De motu Octave Sphaerae – O Movimento da Oitava Esfera* (SOBEL, 2015).

Ao responder seu amigo Bernard, Copérnico considerou que suas críticas ao tratado poderiam contribuir para melhorar a compreensão desse problema – que corresponde ao movimento lento das estrelas de leste para oeste do ponto do equinócio, isto é, a intersecção entre a eclíptica e o equador.

Em termos modernos, a precessão é produto da rotação diária da Terra, que resulta num planeta bojudado no Equador. O Sol atua sobre o plano do bojo equatorial, fazendo com que o eixo da Terra gire lentamente com o tempo. São necessários 26 mil anos para o eixo traçar seu preguiçoso círculo no céu, ao ritmo de um grau a cada 72 anos. O polo Norte do eixo da Terra atualmente aponta para uma estrela na Ursa Menor, chamada Polares ou estrela Polar, também conhecida como estrela do Norte. A precessão nos levou a esse ponto, e também garante que no próximo milênio uma estrela diferente - Alrai, na constelação de Cefeu, o rei - irá assumir o título de estrela Polar. (SOBEL, 2015, p. 77)

Copérnico solucionou esse problema, dotando a Terra de um terceiro movimento em inclinação, conjuntamente ao movimento de rotação axial e o movimento anual (translação) ao longo da eclíptica e ao redor do Sol. Segundo Gingerich (1975, p. 9), a abordagem desse problema por Copérnico “demonstra seu nível incomum de habilidade técnica, que certamente era raro na Idade Média”.

Em razão disso, o que se constituía um problema empírico anômalo para a astronomia de Ptolomeu, tornou-se um problema resolvido pelo sistema astronômico copernicano. Com essa solução, Gingerich (1975; 2008) afirma que o exame de Copérnico da precessão dos equinócios, pode tê-lo levado a considerar o movimento da Terra. Porém, não se pode afirmar que o sistema astronômico heliocêntrico foi uma consequência necessária da observação da precessão dos equinócios. Isso porque, mesmo tendo proposto a solução para esse problema empírico, bem como ter resolvido às inconsistências técnicas das *Tabelas Alfonsinas*, o sistema copernicano não ficou imune às críticas de naturezas empíricas e conceituais lançadas pelos seus opositores, os eruditos adeptos as ideias aristotélicas.

Em face desses fatores externo e internos a astronomia renascentista, nas próximas seções, serão apresentados: (i) os principais aspectos do sistema astronômico copernicano; e (ii) suas explicações para os problemas empíricos da tradição de pesquisa grega antiga, mediante o sistema astronômico unificado, que excluiu o artifício *equante* utilizado por Ptolomeu.

#### 9.4 O SISTEMA COPERNICANO E UMA NOVA SOLUÇÃO DOS PROBLEMAS EMPÍRICOS DA TPGA

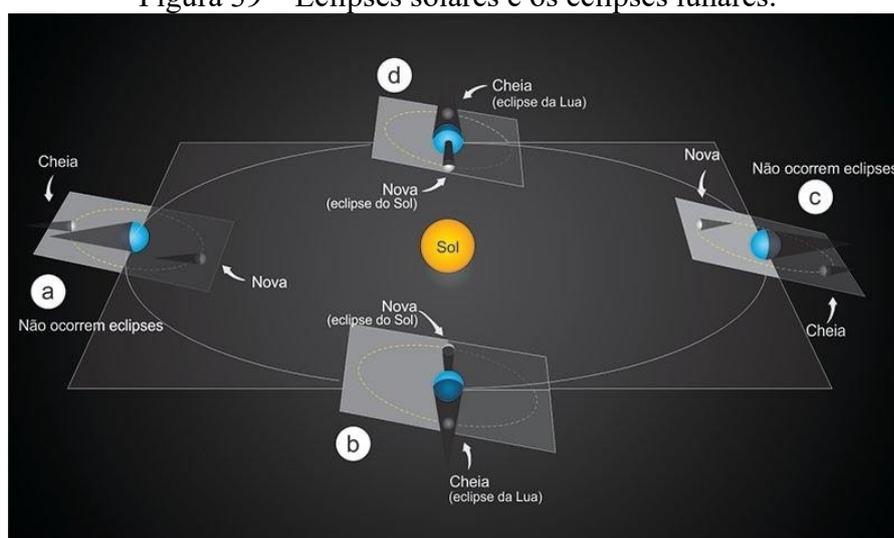
Em conformidade com a tradição de pesquisa grega, para Copérnico, o universo é esférico e finito e autocontido. E, assim como os pitagóricos, em seu sistema astronômico, a esfera é a forma mais perfeita, de maior volume e capacidade de encerrar e conservar todas as coisas. Para Copérnico, as partes mais perfeitas do universo se apresentavam como esféricas (o Sol, a Lua e os planetas). E até mesmo todo o universo tendia, por essa forma, a ser delimitado, por exemplo, no “que se vê nas gotas de água e nos outros corpos líquidos quando revestem a sua forma natural” (COPÉRNICO, 1984, p. 17). Por isso, segundo ele, “ninguém deverá hesitar em atribuir tal forma aos corpos celestes” (Idem), pois, de maneira semelhante

a esses corpos, a Terra também é esférica. Com argumentos parecidos aos dos gregos antigos, Copérnico afirmou que:

[...] isto é fato manifesto porque [...] se vê que muitas estrelas à volta do Polo Norte não têm ocaso e que, no Polo Sul, algumas nunca nascem. Assim a Canopo não é visível na Itália, sendo visível no Egito. Mas a Itália vê a mais afastada estrela do Rio, a qual a nossa região, numa zona frígida, ignora. Pelo contrário, para aqueles que viajam para o Sul, estes dois astros são visíveis enquanto que são invisíveis aos que nós vemos. (COPÉRNICO, 1984, p. 19)

Em outro exemplo, Copérnico argumentou que as observações dos eclipses também levavam à conclusão da esfericidade da Terra: “os eclipses vespertinos do Sol e da Lua não são visíveis para os habitantes do Oriente, nem os matutinos para os habitantes do Ocidente, mas os que estão na zona média veem-nos aqueles mais tarde e estes mais cedo” (COPÉRNICO, 1984, p. 19). Em outro argumento, ele disse: “as águas repousam na mesma forma, é o que os navegadores depreendem. Portanto, a Terra, que não se avista do lastro do navio, é geralmente avistada do topo do mastro” (Idem). “Por outro lado, se fixarmos uma luz no topo do mastro, os que estão na praia veem-na descer lentamente, enquanto o navio se afasta da Terra, até que finalmente se oculta como se tivesse o seu ocaso no horizonte” (Ibid., p. 20). Aproveitando essa argumentação de Copérnico, as primeiras novas soluções para os problemas empíricos da tradição de pesquisa grega antiga começam com os problemas empíricos dos eclipses e das fases da Lua (Figura 39).

Figura 39 – Eclipses solares e os eclipses lunares.



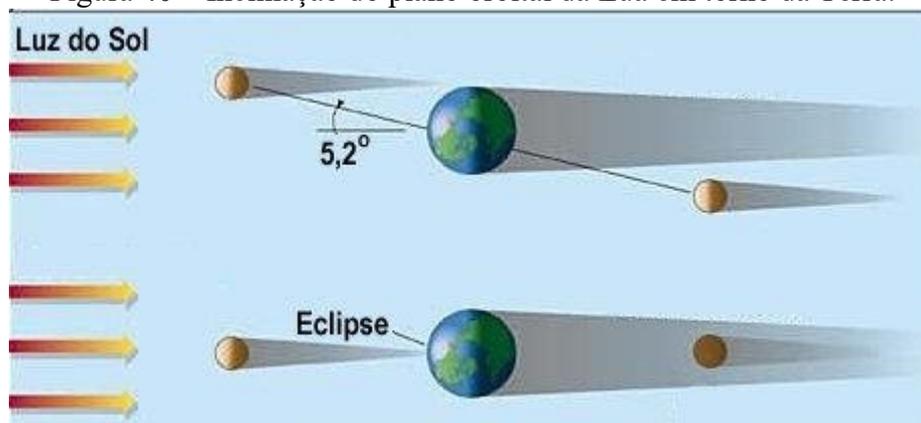
Fonte: Oliveira Filho e Saraiva (2018, p. 1).

Na Figura 39, os eclipses acontecem sempre que um corpo entra na sombra de outro. Para o caso de um eclipse lunar, a Lua entra na sombra da Terra, e para um eclipse solar, a Terra é atingida pela sombra da Lua. Nesse sentido, observa-se que os eclipses solares e lunares ocorrem, respectivamente, na Lua nova e Lua cheia (pontos b e d), obedecendo aos alinhamentos Sol-Lua-Terra e Sol-Terra-Lua.

Outro aspecto importante, é que o plano orbital da Lua (retângulos menores) em torno da Terra, não é o mesmo que o plano orbital da Terra em relação ao Sol. Por isso, dadas as configurações Sol-Terra-Lua para as fases Nova e Cheia, em quatro lunações diferentes, vemos que nas lunações (a e c), as fases Nova e Cheia acontecem sempre que a Lua estiver um pouco acima ou um pouco abaixo do plano da eclíptica (retângulo maior). Por sua vez, isso implica dizer que nessas configurações não ocorrem eclipses.

Já nas lunações (b e d), as fases Nova e Cheia acontecem quando a Lua está nos pontos do seu plano orbital, em que ela cruza a eclíptica, resultando em um eclipse solar na Lua Nova e um eclipse lunar na Lua Cheia. A principal razão disso é que, de um lado, o plano orbital da Lua está a ( $5,2^\circ$ ) (Figura 40) de inclinação, em relação ao plano orbital da Terra; e do outro, o Sol se encontra sobre a linha dos nodos, isto é, uma linha de intersecção dos planos orbitais da Terra em torno do Sol e da Lua em torno da Terra.

Figura 40 – Inclinação do plano orbital da Lua em torno da Terra.

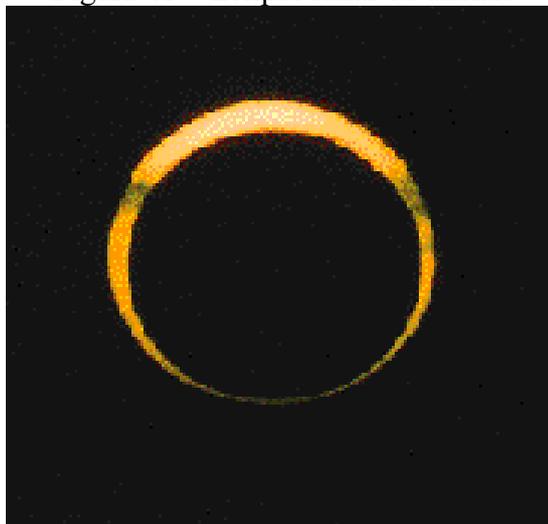


Fonte: Oliveira Filho e Saraiva (2018, p. 2).

Na figura 40, observa-se que, se o disco inteiro do Sol, representado por seus feixes de luz (ilustração inferior), está atrás da Lua, o eclipse será *total*, e no caso contrário, ele será *parcial* (ilustração superior).

Agora, quando a Lua está no seu apogeu, isto é, no ponto mais distante de sua órbita, seu diâmetro será menor do que o do Sol e, conseqüentemente, ocorrerá um eclipse anular ou anelar (Figura 41), a seguir.

Figura 41 – Eclipse lunar ou anelar.



Fonte: Oliveira Filho e Saraiva (2018, p. 2).

Da Figura 41, sabe atualmente que, como a excentricidade da órbita planetária terrestre em relação ao Sol é de (0,0167), o diâmetro angular do Sol varia (1,67%) em torno de sua média, que é de (31'59") trinta e um graus e cinquenta e nove segundos, chegando a (33'16") trinta e três graus e dezesseis segundos, muito maior do que o diâmetro máximo do Sol.

Do ponto de vista histórico, sabe-se que os cálculos antigos de previsão dos eclipses lunares, remontam mais uma das contribuições de Hiparco de Nicéia (séc. II a. C), “que calculou com precisão de uma a duas horas, a ocorrência dos eclipses da Lua e, posteriormente, seus cálculos foram publicados no Almagesto de Ptolomeu” (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2018, p. 3). Já no que diz respeito à contribuição de Copérnico sobre esse problema empírico, sabe-se também que ele refinou esses cálculos de previsão dos eclipses. Para tanto, ele adotou o movimento circular uniforme e os epiciclos para explicar as variações do diâmetro aparente da Lua e do Sol.

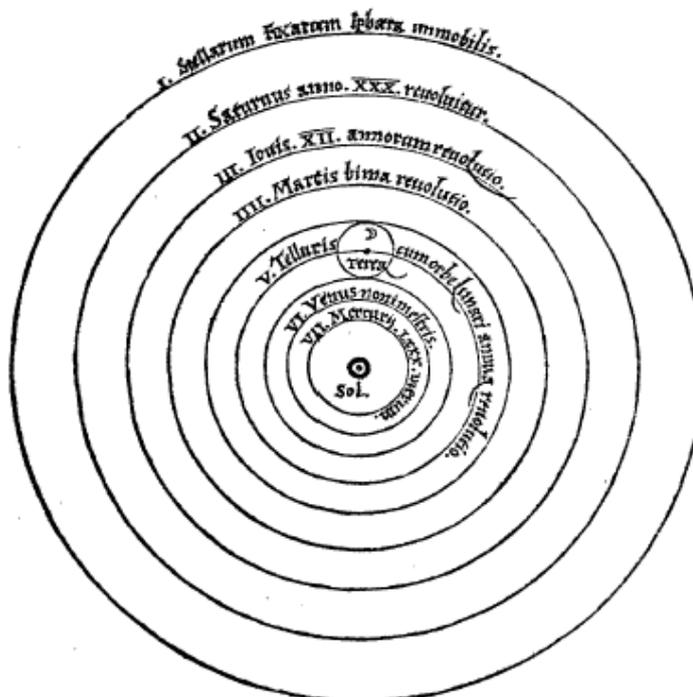
Não obstante, no sistema copernicano, os *movimentos dos corpos celestes* são circulares, uniformes e perpétuos – mesmo aqueles aparentemente irregulares –, pois, para Copérnico, “o movimento apropriado de uma esfera é uma rotação num círculo, reproduzindo a sua forma no próprio ato, de um corpo extremamente simples, em que não se pode indicar

princípio e fim” (Ibid., p. 25). A Terra é dotada de um movimento natural, que, mais tarde, Copérnico usará como argumento para rebater, sem sucesso, uma crítica a essa rotação.

No que diz respeito aos movimentos aparentemente irregulares, Copérnico considerou que esses corresponderiam a uma *composição de movimentos circulares* – uma defesa explícita da premissa platônica –, uma vez que, somente mediante movimentos circulares, os corpos celestes poderiam retornar às suas posições de origem, tais como são observados.

Nesses argumentos, percebe-se o quanto a tradição de pesquisa grega ainda norteava seu trabalho astronômico, “não sendo ele capaz de escapar das complexidades geométricas inerentes ao mecanismo descritivo dessa concepção” de trabalho (PEDUZZI, 2018a, p. 99), via astronomia matemática instrumentalista. Mediante essa premissa platônica, a ordenação dos corpos celestes no sistema astronômico copernicano é ilustrada com o nome de cada planeta acompanhado por seu período de revolução em torno do Sol (Figura 42).

Figura 42 – Ordenamento dos planetas no sistema astronômico copernicano.



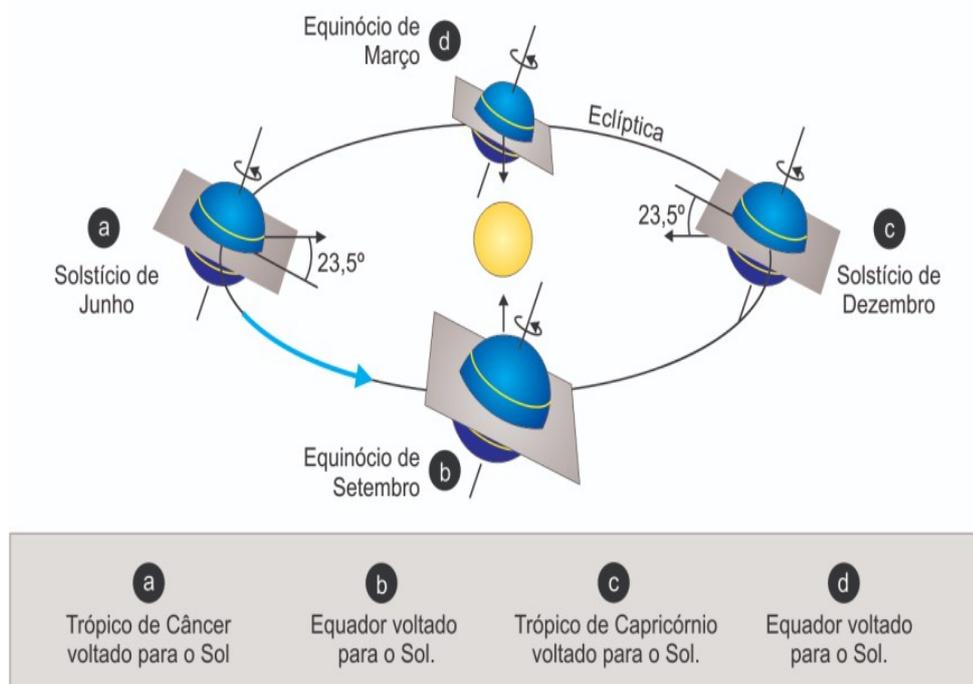
Fonte: Peduzzi (2018a, p. 100), extraído de Copérnico (2009, p. 69).

Na Figura 42, as esferas celestes representam os planetas e seus períodos de revolução em torno do Sol: Saturno, revolução em trinta anos; Júpiter, revolução em doze anos; Marte, revolução em dois anos; revolução anual da Terra em conjunção com a Lua; revolução de Vênus em nove meses; revolução de Mercúrio em oitenta dias.

Nessa ordenação, dada a solução para o problema da precessão dos equinócios, em relação à Terra dotada de movimento, a esfera das estrelas fixas ficava em repouso. Por sua vez, esse movimento terrestre corresponde a uma rotação diária em torno do seu próprio eixo, uma vez por dia. Dotando a Terra com um segundo movimento, isto é, de translação, Copérnico *solucionou o problema empírico do brilho aparente dos planetas internos, pela sua aproximação e afastamento do Sol*.

Adjacente a esse movimento de translação, *a solução do problema empírico das estações do ano* foi apresentada por Copérnico, da seguinte maneira: deve-se notar que o equador e o eixo da Terra têm uma inclinação variável relativamente ao círculo que é a linha média do zodíaco e o seu plano, pois, se eles estivessem na mesma inclinação, não deveria existir nenhuma desigualdade de dias e de noites; pelo contrário, o solstício do verão ou do inverno, os equinócios, a primavera e o inverno ou qualquer outra estação permaneceriam sempre sem mudanças. A Figura 43, qualitativamente, denota, em conhecimentos modernos, como a combinação do movimento de translação da Terra e sua inclinação (ângulo de  $23,5^\circ$  graus) em relação à eclíptica provocam as estações do ano.

Figura 43 – O problema empírico das estações do ano.



Fonte: Saraiva (2001, p. 3).

Nesse esquema ilustrativo da (Figura 43), as estações do ano são provocadas pelo movimento de translação da Terra em torno do Sol e sua inclinação em relação à eclíptica.

Essa combinação faz com que a intensidade da radiação solar incida de maneira diferente em cada parte do globo terrestre, durante esse movimento. Seguindo essa ilustração, tem-se em (a) o solstício de Junho, o Inverno, noites mais longas do que os dias; em (b) equinócio de setembro, a Primavera, na qual as diferença entre a duração da noite e do dia começa a diminuir; em (c) o solstício de Dezembro, o Verão, no qual os dias são mais longo do que a noite; e em (d), o equinócio de março, o Outono, no qual a duração dos dias e das noites é aproximadamente igual (SARAIVA, 2001).

Retomando o ordenamento das esferas celestes, observa-se que Copérnico usava apenas um círculo para apresentar seu sistema. Mas é preciso lembrar que ele não conseguiu escapar da complexidade encontrada na astronomia ptolomaica. Enquanto Ptolomeu utilizou 40 círculos para descrever as posições planetárias observadas a partir de uma Terra estacionária, Copérnico utilizou, com a Terra em movimento, 48 círculos. Todavia, o ponto importante a favor de Copérnico é que seu sistema permitiu, pela primeira vez, comparar as diferenças planetárias entre si (MARTINS Roberto, 1990).

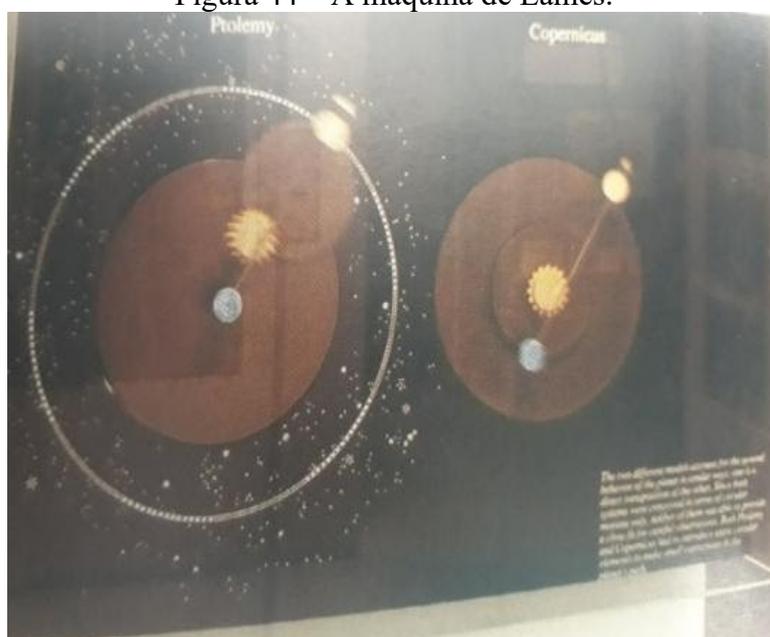
Como se viu no trabalho de Aristarco de Samos, que calculou apenas as distâncias relativas entre a Terra, a Lua e o Sol, mas não calculou as distâncias dos outros planetas em relação a Terra. Além disso, as observações antigas nada diziam sobre as distâncias entre os planetas e a Terra, em termos quantitativos. Nessa direção, Gingerich chama atenção do papel unificador dos grandes cientistas, que encontraram conexões nunca antes percebidas, colocando Copérnico como um deles:

Isaac Newton destruiu a dicotomia entre os movimentos celestes e terrestres, forjando uma série de leis comuns que se aplicavam tanto à Terra quanto ao céu. James Clerk Maxwell conectou a eletricidade ao magnetismo e mostrou que a luz era composta de radiação eletromagnética. Charles Darwin previu o parentesco de todos os organismos vivos através de um ancestral comum. Albert Einstein dividiu em partes a separação entre matéria e energia, conectando-as através de sua famosa equação  $E = mc^2$ . (GINGERICH, 2008, p. 77)

Alinhado a esses cientistas, Copérnico torna-se um grande unificador da astronomia, porque conseguiu harmonizar a astronomia ptolomaica e seu desarranjo planetário de entidades separadas, com os planetas configurados um após o outro e com movimentos independentes. Essa é uma das razões pela qual Copérnico afirma no prefácio dedicado ao Papa Paulo III, que a astronomia matemática praticada em seu tempo era “um monstro composto de partes isoladas, uma cabeça tirada daqui, os pés tirados dali, os braços de acolá” (GINGERICH, 2008, p. 77).

Pelas teorias planetárias ptolomaicas, cada planeta possuía um círculo principal, deferente, e secundário, epiciclo. Marte e seu “epiciclo serviam como protótipo para os outros planetas, porém, devido ao fato da frequência e o tamanho do movimento retrógrado serem diferentes para cada um deles, um epiciclo de tamanho e período individuais era necessário” (GINGERICH, 2008, p. 78). Em função disso, Copérnico “descobriu que podia eliminar um círculo de cada grupo combinando-os todos em um sistema unificado”. Gingerich afirma, portanto, que assim como “a máquina de Eames demonstrou que as órbitas heliocêntricas da Terra e de Marte podiam dar os mesmos resultados que o deferente marciano e o epiciclo no sistema geocêntrico” (Idem). Uma imagem dessa máquina é ilustrada na Figura 44.

Figura 44 – A máquina de Eames.



Fonte: Gingerich (2008, p. 191-193).

A Figura 44 representa uma imagem da “máquina de Eames” – famoso designer Ray Eames – apresentada na exposição da *International Business Machines* (IBM) sobre Copérnico, demonstrando a equivalência entre o modelo de epiciclos de Ptolomeu (à esquerda) e as órbitas de Copérnico para Marte, à direita – as hastes permanecem em paralelo enquanto os círculos giram em cada sistema.

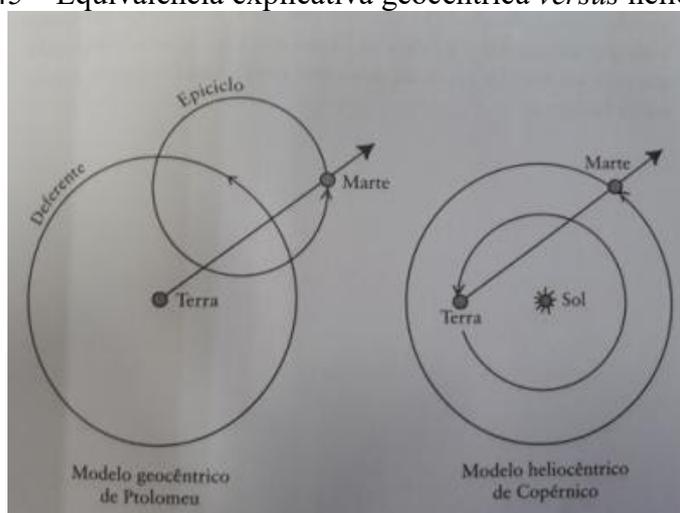
Para esse problema empírico, Gingerich (2008) afirma que:

[...] o mesmo se aplicava aos outros planetas. Se todos os modelos podiam ser ajustados de modo que a órbita da Terra tivesse sempre o mesmo tamanho, eles podiam ser todos reunidos em uma única órbita terrestre, reduzindo assim o número total de círculos. E quando Copérnico fez isso algo quase mágico aconteceu.

Mercúrio, o planeta mais rápido, circulava mais próximo do Sol do que qualquer outro planeta. O letárgico Saturno, na época o planeta mais distante já identificado, circulava mais longe do Sol, e os outros planetas ficavam em algum lugar no meio, arrumados à distância por seus períodos de revolução. (GINGERICH, 2008, p. 78)

Por sua vez, essa equivalência entre os dois modelos teóricos explicativos da (Figura 44) está também ilustrada na (Figura 45), a qual representa o mesmo esquema da máquina de Eames, na comparação entre o modelo explicativo geocêntrico de Ptolomeu (à esquerda) e o modelo heliocêntrico de Copérnico (à direita), para o movimento de retrogradação do planeta Marte.

Figura 45 – Equivalência explicativa geocêntrica *versus* heliocêntrica.

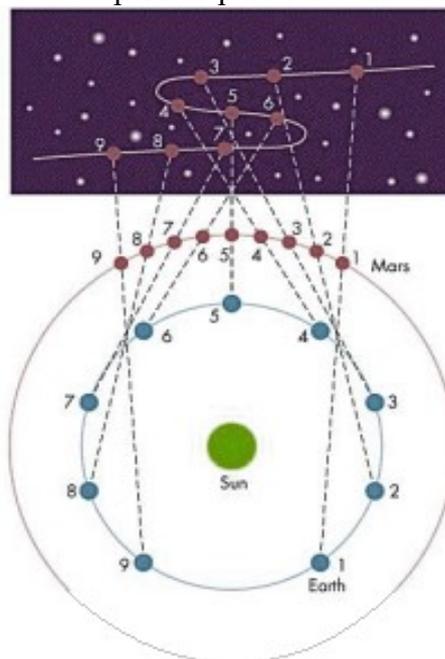


Fonte: Gingerich (2008, p. 67).

Com o esquema (Figura 45), Copérnico solucionou o problema empírico mais importante da astronomia de seu tempo – o movimento de retrogradação dos planetas –, com uma nova explicação mais “simples” e elegante do que a dada por Ptolomeu. Ele explicou que a causa das acelerações, desacelerações e inversões de sentido dos planetas, percebidos por um observador terrestre, se encontrava nas diferentes velocidades orbitais dos planetas. Ilustrativamente, essa solução considera como circulares as órbitas da Terra (*Earth*) e Marte (*Mars*).

Por essas órbitas, percebe-se que o movimento retrógrado de Marte (desacelerações), iniciado na inversão de sentido da trajetória, após o ponto (3), indo até o ponto (6), e retomando o sentido (acelerações), é pelo fato de a Terra se mover de modo mais veloz, aproximando de Marte no ponto (5) e passando ao largo dele nos pontos (6, 7, 8, 9) da (Figura 46), a seguir.

Figura 46 – A solução de Copérnico para o movimento retrógrado de Marte.



Fonte: Peduzzi (2018a, p. 100).

O destaque que se dá a Marte, em detrimento a outros planetas, é que a explicação do movimento deste planeta tornou-se uma tarefa muito mais complicada no âmbito da astronomia. Por exemplo, o jovem Rético, discípulo de Copérnico, por muitas vezes, viu-se impotente diante da “intrincada órbita de Marte” (KOESTLER, 1989, p. 107). Sobre esse episódio, Johannes Kepler, ao escrever na dedicatória da sua obra *Nova Astronomia* ao imperador Rodolfo, não deixou de citá-lo:

No que tange a Jorge Joaquim Rético, o famoso discípulo de Copérnico nos dias de nossos antepassados [...] conta-se o seguinte: em certa ocasião, quando a perplexidade o deteve na teoria de Marte, e já não conseguia safar-se, apelou, em último recurso, como oráculo, ao seu anjo da guarda. O indelicado espírito agarrou Rético pelos cabelos e lhe bateu repetidas vezes a cabeça contra o teto; depois, largou o corpo que foi bater contra o assoalho. A esse tratamento, acrescentou o seguinte juízo oracular: **Eis os movimentos de Marte**. O boato tem língua má [...] e, no entanto, bem podemos acreditar que Rético, com o espírito desequilibrado por uma especulação sem saída se ergueu, furioso, e bateu a cabeça contra a parede. (KOESTLER, 1989, p. 108)

Duas gerações depois de George Joaquim Rético (1514 - 1574), o próprio Johannes Kepler (1571 - 1630) se queixou a um amigo, dizendo-lhe por carta: “Zombais de mim como o exemplo de Rético. Rio-me convosco. Vi como vos torturou miseravelmente a lua, e a mim, por vezes. Se agora as coisas vão mal com o meu Marte, bem vos ficaria a vós, que sofrestes semelhantes vexames, ter pena de mim” (KOESTLER, 1989, p. 108). Contudo, é justamente a

solução dada por Kepler ao problema da órbita de Marte, que estabelecerá o fim do dogma do movimento circular. Kepler vai demonstrar empiricamente que as órbitas planetárias são, aproximadamente, elipses (com o Sol em um dos focos) e não círculos (ou combinação de círculos).

Torna-se oportuno destacar que, isso somente se tornou possível com a obtenção de novos dados observacionais, com grande acurácia, produzidos por Tycho Brahe. Sabe-se que, apesar de ferrenho opositor ao trabalho de Copérnico, sem os dados de Brahe, seria impossível o rompimento com o aporte conceitual e metodológico do movimento circular uniforme. Por isso, deve-se observar que o sistema astronômico copernicano foi edificado com o mesmo conjunto de dados dos antigos astrônomos gregos, especialmente, produzidos por Hiparco e Ptolomeu; forjado a partir da reinterpretação dos fenômenos celeste, por uma influência neoplatônica, que destitui a Terra do centro do universo, colocando em seu lugar o Sol; e por isso, seu sistema às vezes é chamado também heliostático (MARTINS Roberto, 1990).

No entanto, sabemos que a ideia do Sol se mover remonta a cosmologia de Filolau de Crotona, cuja explicação do movimento desse astro pela eclíptica aparece também como um problema empírico desde a antiguidade grega. Posteriormente, as manchas solares observadas por Galileu e outros astrônomos, no início do século XVII, vão mostrar que o Sol também possui um movimento de rotação em torno de seu próprio eixo. Atualmente, sabe-se que esse astro se move pela nossa galáxia, a Via Láctea, e a volta completa do Sol, em torno do centro dela, dura nada menos que 225 milhões de anos. Nesse movimento, ele carrega consigo todos os outros corpos do Sistema Solar.

Destaca-se que, apesar da importante contribuição astronômica copernicana, seu sistema heliocêntrico gerou muitos outros problemas empíricos e problemas conceituais. Por sua vez, esses novos problemas foram fundamentais para o desenvolvimento da nova tradição de pesquisa europeia renascentista, materializada na constituição de uma nova astronomia, uma nova cosmologia e uma nova física, no século XVII, especialmente, representadas pela concepção newtoniana da teoria da gravitação universal. Nessa direção, no próximo capítulo 10, serão abordadas as diversas críticas lançadas contra a astronomia copernicana antes e depois da morte de Copérnico.

## 10 A NATUREZA DAS CRÍTICAS CONTRA O SISTEMA COPERNICANO

A partir dos dois capítulos anteriores foi possível evidenciar que o advento da astronomia copernicana, além de ter sido impulsionado por muitos fatores externos e internos à ciência, também foi precedido de muitas discussões filosóficas abrangentes. Dentre elas, a possibilidade do movimento da Terra, as ideias cosmológicas alternativas, como a de Nicolau de Cusa, e os argumentos críticos contra a dinâmica de forças de Aristóteles.

No âmbito interno da astronomia, sob a forte influência da *escola de pensamento neoplatônica* e da *influência metafísica de culto ao Sol*, Copérnico resgatou e defendeu as ideias de antigos filósofos e astrônomos gregos: a premissa platônica do movimento circular uniforme; os conceitos metafísicos de *harmonia, simetria e beleza*; o *triplo movimento* da Terra (em torno do seu próprio eixo, a precessão dos equinócios e de translação em torno do Sol), e o destronamento da posição central da Terra nos modelos astronômicos e cosmológicos, colocando o Sol nesse lugar. Em face desse resgate, Copérnico apresentou novas soluções para os mesmos problemas empíricos da tradição de pesquisa grega antiga, porém de uma forma mais elegante e sistematizada do que as explicações individualizadas apresentadas por Ptolomeu. Embora tenha excluído o *equante* do seu sistema astronômico, Copérnico continuou usando mesmos epiciclos e deferentes encontrados nas explicações de Ptolomeu. Como um marco de transição entre a tradição de pesquisa antiga e a nova tradição de pesquisa europeia renascentista, a abordagem astronômica de Copérnico fomentou novas perguntas de natureza empírica e conceitual.

Nessa direção, essas perguntas foram fundamentais para elucidar, de um lado, algumas dificuldades de aceitação de suas ideias e, de outro, para o desenvolvimento da nova tradição de pesquisa europeia renascentista, que foi se constituindo após adoção das implicações astronômicas copernicanas, principalmente, por Giordano Bruno, Galileu Galilei, Kepler, Digges, Isaac Newton, dentre outros. Nesse sentido, este capítulo procura discutir esse momento de críticas, especialmente, durante a vida e depois da morte de Copérnico, procurando abordar: sua natureza empírica e conceitual; as críticas de Tycho Brahe e a importância de seus trabalhos sobre o aparecimento da estrela nova e do cometa, respectivamente, em 1572 e 1577; e algumas críticas, de cunho religioso, lançadas contra as ideias Copérnico, após sua morte.

## 10.1 AS CRÍTICAS CONTEXTUAIS A COPÉRNICO

A natureza das críticas lançadas contra o sistema copernicano se materializou em novos problemas empíricos e problemas conceituais inerentes ao desenvolvimento da astronomia, da cosmologia e da física, por conseguinte, da nova tradição de pesquisa europeia renascentista. De acordo com o historiador da ciência Roberto Martins (1990), no contexto de Copérnico, seus pares e, principalmente, seus opositores aristotélicos, lançaram sobre o sistema copernicano, as seguintes perguntas:

Por que os corpos caem em direção ao centro da Terra? Por que não somos atirados fora da Terra por sua rotação? Existe alguma experiência terrestre que mostre que a Terra se move? Qual a teoria física de movimento de Copérnico, se não aceita a física de Aristóteles? (MARTINS ROBERTO, 1990, p. 79-80)

Frente a essas perguntas, Copérnico tentou oferecer respostas para as duas primeiras delas, porém sem muito sucesso. Para a pergunta – *Por que os corpos caem em direção ao centro da Terra?* – ele respondeu que os corpos caem por causa do seu movimento natural em direção ao centro da Terra, e não do universo. E isso acontecia devido a uma propriedade que ele chamava de *gravidade* (COPÉRNICO, 1984). Para Copérnico (1984), a ação da gravidade atuava no agrupamento da matéria, porém esse efeito não era um privilégio somente da Terra, podendo agir também em outros corpos celestes, como o Sol. Juntamente a essa resposta, Copérnico admitia sobre a *gravidade*, o seguinte:

Parece-me que a gravidade não passa de uma inclinação natural, concedida às partes dos corpos pelo Criador, a fim de combinar as partes no formato de uma esfera e contribuir, assim, para a sua unidade e integridade. E podemos crer que tal propriedade está presente também no sol, na lua e nos planetas, de modo que, com isso, retêm o seu formato esférico não obstante a variedade de caminhos. (COPÉRNICO, 1984, p. 45)

Para a segunda pergunta – *Por que não somos atirados fora da Terra por sua rotação?* – ou como questionavam os aristotélicos: *uma Terra em rotação não se fragmentaria devido à força centrífuga?* Copérnico respondeu que “a força centrífuga somente apareceria em movimentos rotativos violentos” (PEDUZZI, 2018a, p. 103), mas como a Terra era dotada de um movimento natural (circular), em sua concepção, esse movimento não poderia gerar nenhuma ação violenta sobre os corpos terrestres.

Observando o conteúdo dessas respostas, suas fragilidades residem justamente no fato de estarem apoiadas no próprio *método lógico-verbal aristotélico* (JAMME, 2010). Em outras palavras, para primeira pergunta, Copérnico se utiliza da ideia da lei do movimento natural de Aristóteles, para dizer que os corpos tem um movimento natural que os impulsionam em direção ao centro da Terra, mesmo que esta não seja concebida como o centro do universo. Para a segunda pergunta, ele se apoia na ideia do movimento natural circular, que era atribuído somente ao movimento dos corpos celestes, pois na concepção grega e de Aristóteles era corpos perfeitos e divinos.

Adjacente a essa fragilidade argumentativa, outro problema de natureza empírica gerado pelo sistema copernicano foi a exigência astronômica acerca da distância das estrelas em relação a Terra (MARTINS Roberto, 1990). Para Copérnico, elas deveriam estar muito mais distantes, ou pelo menos uma centena de vezes mais remotas do que se pensava. Em sua concepção, se as estrelas estivessem muito próximas da Terra, “o movimento da Terra em torno do Sol produziria um movimento aparente das estrelas fixas e o horizonte não bissectaria a esfera celeste” (Ibid., p. 80) – isto é, dividir em duas partes iguais. Do ponto histórico-filosófico, esse argumento foi visto como uma fuga de Copérnico para contornar outro problema empírico astronômico associado a não observação do fenômeno de paralaxe – que comprovaria o movimento da Terra.

Contudo, ao invés de contornar esse problema empírico, Copérnico fomentou mais uma pergunta, que pesava contra seu sistema astronômico, a saber: *o que existia, então, entre Saturno e as estrelas fixas?* Diante dessa pergunta, na concepção da época, era inconcebível a ideia de um universo extremamente extenso, mesmo que finito, como proposto por Copérnico. Além disso, acreditava-se que as estrelas fixas estavam presas à oitava esfera celeste, logo após a esfera de Saturno. Da mesma forma, as esferas dos planetas também estavam encaixadas umas dentro das outras, de modo que era impossível, por tal crença, existir regiões vazias no céu (MARTINS Roberto, 1990). Por exemplo, Aristóteles afirmava que o mundo celeste era constituído e preenchido pela *quintessência*, o *éter*, uma substância primordial invisível. E defendia também que o roçar dessas esferas umas nas outras era o agente responsável por provocar o movimento dos corpos celestes (KUHN, 1990).

Segundo Roberto Martins (1990), em razão desses e de outros questionamentos, a reação quase unânime dos astrônomos contemporâneos a Copérnico deixou evidente que seu sistema astronômico heliocêntrico era matematicamente genial, porém fisicamente absurdo.

Para fundamentar tal afirmação, pequenos relatos sintetizam um pouco das rejeições das ideias copernicanas, especialmente, sobre o movimento da Terra:

Em 1555, Gemma Frisius escreve uma carta a Stadius, afirmando admirar Copérnico, mas ter restrições à ideia de que a Terra se move; Caspar Peucer, genro de Melanchton, afirma em seu livro *Hypotheses astronomicae* (1571) que utilizava as observações e tabelas de Copérnico, mas que não descreverá suas hipóteses, para não ofender e perturbar os iniciantes. Em outro lugar diz que sua teoria é absurda e distante da realidade; considera, no entanto, Copérnico como o maior astrônomo desde Ptolomeu; Michael Maestlin (1550-1631), professor de Kepler, utilizou em seu *Epitome astronomiae* (1588) os dados de Copérnico, sem admitir sua teoria; O jesuíta Christophorus Clavius chamou de “absurda” a hipótese de Copérnico, porém considerou-o o grande reformador da astronomia; utilizou suas observações e catálogos de estrelas, aperfeiçoando-o; Giuseppe Magini (1555-1617), professor de matemática em Bolonha, utilizou os dados numéricos e observações de Copérnico, declarando-o o maior astrônomo de todos os tempos, porém classificou sua teoria como absurda. (MARTINS ROBERTO, 1990, p. 80-81)

Por tanto, os astrônomos se opuseram a Copérnico não somente pela força da influência religiosa, mas também pela falta de argumentos físicos a seu favor. Argumentos que fornecessem uma aparência de “verdade” à sua proposta de descrever a realidade dos fenômenos celestes. É importante destacar que, por enquanto, esse critério de verdade, no contexto de Copérnico, estava associado apenas às disciplinas de filosofia e teologia, enquanto que a astronomia ainda era fortemente praticada dentro da perspectiva instrumentalista. Mais a frente, na defesa do sistema copernicano, por Bruno e Galileu, próximo capítulo, será possível perceber o esforço desses dois importantes personagens da história da ciência, ao tentarem mostrar que as implicações astronômicas, cosmológicas, filosóficas, físicas, matemáticas, metafísicas e teológicas do trabalho de Copérnico, ultrapassavam essa mera prática instrumentalista. Antes de chegar a esse momento, a seguir, serão localizadas as críticas de Brahe sobre o sistema copernicano, juntamente com a importância de dois de seus trabalhos, para o desenvolvimento da nova tradição de pesquisa europeia renascentista.

## 10.2 AS CRÍTICAS DE TYCHO BRAHE AO TRABALHO DE COPÉRNICO

No contexto posterior a morte de Copérnico, o astrônomo dinamarquês Tycho Brahe (1546-1601) retomou a discussão do copernicanismo original, especialmente, sobre as hipóteses de centralidade do Sol e do movimento da Terra, a fim de criticá-las de maneira bastante contundente, para sua época (TOSSATO, 2004). Contudo, sem saber, indiretamente,

seus trabalhos sobre o surgimento de uma *supernova*<sup>17</sup>, em 1572, e de um cometa, em 1577, proporcionaram um substantivo apoio empírico e conceitual à astronomia copernicana. Esses dois acontecimentos celestes fomentaram os debates astronômicos, cosmológicos e físicos, no sentido de colocar em xeque a visão de mundo aristotélica e toda a sua malha conceitual.

Tycho Brahe foi reconhecidamente o melhor astrônomo observacional de seu tempo, antes do surgimento do telescópio. Pela precisão de seus dados observacionais, em comparação aos dados de Hiparco de Nicéia e de Ptolomeu utilizados por Copérnico, Kepler pôde romper com o dogma atribuído ao uso do movimento circular uniforme, ao resolver o complicado problema empírico anômalo da órbita de Marte. Inconformado com a falta de acurácia dos dados astronômicos antigos, Brahe dedicou-se plenamente à melhoria das observações astronômicas.

A falta de acurácia desses dados ficou demonstrada para ele, em 17 de agosto de 1563, quando sua observação de “Júpiter e Saturno mostrava que eles ficaram muito próximos um do outro, mas entre a ocorrência deste fenômeno e a sua precisão pelas Tabelas Alfonsinas, havia uma discrepância de cerca de um mês e de vários dias em relação às *Tabelas Prutênicas*” (PEDUZZI, 2018a, p. 114). Essas últimas tabelas foram elaboradas pelo astrônomo Erasmus Reinhold (1511-1553), baseando-se no trabalho astronômico de Copérnico (TOSSATO, 2004). Além dessa preocupação, Tycho Brahe desenvolveu uma consciência crítica acerca dos erros presentes em qualquer tipo de medida (por mais acurada que seja), sem importar a precisão dos instrumentos. Do mesmo modo que soube compreender o significado dessa limitação no julgamento de uma teoria (PEDUZZI, 2018a). A partir disso, observa que:

Ao se procurar uma descrição matemática para um conjunto de dados observacionais, é importante saber o quão precisas são realmente estas medidas, de maneira a se ter presente o quanto pode ser tolerado na discrepância entre as predições da teoria matemática e os dados numéricos. Esta prática, hoje comum, de assinalar limites quantitativos de precisão a dados numéricos medidos, foi introduzida na ciência experimental por Tycho Brahe. (BLANPIED, 1969, p. 58, *apud* PEDUZZI, 2018a, p. 116)

Após as observações da *estrela nova*, em 1572, Brahe foi trabalhar como astrônomo imperial do Rei Frederico II da Dinamarca, de quem recebera, em 1576, uma ilha ao norte de

---

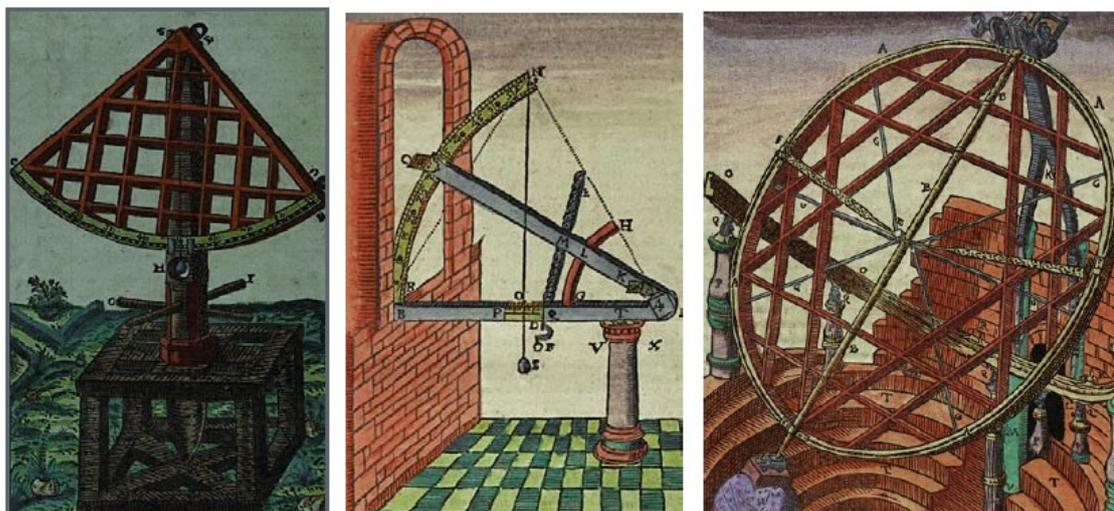
<sup>17</sup> Uma estrela que sofre uma explosão repentina, aumentando temporariamente a sua luminosidade em centenas de milhares de vezes.

Copenhague, chamada de *ilha de Hven*, onde construiu seu próprio observatório. Considerado o observatório a olho nu mais importante da Europa, sua estrutura era composta de:

[...] uma biblioteca, um laboratório de alquimia, uma gráfica, uma fábrica de papel, acomodações para estudantes e colaboradores, e “uma grande quantidade de instrumentos de madeira e bronze, como quadrantes, astrolábios, réguas de paralaxe, esferas armilares e relógios, dos mais precisos. E tudo gigantesco e em dobro”. Isso era o que Brahe precisava para dar continuidade ao seu projeto de observação sistemática dos corpos celestes. (PEDUZZI, 2018a, p. 116)

Alguns instrumentos do observatório de Brahe são ilustrados na Figura 47.

Figura 47 – Alguns instrumentos astronômicos de Tycho Brahe.



Fonte: Peduzzi (2018a, p. 116).

Na Figura 47, da esquerda para a direita estão: os instrumentos *quadrante*, para determinar a distância angular de um objeto em relação ao horizonte, o *sextante*, para aferir a elevação de objetos celestes, e a *armilar equatorial*, para medir as ascensões retas e declinações dos corpos celestes (PEDUZZI, 2018a). Com esses instrumentos de precisão e observações sistemáticas, a acurácia dos dados astronômicos de Brahe, em relação aos anteriores (10' minutos de arco), possuía uma precisão de 1, 5' minutos de arco – unidade de medida angular, sendo 1 minuto de arco correspondente a 1/60 de grau do círculo – Por isso, as medidas de Brahe foram consideradas as melhores de seu tempo (TOSSATO, 2004).

Contornando muitos pormenores envolvendo intrigas e problemas externos à prática científica de Brahe – no sentido de manter a objetividade desta incursão histórico-filosófica –, sabe-se que com a morte do rei da Dinamarca, Brahe foi trabalhar como matemático imperial,

em 1599, para o Imperador Rudolf II, na cidade de Praga, onde permaneceu até o final de sua vida, sendo substituído posteriormente por Johannes Kepler.

Nesse novo contexto de trabalho, Brahe escreveu uma carta para Kepler, em 9 de dezembro de 1599, com dois objetivos: convidá-lo para ser seu assistente e registrar uma queixa contra o astrônomo Nicoli Reymers Baer, mais conhecido por Reymers Ursus, que o antecedeu como matemático imperial de Rudolf. O importante dessa queixa é que ela envolveu a disputa da primazia “das hipóteses do modelo híbrido de universo” (TOSSATO, 2004, p. 542), tendo como fonte motivacional o surgimento do cometa de 1577, na constelação de Cassiopeia – ou constelação do lagarto, localizada próximo ao polo norte celeste, com cerca de 30 estrelas visíveis a olho nu. A expectativa desses dois acontecimentos, à época, é ilustrada na (Figura 48).

Figura 48 – Ilustrações sobre o aparecimento da estrela nova e do cometa.



Fonte: Peduzzi (2018a, p. 114) e Tossato (2004, p. 547).

Na Figura 48, a *estrela nova* de 1572 encontra-se na imagem do lado esquerdo. Do lado direito, encontra-se um cartaz da época representando a expectativa das pessoas em relação ao surgimento do cometa em 1577. Por ter acompanhado o surgimento da estrela nova até 1573, data em que essa estrela desapareceu no céu, Brahe fez as seguintes interrogações:

[...] se fosse uma nova estrela fixa, ela não poderia ter qualquer paralaxe, pois uma estrela fixa (e a concepção de “fixa”, é justamente a de não ter movimento, estar como “pregada à abóbada celeste”) não apresenta tal característica; por outro lado, se fosse um fenômeno atmosférico, como, por exemplo, um cometa, teria uma paralaxe, em virtude da explicação aristotélica que entende que qualquer alteração observada no céu (cometas, meteoros, meteoritos etc.) como fenômenos terrestres ou, dito de outro modo, ela teria uma alteração de altitude, longitude ou latitude no céu. (TOSSATO, 2004, p. 545)

Como fruto desse acontecimento, Brahe publicou, em 1573, seu livro *De nova Stella* – Sobre a nova estrela. Uma informação importante contida nesse livro foi a de que Brahe afirmara que “a nova estrela em Cassiopeia não apresentou nenhuma mudança de posição, nem em latitude ou longitude, mostrando que ela não teve nenhuma paralaxe observável e que, portanto, estava muito além da esfera da Lua” (TOSSATO, 2004, p. 545).

Por sua vez, esse fenômeno colocou em teste a concepção aristotélica do mundo supralunar, no qual nenhuma ocorrência, além das existentes, poderia acontecer, dado o caráter imutável do mundo celeste aristotélico (LAUDAN, 2011). Todavia, isso ainda não era suficiente para abalar a ideia das sólidas esferas cristalinas, pois nada pesava contra a convicção astronômica e astrológica de suas existências, até o surgimento do cometa em 1577. Destaca-se que, as observações de estrelas novas e cometas não foram apenas nessa época. Mas, em tempos anteriores, “na Antiguidade e na Idade Média, por exemplo, os cometas eram classificados como fenômenos sublunares e pertenciam ao campo da meteorologia” (LAUDAN, 2011, p. 31). Isso significa dizer que, “os astrônomos, cuja atenção se concentrava exclusivamente em problemas relativos às regiões celestiais, não sentiam necessidade de apresentar teorias sobre os cometas nem demarcar seu curso” (Ibid., p.31-32).

Além disso, para a concepção aristotélica predominante, os cometas eram compreendidos como fenômenos atmosféricos, que podiam ser explicados da maneira que se segue. A saber, quando a Terra era aquecida pelo Sol, surgiam dois tipos de consequências, ou fumaça seca ou nuvens úmidas. As fumaças secas procuravam seu lugar natural e subiam acima das nuvens; por sua vez, as nuvens condensavam-se e caíam, obrigando as fumaças que estavam subindo a irem para baixo. Quando isso acontecia, elas se inflamavam originando os fenômenos, como estrelas cadentes ou meteoros. Porém, quando as fumaças atingiam alturas muito grandes, isto é, até o limite da camada celeste do mundo sublunar, inflamavam-se muito mais e, desse modo, surgiam os cometas. Por essa razão, os cometas eram vistos como fenômenos terrestres e não celestes (TOSSATO, 2004).

Em contrapartida, após o desaparecimento do cometa, Brahe escreveu um pequeno texto conhecido como *Tratado germânico*, cujo conteúdo versa sobre sua interpretação da observação desse acontecimento celeste. Tal tratado constituía-se na base de seu outro livro *De Mundi*, publicado em 1588, no qual Brahe apresentou suas demonstrações matemáticas e o seu *modelo híbrido de universo*, após cuidadosas observações sobre o tamanho do cometa, de sua distância, posição e altura, etc. Dentre essas medidas, a distância do cometa foi o que lhe chamou mais atenção. Brahe considerou que o único modo de determinar essa distância seria

mediante a paralaxe. Com isso, chegou à conclusão de que essa distância era menor do que a da Lua e, mais importante, a distância do cometa estava além de sua esfera, isto é, perto da esfera de Vênus (TOSSATO, 2004). Acerca disso ele escreveu:

[...] descobri por cuidadosas observações e demonstrações do presente cometa que ele está localizado e caminha acima da Lua, nos céus. [...] Portanto, a opinião de Aristóteles é inteiramente falsa quando ele assevera que os cometas localizam-se acima da Terra, no ar, e que não podem ser gerados nos céus, pois ele estabeleceu isso sobre a base de seu próprio bom pensamento, e não por qualquer observação ou demonstração matemática. (TOSSATO, 2004, p. 545)

O principal peso deste estudo, frente a concepção aristotélica dominante, foi o importante passo para o rompimento com a ideia de mundo celeste incorruptível de Aristóteles. Posto que, se o aparecimento da nova, em 1572, demonstrava que novos corpos celestes podiam surgir na região das estrelas fixas, contradizendo a incorruptibilidade do mundo supralunar aristotélico, o surgimento do cometa, em 1577, mostrava que um corpo na região além da esfera da Lua podia também vaguear como os planetas, portanto, percorrer o céu.

Com efeito, a transição da interpretação dos cometas do domínio da meteorologia para a astronomia, como fenômenos celestes e não mais terrestre, se constituiu em um trunfo para o sistema astronômico copernicano, à medida que o movimento dos cometas pôde ser visto como um *problema empírico anômalo* contundente para as teorias astronômicas geocêntricas (LAUDAN, 2011).

Por consequência disso, uma nova pergunta surgia em relação a esse vaguear de corpos celestes, a saber: *como um corpo sólido transpassaria as esferas sólidas de cristal?* (TOSSATO, 2004). Segundo Tossato (2004), Brahe prontamente respondeu que o corpo sólido não transpassaria, pois a presença do cometa era uma prova suficiente da não existência dessas esferas. Com isso, tanto a realidade física quanto essas próprias esferas caíam por terra, em face da sua não evidência observacional. Consequentemente, o confronto entre teoria e evidência empírica se mostrou um ponto fundamental da prática científica. Por conseguinte, depois de iniciar o rompimento com as ideias aristotélicas apontadas acima, Brahe passou a criticar, primeiramente, o uso do equante na teoria planetária de Ptolomeu.

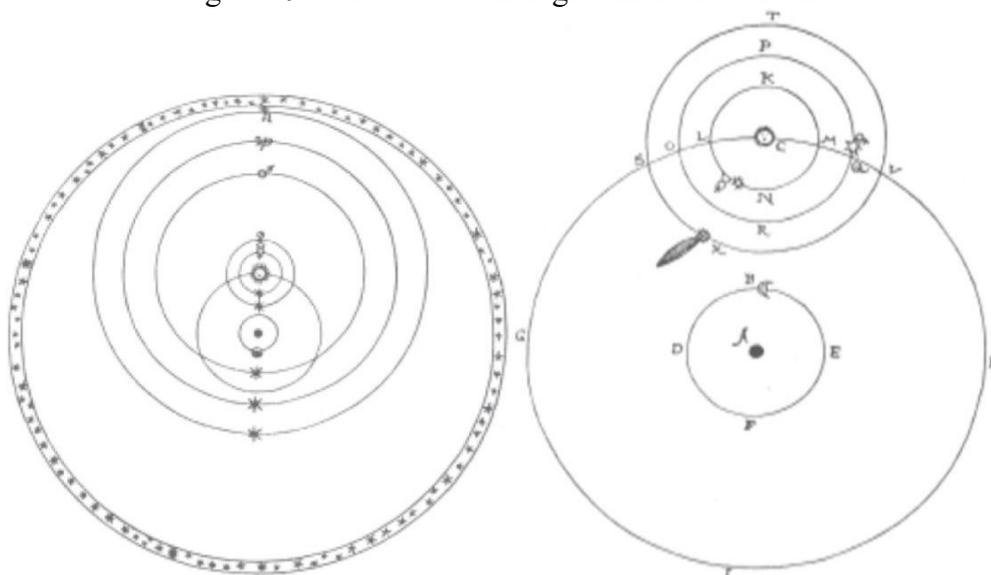
Como eu tinha observado que aquela velha distribuição dos orbes celestes de Ptolomeu não está ajustada e é superabundante de epiciclos, distribuição com a qual são justificados, com certa parte de desigualdades aparentes, os modos de ser dos planetas quanto ao Sol e as suas retrogradações; ainda mais, que essas hipóteses

pecam contra os próprios primeiros princípios da arte, tanto que elas admitem a uniformidade do movimento circular não vista do próprio centro [...] mas de um estranho, a saber, do centro de outro excêntrico (que chamam comumente de equante) [...]. (BRAHE, 1984, p. 174 *apud* TOSSATO, 2004, p. 548)

Nessa crítica, Brahe faz observações tanto da quantidade de epiciclos utilizados por Ptolomeu para explicar o movimento dos corpos celestes quanto da violação da premissa platônica do movimento circular uniforme pelo uso do equante. Contudo, mesmo que Brahe tenha aceitado a premissa platônica do movimento circular uniforme para as órbitas dos corpos celestes, ele teve de usar os mesmos artificios de Ptolomeu (epiciclos, deferentes e equantes), para resolver o problema da primeira desigualdade, isto é, das inconstâncias das distâncias planetárias (TOSSATO, 2004).

Valendo-se da ideia de Copérnico e de Heráclides de Ponto, em seu livro *On the Most Recent Phenomena of the Aetherial World – Sobre os Fenômenos Mais Recentes do Mundo Etéreo –*, Brahe estabeleceu que os demais planetas girassem em torno do Sol, a fim de resolver o problema empírico do movimento retrógrado dos planetas (HALL, 1970). Uma ilustração do seu modelo cosmológico híbrido é apresentada na (Figura 49).

Figura 49 – Modelo cosmológico híbrido de Brahe.



Fonte: Tossato (2004, p. 549).

Na figura 49, lado esquerdo, Terra está estacionária no centro do universo, com a Lua e o Sol girando ao seu entorno. Já no lado direito, Brahe ilustra esse mesmo modelo, colocando o cometa, de 1577, na curva da órbita de Vênus, acima da órbita da Lua, para

demonstrar a região de seu aparecimento, em contraste com as ideias aristotélicas que condicionavam o acontecimento desse fenômeno no mundo sublunar.

Não obstante, depois das críticas lançadas contra a astronomia de Ptolomeu, Brahe passou a criticar o trabalho de Copérnico, dizendo o seguinte:

[...] e porque considero, ao mesmo tempo, a inovação desse grande Copérnico, que pretende reinstalar o pensamento de Aristarco de Samos [...] porque ele procurou resolver sabiamente todas as disposições inúteis e indiferentes que se encontram em Ptolomeu, não pecando em nada contra os princípios da matemática, mas que, entretanto, ele resolveu agitar os corpos grandes, pesados e difíceis de mover da Terra [...] por movimentos triplos iguais aos astros luminosos etéreos, que se opõem não apenas aos princípios físicos, mas aos autores de textos Sacros que confirmam a fixidez da Terra [...] porque observei no interior dessas duas hipóteses admitidas grandes absurdidades, procurei refletir de outra maneira, pois, se alguma razão para as hipóteses pudesse ser encontrada, de uma parte matematicamente, de outra parte fisicamente, todos os lados seriam estabelecidos corretamente, de tal forma que elas não estariam mais sujeitas às censuras teológicas e satisfazem totalmente as (coisas) celestes. Finalmente, a ordem das revoluções celestes vem a ser disposta muito comodamente por certa conformação, fechando todas as inconveniências, por aquilo que eu comuniquei brevemente para aqueles que cultivam a filosofia celeste. (BRAHE, 1984, p. 133 *apud* TOSSATO, 2004, p. 546)

Em face dessas observações, as críticas contra o sistema copernicano foram ainda mais contundentes. Para Brahe, Copérnico explicava os movimentos de retrogradação dos planetas, colocando a Terra em movimento, mas criava dois inconvenientes, ainda piores, um de ordem física e outro de ordem teológica. Pois em sua concepção, “as *sagradas escrituras* eram mais condizentes com uma Terra estática do que com uma Terra em movimento de rotação e de translação” (TOSSATO, 2004, p. 551) – essas objeções religiosas serão discutidas logo a seguir.

Contudo, ao tentar contornar esses problemas agudos do sistema copernicano, os estudos de Brahe fomentaram outros novos problemas empíricos. Por exemplo, *O que faz com que os planetas se movem, quando não existem as sólidas esferas cristalinas de Aristóteles, responsáveis pela condução do (movimento) dos planetas no céu?* (TOSSATO, 2004).

Juntamente com essa pergunta, outras também surgiam, a saber: *Como os planetas se movem num espaço que não comporta um mecanismo sólido?* Ou, *Como os planetas se movem em um espaço supostamente vazio?* Em outra pergunta ainda mais contundente, os astrônomos pensavam: *Que explicação pode ser construída para um espaço vazio, no qual as órbitas dos planetas se intersectam?* (TOSSATO, 2004).

Essa última pergunta, possivelmente, tornou-se a fonte da suposição de uma espécie de ação à distância, no século XVII, primeiro com Kepler e depois com Newton (KOESTLER, 1989).

Além disso, as principais implicações dessas perguntas incidiam no fato de que uma explicação via suposição das esferas sólidas aristotélicas, proporcionava um aporte que justificava os movimentos dos planetas, servindo no âmbito da cosmologia como uma espécie de explicação física. Contudo, sem esse aporte, tanto os adeptos de Aristóteles quanto os adeptos da astronomia copernicana se viram privados de um aporte teórico que sustentasse a solução dos movimentos planetários.

Nesse sentido, quando se considera que a revolução científica tem origem na destruição do cosmos aristotélico e a tudo a ele associado, em termos metodológicos e ontológicos (KOYRÉ, 2002), essas perguntas não deixam dúvidas do seu apoio empírico e conceitual para o desenvolvimento das implicações copernicanas, como também ressaltam o papel fundamental de Tycho Brahe nesse processo.

De modo geral, Brahe foi muito importante no processo de instauração da ciência moderna, no século XVII, especialmente, por sua ideia de “correções instrumentais”, que mudou o enfoque da astronomia de posição. Sobre essas correções, ele escreveu:

Observava as estrelas – com o auxílio de uma arbaleta – [...] e anotava os meus resultados numa pequena caderneta que ainda possuo. Percebi logo que as distâncias angulares determinadas com o auxílio do raio e reduzidas a valores numéricos não concordavam bem entre si. Logo que descobri a causa, elaborei uma tabela com a ajuda da qual podia corrigir os erros do instrumento. (BRAHE, 1984, *apud* TOSSATO, 2004, p. 554, em nota).

Nesse contexto, as observações mais acuradas necessitavam de instrumentos cada vez mais precisos, e com plena consciência dos erros inerentes a quaisquer medidas, independentemente da acurácia do instrumento, Brahe tornou-se o iniciador dessa mentalidade no âmbito da astronomia (PEDUZZI, 2018a).

Posteriormente, a influência de Brahe e a importância de seus dados astronômicos irão permitir a Kepler não somente solucionar o problema anômalo da órbita de Marte, como também lançar as bases para a constituição de uma nova astronomia. Feito que, de acordo com Kuhn (2011), tornou-se uma das representações concretas da *revolução científica* ocorrida no século XVII, em termos do nascimento de uma ciência moderna.

### 10.3 AS CRÍTICAS DE CUNHO RELIGIOSO CONTRA O SISTEMA COPERNICANO

As objeções de ordem religiosa ao sistema astronômico copernicano vão surgir pela interpretação da Bíblia, ao pé da letra, por alguns cristãos e protestantes adeptos à doutrina aristotélica (BERNARD, 1955). Nesse contexto, o problema conceitual externo implicado na visão de mundo geocêntrica continuava com um forte conflito cognitivo para a aceitação do sistema copernicano. Segundo esses cristãos e protestantes aristotélicos, “a *Sagrada Escritura* parecia confirmar essa convicção geral, pois no (salmo 103), se diz que Deus fundou a Terra em firmes alicerces” (BERNARD, 1955, p. 18).

Do mesmo modo, sobre o Sol, “diz a *Sagrada Escritura* que Josué o mandou parar” (Idem). Esse feito religioso, conhecido como “o milagre de Josué”, tem como passagem o seguinte trecho: *Sol detém-te sobre Gabaon, E tu, lua, sobre o vale de Ascalon! E o sol parou, a lua se manteve imóvel, Até que o povo se tivesse vingado dos seus inimigos* (JOSUÉ, s/a, p. 15). Dessa passagem, percebe-se que o conflito cognitivo encontrava-se na dificuldade de conciliar não somente às duas ideias completamente antagônicas, a geocêntrica *versus* a heliocêntrica, mas também o aspecto físico de acreditar no movimento da Terra.

Em conformidade, uma segunda objeção foi lançada por Martinho Lutero, autor da *Reforma Protestante*, que tratou Copérnico como um tolo. Lutero proferiu sua crítica dizendo: “Foi citado um novo astrólogo, este queria provar que a terra se move e circula, e não o céu ou o firmamento, sol e a lua [...]. Mas indica a *Sagrada escritura*, que Josué mandou parar o sol, não a terra” (BERNARD, 1955, p. 18).

Em outra objeção, um pregador protestante, seguindo Lutero, em 1589, disse que: “Toda nova astronomia é uma obra miserável, como também o que Copérnico ensinou é contra a *Sagrada Escritura* e, por conseguinte, foi rejeitado por Lutero” (Idem). Apesar do peso dessas objeções, Copérnico contava com alguns adeptos de suas ideias. Por exemplo, um Cardeal chamado de Pazmany, ao defender o sistema copernicano, afirmara que “na *Sagrada Escritura* não se podia inferir nada contra Copérnico”, pois “a Bíblia não queria ensinar ciências naturais, e se expressava segundo as aspirações comuns de falar” (Idem).

Na segunda metade do século XVI, os eruditos faziam conferências na Itália sobre a astronomia de Copérnico, ao mesmo tempo em que o seu trabalho era inserido na universidade espanhola de Salamanca, contexto no qual é possível dimensionar um pouco mais o peso das objeções religiosas contra as ideias copernicanas, como um problema

conceitual externo agudo para planificação da nova tradição de pesquisa europeia renascentista.

Acerca disso, muitas das dificuldades de aceitação da nova visão de mundo presente no sistema copernicano, estavam associadas a alguns aspectos relativos ao contexto cultural de percepção da importância da ciência (DOMINGUES, 1996). Por exemplo, a ciência na Idade Média europeia representava um modo de conhecimento secundário, ou uma atividade espiritual de segunda classe, uma vez que somente a filosofia e a teologia, em última instância, eram dignas de crédito.

Na principal implicação desse fato, aceitar as ideias copernicanas e as mudanças de visão de mundo que elas provocavam perpassava por acreditar nas ideias científicas como “verdades” de primeira ordem e dignas de crédito, do mesmo modo que se acreditava na filosofia e na teologia. Portanto, somente dentro dessa grande mudança de valorização científica é que as ideias copernicanas poderiam irradiar as formidáveis consequências vitais que preconizavam.

A reverberação desse peso, atribuído a filosofia e a teologia, em conjunto com as objeções religiosas ao sistema copernicano, ficou evidente na assimilação do copernicanismo na Espanha, muito em face das dificuldades de uma mudança em particular. A saber, devido ao critério de verdade da astronomia produzir outra mudança na crença geral e no critério de “verdade” assumido, especialmente, pela religião e cultura europeia (DOMINGUES, 1996).

Na Espanha, a assimilação do sistema copernicano se deu, muito mais, por suas contribuições instrumentais para a navegação e a cartografia marítima. Os espanhóis assumiram apenas as teses de Copérnico como uma explicação estritamente astronômica, na época, entendida como uma técnica e não uma disciplina de cunho também teórico. Portanto, o interesse dos espanhóis foi alimentado, sobretudo, pelas demandas náuticas da cosmografia – astronomia descritiva –, da cartografia e da astrologia. Por conseguinte, no currículo da universidade de Salamanca, em meados do século XVI, os temas astronômicos eram:

[...] ensinados juntamente com a matemática, as operações fundamentais da aritmética e a geometria dos seis livros de Euclides. Os ensinamentos astronômicos estavam também em íntima relação com os de medicina, uma vez que a astronomia era considerada fundamental na compreensão da influência dos corpos celestes sobre a vida dos homens. E, na hierarquia acadêmica da universidade, a cátedra de astronomia ocupava um lugar secundário no conjunto das disciplinas. Particularmente em Salamanca, cuja orientação fundamental era para a formação de juristas e teólogos, o peso dessa hierarquia se fazia notar. (DOMINGUES, 1996, p. 13)

Os interesses específicos dos espanhóis na astronomia copernicana para com a náutica, a cosmografia e a reforma do calendário, se davam justamente porque a astronomia copernicana permitia, a partir de seus cálculos matemáticos, maior rigor na confecção de calendários e nas técnicas de navegação. Essas utilizações instrumentalistas foram desconectadas do sentido filosófico que o trabalho de Copérnico implicava, para a época, além da precisão de seus cálculos.

O mais importante disso, é que o modo como se deu a reforma da escolástica na península ibérica, não deixou espaço para que o copernicanismo fosse assimilado como uma nova alternativa filosófica. “Ao invés de lerem Copérnico como uma filosofia, como fizeram Bruno, Kepler e Galileu, os ibéricos o leram, em geral, como um matemático” (DOMINGUES, 1996, p. 14). Em outras palavras,

A atitude inicial da Igreja Católica e Protestante de aceitar o copernicanismo, como uma nova teoria astronomia matemática, ignorando suas implicações ou consequências heréticas, nos ajuda a entender porque a difusão do copernicanismo, principalmente entre os astrônomos e cosmógrafos, não foi prejudicada pelo avanço da Contra-Reforma na Espanha e em Portugal. Em geral, porém, essa adoção teve um caráter pragmático semelhante [...] à assumida pela Ordem dos Jesuítas. (DOMINGUES, 1996, p. 14-15)

Por fim, diante do impacto dessas objeções religiosas, a assimilação da astronomia copernicana na Espanha se enquadrava na sugestão do polêmico prefácio escrito por Osiander no *De Revolutionibus Orbis Coelestium*, qual seja: interpretar as hipóteses de Copérnico como teses matemáticas não comprováveis ou “verdadeiras”. Portanto, nesse país, essa sugestão adquiriu a “feição de uma verdadeira estratégia de combate a Galileu, após o decreto de 1616 ter condenado o heliocentrismo copernicano, o qual persistiu na Ibéria, até o século XVIII” (DOMINGUES, 1996, p. 15).

Fazendo um contraponto, a aceitação do sistema copernicano na Inglaterra foi diferente. Lá as ideias centrais de Copérnico foram estudadas e defendidas pelo astrônomo e matemático, contemporâneo de Brahe, Thomas Digges (1546 - 1595). Digges apoiou-se na determinação da posição da nova estrela, para criticar o cosmos aristotélico e afirmar que teorias alternativas sobre o universo poderiam ser consideradas. Em razão disso, ele proferiu “uma afirmação ousada, desde que a Igreja Católica passou a considerar qualquer sugestão cosmológica alternativa como herética” (O’CONNOR; ROBERTSON, 2020, p. 2).

Por conseguinte, esse astrônomo traduziu parte do livro, *De Revolutionibus Orbis Coelestium*, acrescentando nessa tradução suas próprias ideias acerca de um universo infinito

com as estrelas em diferentes distâncias, em um espaço também infinito. Digges publicou um livro, *A perfect Description of the Celestial Orbes – Uma perfeita descrição das órbitas celestes* –, em 1576, buscando reafirmar novamente a defesa do sistema copernicano (assunto do próximo capítulo 11).

Dessa forma, se por um lado a astronomia de Copérnico sofreu várias críticas de natureza empíricas, conceituais e até religiosas, após seu advento, por outro, seguindo a defesa de Thomas Digges na Inglaterra, na Itália, dois dos importantes personagens da ciência moderna, Giordano Bruno (1548-1600) e Galileu Galilei (1564-1642) vão surgir como os defensores mais proeminentes do sistema copernicano.

Dessa forma, no próximo capítulo 11, torna-se importante abordar a defesa do sistema copernicano por Bruno e, em seguida, por Galileu, destacando, respectivamente: os principais aspectos da defesa de Bruno, a partir de suas principais obras filosóficas; bem como os argumentos de Galileu, juntamente com a importância de suas observações telescópicas iniciadas a partir de 1609.

Nesse sentido, mostrar como as implicações astronômicas, cosmológicas, físicas, filosóficas, metafísicas e religiosas implicada na astronomia copernicana fomentaram o crescimento do pensamento científico europeu, na direção da constituição de uma nova tradição de pesquisa e, mais posteriormente, na concepção da teoria da gravitação universal newtoniana.

## 11 A DEFESA DO SISTEMA COPERNICANO POR BRUNO E GALILEU

No capítulo anterior, foram apresentadas e discutidas as críticas lançadas contra o sistema astronômico copernicano em dois momentos históricos, durante a vida de Copérnico e depois de sua morte. Tanto no primeiro quanto no segundo momento, essas críticas se materializaram em novos problemas empíricos e problemas conceituais, que foram responsáveis pela construção de uma *nova visão de mundo europeia*, alicerçada nas novas transformações científicas da astronomia, da cosmologia e da física.

Durante a vida de Copérnico, as críticas de seus opositores constituíram-se nas seguintes perguntas: *Por que os corpos caem em direção ao centro da Terra? Por que não somos atirados fora da Terra por sua rotação? Existe alguma experiência terrestre que mostre que a Terra se move? Qual a teoria física de movimento de Copérnico, se não aceita a física de Aristóteles?*

Posteriormente, depois da morte de Copérnico, os trabalhos de Tycho Brahe e suas críticas fomentaram mais perguntas, que também contribuíram para essas transformações científicas e, conseqüentemente, para a construção da nova visão de mundo, a saber: *como um corpo sólido transpassará as esferas sólidas de cristal? Como os planetas se movem num espaço que não comporta um mecanismo sólido? Ou, como os planetas se movem em um espaço supostamente vazio? Que explicação pode ser construída para um espaço vazio, no qual as órbitas dos planetas se intersectam?*

Nesse contexto de críticas, foram localizadas as objeções religiosas frente às implicações filosóficas, metafísicas e teológicas da astronomia copernicana, envolvendo a *Sagrada Escritura*. Objeções de muita relevância para o desenvolvimento do pensamento científico europeu, visto que a prática da ciência, em algumas universidades (Salamanca - Espanha), ainda era considerada como uma atividade de segunda categoria.

Não obstante, como serão discutidas neste capítulo, na Inglaterra e na Itália, apesar da forte objeção religiosa combativa, as ideias de Copérnico foram proeminentemente defendidas por dois expoentes personagem da história da ciência, Giordano Bruno e Galileu Galilei.

### 11.1. GIORDANO BRUNO E SUA DEFESA DO SISTEMA COPERNICANO

O filósofo italiano Giordano Bruno (1548 - 1600) é considerado um mártir da liberdade de pensamento. Como um dos principais defensores das ideias copernicanas na Itália, durante o *Renascimento científico europeu*. Em momento social conturbado, Bruno defendeu uma reforma nas áreas da filosofia, da teologia e da ciência, até então, dominadas pela *doutrina escolástica*. Uma corrente de pensamento dominante nas universidades europeias entre os séculos IX e XVI, ligada a uma tentativa de conciliação da fé cristã com o sistema de pensamento racional desenvolvido pelos gregos antigos, especialmente, Platão e Aristóteles.

Nas diversas cidades europeias por onde passou (Tolosa, Lião, Paris, Oxford, Londres, Wittenberg, Helmstadt, Praga, Pádua, dentre outras), Bruno defendeu as ideias de Copérnico professando abertamente outras consideradas como heréticas na perspectiva da fé cristã, especialmente, acerca da *Santíssima Trindade* (CANCIAN, 1988).

Nessa batalha ideológica e religiosa, Bruno fugiu da Itália, perseguido pela Inquisição, mas foi preso na cidade de Veneza e, posteriormente, condenado à morte, por ter se recusado a abjurar de suas convicções filosóficas. Brutalmente, ele foi queimado em uma fogueira, no dia 16 de fevereiro de 1600, na praça pública do Campo das Flores, em Roma. Somente em 1889, o Vaticano lhe erigiu uma estátua, honrando-o com mártir do pensamento livre.

Nesse contexto, sua defesa do sistema copernicano encontra-se em um de seus livros, *La cena de le Ceneri – A ceia de cinzas* – escrito em italiano e em formato de diálogos, envolvendo quatro personagens, em torno do debate das ideias copernicanas. Nesse debate, destacam-se Teófilo, o “filósofo” – o álter ego de Bruno – e Prudêncio, o “pedante” – defensor da doutrina aristotélica e do pensamento científico, filosófico e teológico tradicional (LOPES Ideusa, 2014). Segundo Yates (1964), é possível que esse diálogo tenha ocorrido, provavelmente, na casa de um fidalgo inglês chamado Sir Fulke Greville na Quarta-Feira de Cinzas de 1584, em Oxford. Por sua vez, essa obra é o primeiro momento em que Bruno expõe a sua adesão ao modelo cosmológico heliocêntrico, com críticas contundentes ao modelo cosmológico geocêntrico (LOPES Ideusa, 2014).

Na descrição cosmológica proposta por Bruno, encontram-se elementos, como a existência de inumeráveis mundos em um universo infinito, que não estavam presentes nas ideias do sistema copernicano. Nesse sentido, o interesse fundamental de Bruno em defender

as ideias de Copérnico estava centrado na afirmação de que a Terra se move e que não se encontra no centro do universo.

Para Bruno, Copérnico fixou o pé – uma de suas sete exigências para a reforma da astronomia – ao determinar na sua alma, e abertamente confessado (ao sumo pontífice, o Papa), que no final se deve concluir necessariamente que a Terra se move. Elogiando Copérnico pela bravura de sua ideia, frente à predominante visão de mundo aristotélica, Giordano Bruno o considerava:

[...] superior por ter-se libertado de alguns falsos pressupostos, para não dizer da cegueira, da filosofia comum e vulgar. No entanto, ele não se afastou muito dela, porque, ao ser mais estudioso da Matemática que da natureza, não pôde penetrar e aprofundar a ponto de arrancar as raízes de princípios vãos e inconvenientes e, com isso, resolver perfeitamente todas as dificuldades contrárias, libertando-se a si mesmo e aos outros de tantas investigações vãs, a fim de contemplar as coisas constantes e certas. (BRUNO, 2012, p. 25 *apud* Carolino, 2012, p. 399)

Nesse contexto de exaltação, o plano de Bruno era dar início a uma transformação radical, que fosse capaz de alterar o conhecimento e a ação do homem renascentista europeu. É nesse cenário que sua obra, *A ceia de cinzas*, tornou-se uma peça-chave para iniciar a reforma filosófica, teológica e científica, de sua época – algo que se tornou muito perigoso.

Em uma de suas peregrinações pela Inglaterra, especialmente, na cidade Oxford, perante eruditos escolásticos e estudiosos ortodoxos, Bruno exaltou Copérnico, mais uma vez, dizendo: “A ele (Copérnico) devemos a nossa libertação de vários preconceitos da filosofia comumente recebida, a qual não chegaria a chamar cegueira” (YATES, 1964, p. 263) – referindo-se à filosofia aristotélica.

Em sua concepção, o trabalho de Copérnico era apenas o começo de uma grande revolução, que ele poderia dar ao pensamento científico europeu. Dessa forma, diante dos eruditos de Oxford, Bruno exclamou:

Quem, então, haveria de tratar esse homem (Copérnico) e sua labuta com tão ignóbil descortesia que se esquecesse das suas realizações e do seu aparecimento divinamente ordenado, como a alvorada que precede o pleno nascer do sol da antiga e verdadeira filosofia, depois de ela ter estado, durante séculos, enterrada nas sombrias cavernas da cega e invejosa ignorância; e quem o julgará, em razão de algumas omissões na sua obra, como um pensador de igual nível ao rebanho vulgar, que oscila de um lado para outro conduzido pela brutal superstição? Não deveria ele ser contado entre aqueles cujo grande espírito lhes permitiu elevarem-se, sob a fiel orientação do olho da inteligência divina? (YATES, 1964, p. 64)

Ao observar atentamente esta passagem, sua principal implicação está associada à visão que Bruno tinha de Copérnico, isto é, um astrônomo que restabeleceu a autonomia do cálculo matemático na descrição dos fenômenos celestes, a partir das relações entre suas hipóteses e demonstrações matemáticas – aqui se deve destacar apenas a resolução dos principais problemas empíricos resolvidos pelo sistema copernicano.

De acordo como Bruno, se Cristóvão Colombo recebeu as honras por “descobrir” o Novo Mundo, o que pode ser dito então de um homem (Copérnico) que encontrou um modo de subir ao céu (YATES, 1964). Para Bruno, Copérnico liberou o espírito humano e deu liberdade ao saber, visto que a “inteligência humana sufocava-se no ar abafado de uma prisão estreita, onde só de modo tênue, e, por assim dizer, através de frestas ela podia contemplar as estrelas distantes” (Ibid., p. 264). Contudo, como astrônomo e matemático ele permaneceu num espaço finito, circunscrito pelas estrelas fixas, heterogêneo, dotado de um centro definido, justamente, por ele ter sido um astrônomo matemático e ter deixado para os filósofos da natureza a discussão da infinitude do universo (LOPES Ideusa, 2014).

Acerca disso, o próprio Copérnico, no debate da finitude ou infinitude do universo, afirmou o seguinte: “deixemos, pois, que os físicos (entenda-se, filósofos) disputem se o mundo (Universo) é finito ou infinito, tendo nós como certo que a Terra é limitada pelos seus polos (sic) e por uma superfície esférica” (COPÉRNICO, 1984, p. 40).

Fazendo uma menção às objeções religiosas e científicas ao sistema copernicano, mediante o uso de figuras de linguagem, Bruno afirmou que “suas asas”, isto é, suas ideias, “foram cortadas (reprimidas e ofuscadas), para que não voassem para o alto, uma vez que atravessando o véu das nuvens, não visse o que realmente existe além delas – o infinito – e se libertasse das tolas imaginações” (YATES, 1964, p. 265), isto é, do cosmos aristotélico e tudo a ele associado.

Vale lembrar que Bruno foi além de Copérnico, justamente, por que esse astrônomo acreditava na existência das esferas e não entrou na discussão da infinitude do universo. Para esse filósofo, Copérnico foi impedido dessa compreensão por aqueles que “impuseram, como muitas espécies de enganos, brutais loucuras e vícios ao mundo, sob o disfarce da virtude, da teologia e da disciplina” (YATES, 1964, p. 265). Por sua vez, esses enganos ofuscavam a luz que confirmava e aprovava a ignorância dos opositores às ideias de Copérnico. Em face disso, perante os eruditos de Oxford, Bruno exclamou novamente:

Contemplai, agora, diante de vós o homem que transpassou os ares e penetrou no céu, abriu caminho entre as estrelas e ultrapassou as margens do mundo, que rompeu as divisões imaginárias entre as esferas – a primeira, a oitava, a nona, a décima, a que quiserem – descritas na falsa matemática da cega e popular filosofia. Pela luz do senso e da razão, com a chave da mui diligente indagação, escancarou os portais da verdade [...] e arrancou os véus que cobriam a face da natureza. Deu olhos às toupeiras cegas, iluminou os que não viam a sua própria imagem num dos inumeráveis espelhos da realidade, que os rodeavam por todos os lados; desligou as mudas línguas que pouco se importavam com as discussões intrincadas; fortaleceu os membros aleijados, fracos demais para fazer a jornada do espírito, da qual não é capaz a vil matéria. (YATES, 1964, p. 265)

Com um dos principais elementos dessa exclamação, encontra-se o rompimento de Bruno com as esferas celestes aristotélicas que, à época, ainda eram vistas majoritariamente como responsáveis, no âmbito astronômico e cosmológico, por sustentar uma explicação física do movimento dos planetas e alocar as estrelas fixas.

Para Bruno, as ideias de Copérnico tornavam-se uma espécie de sinal da profunda transformação científica que estava a caminho, acerca de uma nova ideia de universo infinito, que não somente reverberasse em uma nova filosofia, teologia e visão de mundo, como também em uma nova ordem social, política e religiosa (LOPES Ideusa, 2014). Portanto, em sua época, com certeza, esse plano audacioso amedrontou seus oponentes, de tal modo, que isso se tornou o elemento principal de sua perseguição e condenação – injusta pelo Tribunal da Inquisição.

Por fim, diferentemente de Copérnico, Giordano Bruno expôs abertamente suas próprias ideias acerca da infinitude e homogeneidade do universo. Neste universo, ele concebia os astros se movendo de forma livre, impulsionados apenas por sua alma, em um espaço preenchido pelo éter.

Ele também concebeu a existência de outros mundos e sistemas planetários diferentes. Acerca da visão sobre a Terra, assim como Copérnico, Bruno a concebia como um astro igual a qualquer outro planeta girando em torno do Sol. Em sua concepção, a natureza infinita do universo espelhava a infinitude do poder divino, em uma forte dimensão metafísica e teológica, semelhante à de Nicolau de Cusa.

Nesse sentido, a extensão e importância dos trabalhos de Bruno para o desenvolvimento do pensamento científico europeu, singelamente descrito aqui, estavam muito além de seu tempo. Por isso, para dar continuidade a esse momento da história da astronomia, da cosmologia e da física, os trabalhos de outro personagem italiano, Galileu, tornam-se ainda mais importantes no conjunto das transformações almeçadas por Bruno.

## 11.2 GALILEU GALILEI O DEFENSOR MAIS PROEMINENTE DO SISTEMA COPERNICANO

O italiano Galileu Galilei (1564 - 1642) é considerado “o defensor mais proeminente da imagem de mundo copernicana” (RENN, 2009, p. 12). No entanto, como não é possível discutir em profundidade e extensão todas as suas obras, neste texto, procura-se apresentar alguns aspectos de suas observações telescópicas, iniciadas a partir de 1609, e de seus argumentos a favor do sistema copernicano.

Nesse sentido, suas observações encontram-se na obra *Sidereus Nuncius – A Mensagem das Estrelas* – publicada em 1609, e seus argumentos encontram-se ao longo de alguns trechos da obra *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a Due Nuove Scienze – Discursos e Demonstrações Matemáticas acerca de Duas novas Ciências* – publicada em 1632. Além disso, é importante observar que alguns especialistas nos estudos de Galileu distinguem o seu trabalho, de modo geral, em três fases: a primeira contemplando o início de sua produção científica até 1610; a segunda, desse ano até 1633, ano de sua condenação; e a terceira fase, estendendo-se até sua morte, em 1642.

Outros pontos de destaques perpassam por dizer que, além das duas obras citadas: (i) Galileu, até 1609, também produziu pequenos textos científicos e um grande tratado sobre movimento, *De Motu - Sobre o Movimento* – não impresso, que contém algumas críticas à física de Aristóteles, alicerçadas na física do *impetus* de Jean Buridan; (ii) de pois de 1610, Galileu publicou outros trabalhos, a saber, *Discursos acerca das Coisas que Estão sobre a Água ou que Nela se Movem, o Relato e Demonstrações sobre as Manchas Solares e seus Acidentes, O Ensaizador, Diálogos sobre os Dois Máximos Sistemas de Mundo, cartas e respostas* breves sobre a verdade bíblica, o movimento da Terra e outros assuntos. Dentre essas obras, *Discursos e Demonstrações Matemáticas acerca de Duas novas Ciências* tornou-se a mais importante, do ponto de vista técnico-científico, pois contém uma síntese das contribuições de Galileu para a construção de uma nova física, isto é, não mais submetida às premissas aristotélicas cosmológicas, filosóficas, lógico-verbais e metafísicas (RENN, 2009).

É importante dizer também que, as observações telescópicas de Galileu enfrentaram muitas dificuldades para serem aceitas. Por exemplo, uma das causas dessas dificuldades residia no fato de suas primeiras lunetas não terem acompanhado a grande circulação de seu livro (quinhentas e cinquenta cópias enviadas para diversas partes da Europa) – o que poderia auxiliar seus interlocutores a tirar suas dúvidas sobre a veracidade das observações.

Outro motivo se deve ao fato dos astrônomos de sua época não terem se convencido de imediato da realidade física dos fenômenos observados. Muito dessa resistência, nesse período, foi porque a força contundente da cosmologia aristotélica se contrapunha à plausibilidade de aceitação dos fenômenos celestes observados por uma simples luneta (CAMENIETZKI, 1987). Em outras palavras, as imagens de instrumento rudimentar não eram suficientes para enfrentar toda malha conceitual aristotélica sistematizada ao longo dos séculos, por uma série de argumentos lógicos, metafísicos, astronômicos e físicos. Contudo, isso não diminui sua importância como um marco da produção e reconhecimento de Galileu no mundo artístico e científico, nem como uma rica fonte de grandes debates filosóficos ocorridos no século XVII (CAMENIETZKI, 1987).

Para os astrônomos, eruditos escolásticos e os leigos interessados no assunto, à época, era muito difícil aceitar a existência de (crateras e montanhas na Lua, luas em Júpiter, fases de Vênus, estrelas invisíveis da Via Láctea, manchas solares). Uma vez que a incorruptibilidade do mundo supralunar, a perfeição dos corpos celestes e a centralidade da Terra eram prerrogativas fundamentais da própria organização da visão de mundo aristotélica. Uma visão compatibilizada com a hierarquização do espaço, no sentido religioso, no qual se distinguia o local da criação, isto é, a Terra no centro do universo, dos Santos e de Deus, no céu, como retratado poeticamente na *Divina Comédia* de Dante Alighieri.

Adiantando as implicações dessas observações de Galileu em favor do sistema copernicano, “a ideia de que haveria crateras na Lua era inaceitável para a doutrina escolástica, pois significava que ela não era esférica e, assim, a noção de que o céu é expressão da perfeição perdia o sentido” (CAMENIETZKI, 1987, p. 16-17). Da mesma forma, “admitir que exista um astro no mundo, além da Terra, que podia ser o centro do movimento de algo, era aceitar o poliocentrismo, destruindo a relação hierárquica do mutável ao eterno” (Ibid., p. 17). Assim como também, “defender que a Terra refletia a luz solar era, para um aristotélico, um absurdo tão grande quanto à difração dos elétrons para um físico do final do século XIX” (Idem). No desfecho da história, Galileu, em 1633, será condenado pelo Tribunal da Inquisição, por defender as ideias de Copérnico publicamente, mediante suas obras e cartas. Como também será impedido de ensinar e mantido em prisão domiciliar até o final de sua vida, ano de 1642. Destacado esses aspectos mais preliminares, nas próximas seções, serão abordar as observações de Galileu e alguns de seus principais argumentos em defesa do sistema copernicano.

### 11.2.1 As Observações Telescópicas de Galileu a Partir do Ano de 1609

Para realizar suas observações astronômicas, a partir de 1609, Galileu construiu seu próprio telescópio (Figura 50) – cuja invenção é de origem holandesa (DUPRÉ, 2009).

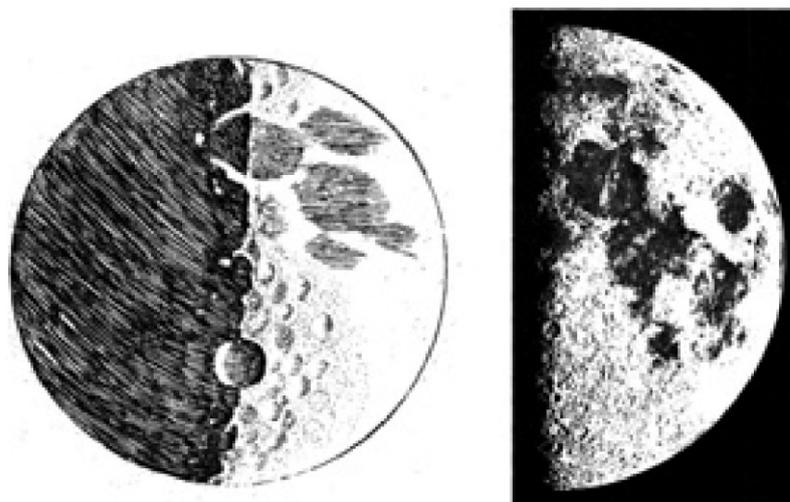
Figura 50 – Imagens de dois telescópios de Galileu.



Fonte: Museu de Florença.

De posse de seu telescópio, Galileu o apontou para a Lua, especialmente, nos dias depois de sua conjunção (Lua nova), e observou que a linha de demarcação entre a zona iluminada e a zona escura apresentava irregularidades (Figura 51).

Figura 51 – Representação artística de Galileu da superfície lunar.



Fonte: Peduzzi (2018a, p. 135) extraído de Bloom (1978, p. 120).

Ao observar a zona iluminada (Figura 51), à medida que a Lua se aproximava da sua quadratura (quarto crescente), Galileu notou a existência de pequenas regiões de sombra,

semelhantes às projetadas por cumes de montanhas nos vales ou planícies dentro do perímetro de suas estruturas. Essa constatação sobre o relevo irregular da Lua (montanhas e vales) era ao primeiro golpe contundente contra a perfeição dos corpos celestes esféricos e polidos, da visão de mundo aristotélica. Além disso, é importante dar atenção para a destreza de Galileu em interpretar suas observações da Lua, em aquarela, como fruto de sua formação artística na *Accademia Del Disegno*, Itália.

Essa formação lhe permitiu merecidamente se tornar um astrônomo famoso em toda a Europa e também na China, “transformando-se no Michelangelo das ciências e filósofo da corte dos Médici, em Florença” (RENN, 2009, p. 12) – pelo prestígio dos Médici, Galileu pôde usufruir de muitos privilégios, dentre eles, sair do anonimato acadêmico no qual se encontrava, até então. Não obstante, Galileu não foi o único astrônomo de sua época a registrar as irregularidades no relevo da Lua e de os outros fenômenos celestes. Por exemplo, esse feito também foi realizado pelo seu contemporâneo, o engenheiro e cientista inglês Thomas Harriot (1560 - 1621), considerado “o Galileu inglês” (RENN, 2009, p. 13). Destarte, Galileu apontou seu telescópio para as estrelas fixas e constatou que elas não apresentavam a mesma ampliação que a Lua, porém existiam inúmeras estrelas visíveis apenas com o telescópio (Figura 52).

Figura 52 – Imagem de Galileu sobre a Nebulosa de Órion.

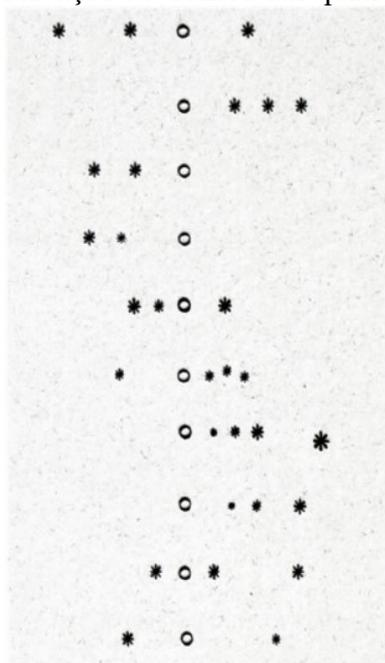


Fonte: Schemmel (2009, p. 23).

Na figura 52, “dentro de uma faixa de um a dois graus em torno de uma estrela conhecida Galileu observou com o seu telescópio umas 500 novas estrelas” (SCHEMMEL, 2009, p. 23). Com base em observações da Via Láctea, Galileu desenhou em seu livro *A Mensagem das Estrelas*, uma formação até então conhecida como “nebulosa da cabeça de Órion”, preenchida por 21 estrelas (Figura 52). A importância dessa observação reside no fato de que, pela primeira vez, o telescópio de Galileu transformava a Via Láctea em uma coletânea de incontáveis estrelas, demonstrando que a dimensão do Céu era muito mais extensa do que se pensava. Vale lembrar que, no que confere à discussão da infinitude do universo travada por Giordano Bruno, nem Galileu nem Kepler e Digges acreditavam que essa descoberta poderia ser compreendida fora do âmbito de uma esfera de estrelas fixas (SCHEMMEL, 2009).

Em outra observação, em 7 de janeiro e 2 de março de 1610, Galileu constatou a existência de quatro luas pertencentes ao planeta Júpiter. O que implicava em mais um golpe contundente contra a visão de mundo aristotélica, qual seja, a existência de um “pequeno sistema planetário”, em oposição à ideia aristotélica, que concedia a Terra o privilégio de ser o único centro do movimento de outro corpo celeste. Aproveitando-se dos prestígios lhes conferidos pela família Médici, Galileu a homenageou dando a essas quatro luas o nome de “planetas mediceanos” (Figura 53).

Figura 53 – Observação de Galileu das quatro luas de Júpiter



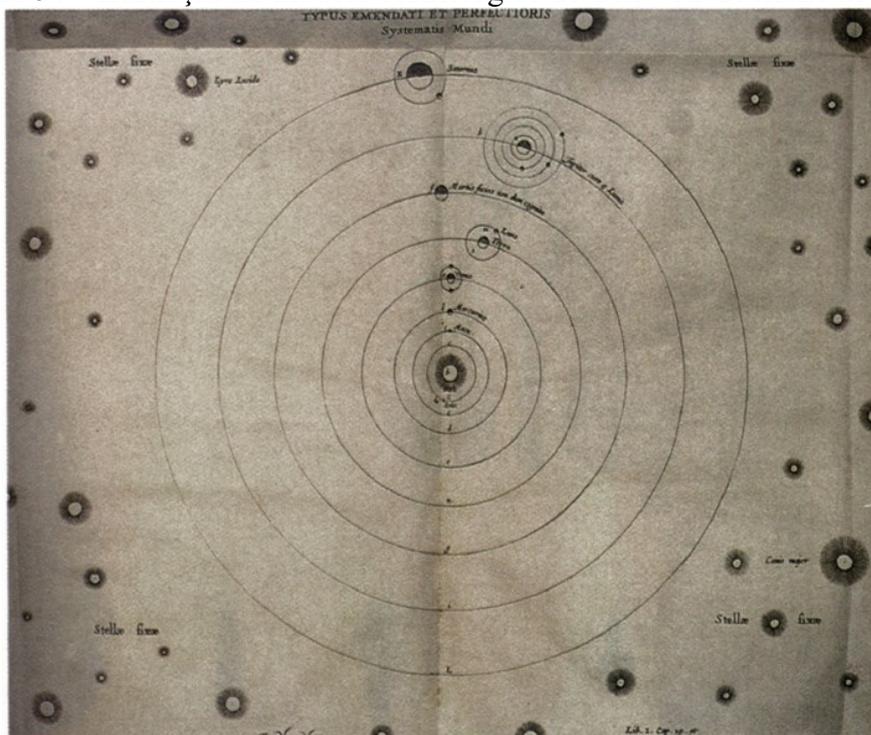
Fonte: Schemmel (2009, p. 24).

Na Figura 53, as quatro luas de Júpiter foram observadas por Galileu, na noite de 8 a 17 de janeiro de 1609, para compor a publicação do seu livro *A Mensagem das Estrelas*. Acerca dessas observações das quatro luas de Júpiter, Galileu escreveu:

Expusemos brevemente o que até agora observamos com respeito à Lua, às estrelas fixas e à Galáxia. Resta o que parece mais notável do presente trabalho, que é mostrar e dar a conhecer quatro planetas nunca vistos desde a criação até nossos dias e as circunstâncias de sua descoberta e observação, assim como suas posições e as observações realizadas nos dois últimos meses acerca de seus deslocamentos e mudanças. Convido a todos os astrônomos a se dedicarem à investigação e definição de seus períodos, coisa que não pudemos fazer em absoluto até hoje por falta de tempo. (GALILEU, 1987, p. 56)

Com essa sinalização, sabe-se que Thomas Harriot calculou os períodos de rotação das luas de Júpiter entre os anos de 1610 e 1611, realizando observações próprias. Meio século depois da invenção do telescópio, o físico e matemático Otto von Guericke (1602 - 1686) apresentou uma ilustração do Sistema Solar, ordenado de acordo com o sistema astronômico copernicano, mas incluindo as luas de Júpiter. Nesse novo sistema, não existe mais a ideia de uma esfera celeste limitando o cosmos, mas um mar de estrelas pulsantes (Figura 54).

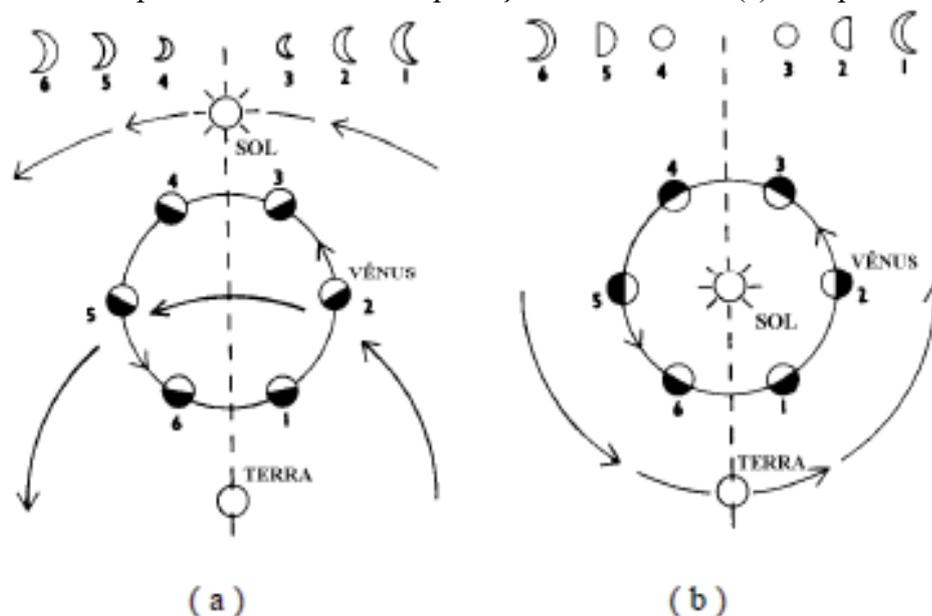
Figura 54 – Ilustração do modelo cosmológico de Otto von Guericke de 1672.



Fonte: Schemmel (2009, p. 25).

Ao final de 1610, Galileu descobriu que Vênus também apresentava fases, da mesma forma que a Lua (Figura 55), quando gira efetivamente em torno do Sol. E assim como a Terra, não tendo luminosidade própria, esse planeta é seis vezes maior na *conjunção superior* (Terra-Sol-Vênus) do que na *conjunção inferior* (Terra Vênus Sol).

Figura 55 – Aparência de Vênus nas previsões de Ptolomeu (a) e Copérnico (b).



Fonte: Peduzzi (2018a, p. 129).

Sobre as fases de Vênus, destaca-se que “apesar de não se constituírem em provas conclusivas do heliocentrismo [...], as quatro fases desse planeta não tinham explicação” (PEDUZZI, 2018a, p. 129), na astronomia de Ptolomeu. Mas o modelo híbrido de Tycho Brahe comportava o giro de Vênus em torno do Sol. Por isso, em favor da astronomia de Copérnico, apenas a determinação da paralaxe de uma estrela fixa poderia ser considerada como um peso científico importante (PEDUZZI, 2018a).

Entretanto, Galileu sabia que a Lua, a Terra, Vênus e todos os planetas conhecidos, apenas espalham a luminosidade do Sol que recebem. Logo, essa associação entre esses corpos celestes e a Terra tinha como objetivo principal destruir a relação hierárquica entre mundo supralunar perfeito e sublunar imperfeito de Aristóteles.

Por outro lado, é oportuno dizer, novamente, que, somente no início do século XVIII, o astrônomo inglês James Bradley (1693 - 1762) chegou a pensar ter feito essa medição da paralaxe. Apesar do seu engano, ele acabou por descobrir o fenômeno da *aberração da luz* – um fenômeno astronômico que produz um movimento aparente de objetos celestes nas

proximidades de suas locações dependendo da velocidade do observador – o qual, corretamente interpretado, também comprova a translação anual da Terra em torno do Sol. Mas, finalmente, em 1838, o físico, matemático e astrônomo Friedrich Wilhelm Bessel (1748 - 1846), em trabalho colaborativo, conseguiu a primeira comprovação confiável de paralaxes de estrelas fixas – ocasião em que o sistema copernicano já estava amplamente aceito.

Não obstante, além de observar as fases de Vênus, Galileu também olhou para os planetas Mercúrio, Marte e Saturno. Para os dois primeiros, ele constatou que, quando em oposição e diferindo apenas em escalas de tamanho, esses planetas eram tanto mais brilhantes, quando vistos do telescópio, como também muito maiores do que na conjunção.

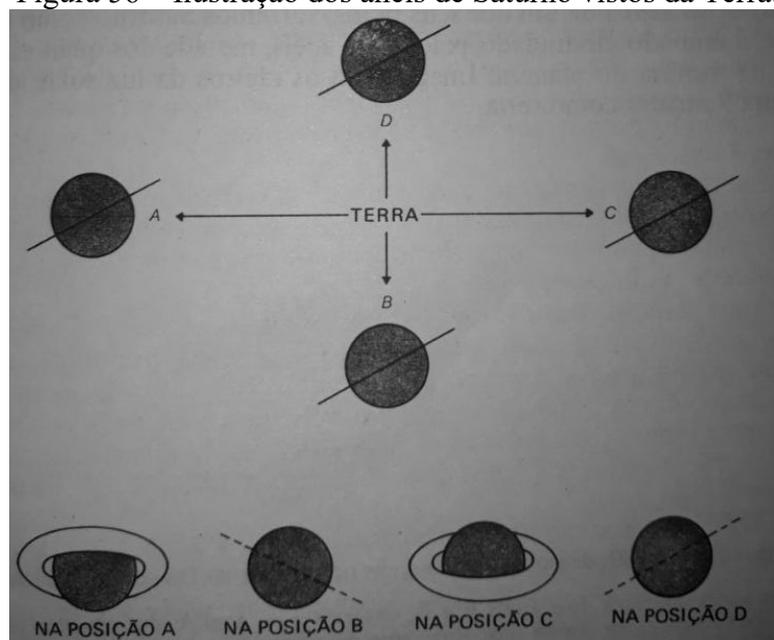
Sobre Saturno, observado no verão e outono de 1610, Galileu afirmou que ele era o mais elevado de todos, tinha a forma trigêmea e duas luas pequenas em lados opostos, mas bem próximas de si, dando-lhe a aparência de um planeta com um “par de orelhas” (ASIMOV, 1981). Mas, sem evidências claras dessas observações, devido à falta de precisão de seus instrumentos, Galileu foi impedido de descrevê-las com mais detalhes.

Nessa época, muitos astrônomos acreditavam que o que Galileu observou era, na verdade, pura ilusão de ótica. O astrônomo Christopher Scheiner (1575 - 1650), em 1614, descreveu os objetos no entorno de Saturno como “crescentes de luz diminutos com extremidades voltadas para saturno”, que julgou formarem algo semelhante “a asas de xícara de chá” (ASIMOV, 1981, p. 28). Por conseguinte, devido à imprecisão dos telescópios, a compreensão das observações precisou esperar por mais de 40 anos.

Em 1659, o astrônomo neerlandês Christian Huygens (1629 - 1695), mediante a construção de um telescópio melhor, pôde compreender claramente que os “aros” observáveis em Saturno “era um anel que circundava o planeta. Mesmo que ele se movesse à volta, uma parte estaria sempre projetada para cada lado do planeta, dando a impressão de aros sem movimento” (ASIMOV, 1981, p. 28). A Figura 56, a seguir, ilustra uma imagem dos anéis de Saturno visto a partir da Terra.

Nessa Figura 56, os anéis estão no plano do equador de Saturno. A inclinação do eixo desse planeta, um ângulo de  $27^\circ$  (graus) em relação ao plano de sua órbita em volta do Sol, é a condição que permite a observação dos seus anéis, os quais, coincidentemente, estão na mesma inclinação. Isso implica dizer que “os anéis mantêm a sua posição enquanto Saturno realiza o seu movimento de revolução, dando oportunidade aos astrônomos da Terra de terem a felicidade de ver os anéis de diferentes ângulos” (Ibid., p. 29).

Figura 56 – Ilustração dos anéis de Saturno vistos da Terra.



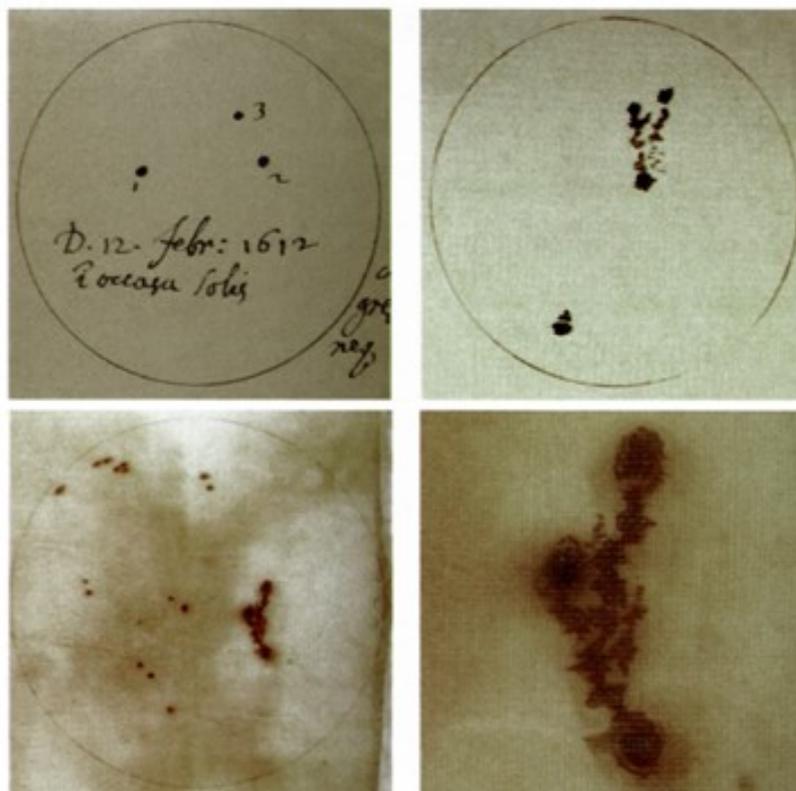
Fonte: Asimov (1981, p. 29).

Por fim, outro importante fenômeno celeste observado por Galileu foi o das *manchas solares*, conhecido desde a antiguidade, que foi sistematicamente observado e registrado por Galileu, a partir de julho de 1610, durante dois anos (BREDEKAMP, 2009).

No que diz respeito ao conhecimento dos antigos sobre esse fenômeno, “o monge e cronista inglês John de Worcester, desenhou as manchas solares em sua crônica de 1128” (BREDEKAMP, 2009, 2009, p. 47). Um “poeta saxão associou o aparecimento de uma grande quantidade de manchas solares, em janeiro de 814, à morte de Carlos Magno (742 - 814)” ((Idem)) – rei Sacro Império Romano-Germânico. Uma “representação impressionante datada do século XV, [também] anterior à invenção do telescópio, de origem da China” (Idem). E “segundo relato de origem russa, em 1365 e 1371, houve um sinal no Sol. Havia manchas escuras em sua superfície, como se prego tivessem sido cravados nele” (Idem).

O fenômeno das manchas solares observado por Galileu estar representado pela (Figura 57), a seguir. Na parte superior esquerda dessa figura estão os registros de 12 de fevereiro, e na direita, os registros de 1 de maio de 1612. Já na parte inferior (esquerda e direita), os registros de 3 de maio do mesmo ano. Galileu afirmou que “as manchas solares se deslocavam de oeste para leste, paralelamente ao equador solar, percorrendo a largura do disco em mais ou menos 14 dias” (PERNEIRO, 2009, p. 178).

Figura 57 – As manchas solares observadas por Galileu em 1612.



Fonte: Bredekamp (2009, p. 50).

Em face dessas constatações fenomenológicas (Figura 57), enquanto para Galileu esse fenômeno celeste representava uma prova importante para romper com a imutabilidade do mundo supralunar, para os jesuítas aristotélicos, como Scheiner, defensor da imutabilidade, “as manchas solares eram formadas pela agregação de inúmeros planetas que circundavam Sol” (MOSCHETTI, 2006, p. 316). Por conseguinte, “devido à sua interposição entre o Sol e o observador terrestre, a superfície solar nos parecia manchada” (Idem). Destaca-se que a objeção de Scheiner não diz respeito à veracidade das observações de Galileu, mas somente à hipótese da imutabilidade do mundo supralunar. Por exemplo, enquanto Galileu tomou como garantido que as manchas solares eram um fenômeno celeste, Scheiner, não convencido disso, teve muito trabalho para demonstrar o contrário, isto é, que elas não eram produtos dos olhos, do telescópio ou do ar.

Além de discutir suas observações, em três cartas endereçadas a um amigo chamado Marcos Welser, no final de 1611 (MOSCHETTI, 2006), Galileu também publicou, em 1613, suas impressões na forma de livro, *História e demonstrações em torno das manchas solares*. Mas apesar das afirmações de Galileu estarem fundamentadas nas observações, a principal polêmica para sua aceitação estava ligada ao problema de olhar para o Sol, devido às lesões

oculares que essa atividade causava. Por exemplo, o astrônomo alemão Johannes Fabricius (1587 - 1616), ao posicionar seu telescópio, em 9 de março de 1611, para olhar o Sol, afirmou que estava:

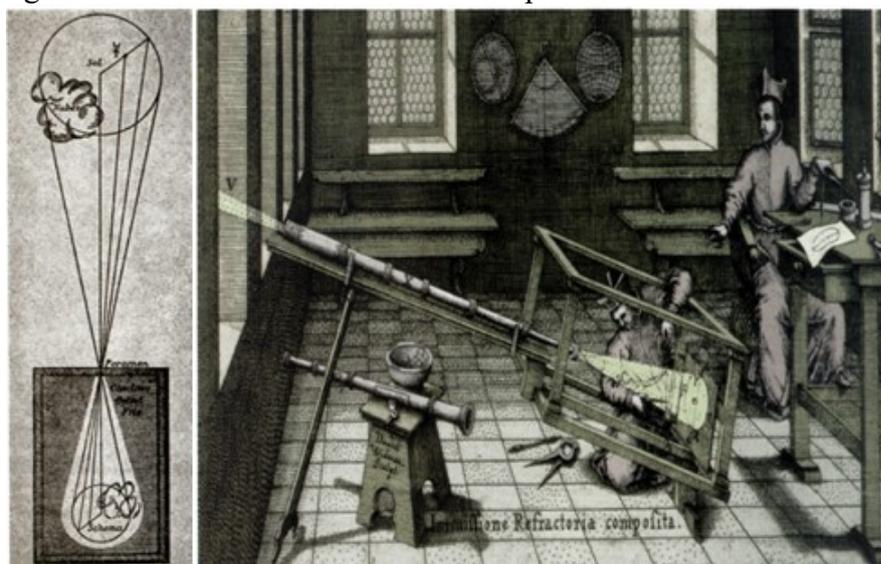
[...] temeroso de que um descuidado olhar para o Sol a pino resultasse em grave lesão dos olhos. Mesmo o raio mais fraco da alvorada, ou do ocaso, espalha pelo olho um estranho ofuscamento vermelho que, muitas vezes, a pessoa tem de carregar consigo por um período de dois dias. (BREDEKAMP, 2009, p. 48)

Em face disso, Fabricius alertou os demais astrônomos, informando-lhes:

[...] para não expor os olhos ao perigo durante a observação, por exemplo, devido a uma repentina afluência de raios, mas que, ao utilizar a lente de aumento, na medida do possível, comecem com a menor quantidade de luz rica em raios até que os olhos possam suportar o Sol em todo o seu esplendor. (BREDEKAMP, 2009, p. 48)

A principal implicação desses fatos é que os astrônomos ficaram na dúvida, acerca da possibilidade das manchas solares serem fruto de uma ilusão provocada por alucinações produzidas pela dor ocular. Por conseguinte, para dirimir tal dúvida, foram adotados procedimentos de controle – repetição de várias observações – e invenções de dispositivos, como a câmera escura, criada por Fabricius (Figura 58 – lado esquerdo), uma câmera helioscópica (Figura 58 – direito) construída por Scheiner.

Figura 58 – As câmeras escuras e telescópicas de Fabricius e Scheiner.



Fonte: Bredekamp (2009, p. 48-49).

Antes de construir sua câmara helioscópica, em março de 1611, Scheiner tinha direcionado seu telescópio para o Sol, atenuado pela névoa, para observar as manchas solares, porém a agressão aos seus olhos foi tão violenta que não tentou repetir a experiência até o mês de outubro do mesmo ano (BREDEKAMP, 2009). Nesse instrumento, a luz do Sol passa pelo telescópio e é projetada sobre uma placa, na qual pode ser copiada. Com isso, Scheiner fez várias observações das manchas solares e concluiu que “as manchas nunca se modificavam, mas isso só deveria ocorrer se o tubo do helioscópico tivesse produzido o fenômeno” (Ibid., p. 49). Por ter feito vários testes, Scheiner se convenceu de que o fenômeno era real e pertencia ao Sol. Em 1615, ele apresentou suas observações em gravuras cravadas em placa de cobre (Figura 59), nas quais, na grande circunferência e nos 39 pequenos círculos, foram anotadas as manchas solares observadas entre 21 de outubro e 14 de dezembro de 1611.

Figura 59 – Registro das manchas solares de Scheiner no ano de 1611.



Fonte: Bredekamp (2009, p. 49).

Para concluir, a principal implicação astronômica acerca desse fenômeno celeste foi a de que o Sol, estático no sistema copernicano, agora apresentava um movimento em torno do seu próprio eixo, cuja velocidade foi calculada por Galileu a partir das diferentes posições das manchas solares na superfície do Sol. Atualmente, o período de rotação do Sol no equador solar é de 26,8 dias, e nos polos é de 34,4 dias. E para substanciar essa importância das observações de Galileu em defesa do sistema copernicano, a seguir, são apresentados alguns de seus principais argumentos dessa tarefa.

### 11.2.2 Alguns argumentos de Galileu em defesa do sistema copernicano

Antes de publicar suas observações telescópicas e defender o sistema astronômico copernicano em sua principal obra *Dois Novas Ciências*, Galileu escreveu uma carta para

Johannes Kepler, em 1597, após receber uma cópia de seu livro *Mysterium Cosmographicum* (Mistério cosmográfico).

Nessa carta, Galileu assinalou sua adesão às ideias de Copérnico, afirmando o seguinte:

Não recebi há alguns dias, mas apenas há algumas horas, meu culto doutor, o livro que me enviaste por intermédio de Paulus Amberg [...]. Contudo, não cabe aqui deplorar as misérias deste nosso século e sim congratular-vos pelos brilhantes argumentos que apresentais em favor da Verdade. [...], e fá-lo-ei alegremente, uma vez que adotei os ensinamentos de Copérnico há muitos anos, e o seu ponto de vista me permite explicar inúmeros fenômenos da natureza que, indubitavelmente, ficam inexplicáveis segundo as hipóteses mais correntes. Escrevi [**conscripsi**] inúmeros argumentos em apoio a ele e em refutação ao parecer oposto, mas até agora não ousei publicá-los, atemorizado pelo destino do próprio Copérnico, nosso mestre, que, embora adquirisse fama imortal com alguns, constituiu ainda, para uma infinita multidão de outros, (que tal é o número de tolos) objeto de ridículo e zombaria. Certamente ousaria publicar as minhas reflexões imediatamente se existisse mais gente como vós; como não existe, saberei conter-me. (KOESTLER, 1989, p. 246)

Galileu escreveu essa carta aos trinta e três anos de idade e, quando ele diz que “adotei os ensinamentos de Copérnico há muitos anos”, esse tempo remete aproximadamente aos seus vinte e cinco anos, idade com a qual, em 1589, inicia sua carreira científica como professor de matemática da Universidade de Pisa. Apesar disso, Galileu só defendeu publicamente o sistema astronômico copernicano dezesseis anos após essa carta, isto é, em 1613, quando tinha quarenta e nove anos (KOESTLER, 1989).

Por sua vez, essa defesa ocorreu em duas cartas célebres: a de 21 de dezembro de 1613, endereçada ao Cardeal Benedetto Castelli e a carta de 16 de agosto de 1613, para Elia Diodati; bem como, dois anos depois, na carta de 23 de março de 1615, para a Grã-Duquesa de Toscana, Cristina de Lorena. O foco central dessas cartas encontra-se na discussão da compatibilidade da astronomia de Copérnico com o texto bíblico. A motivação principal da defesa de Galileu partiu de um diálogo sobre esse tema “durante um jantar na corte em Toscana data de 12/12/1613, tendo como participantes, Dom Benedetto Castelli, o professor de filosofia Cosimo Boscaglia e a própria grã-duquesa” (NASCIMENTO, 2000, p. 324).

Nessas cartas – publicadas na obra *Opere* de Galileu –, ele procurou argumentar para os aristotélicos opositores a Copérnico, que:

[...] todo mundo sabe que mesmo em questões de fé, as Escrituras deixam às vezes de traduzir literalmente o verbo divino. Para que as massas ignorantes, o povo inculto, possam entender os mandamentos de Deus, as Escrituras recorrem muitas vezes a parábolas, comparações, a analogias nem sempre explícitas, mas que, se

fossem tomadas ao pé da letra, conduziria a verdadeiras heresias. Elas chegariam a mostrar [...], um Deus irado, ou vingador e maldoso, o que não corresponde evidentemente à realidade. (PERNEIRO, 2009, p. 180)

Nesse trecho, observa-se que a estratégia de Galileu para compatibilizar o sistema copernicano com o texto bíblico, reside em mostrar que o conflito apontado pelos opositores “só pode ser aparente, pois tanto a Natureza (*Natura*) como a Escritura (*Scrittura*) são obras de Deus” (NASCIMENTO, 2000, p. 324). Em outras palavras “são mesmos os dois livros pelos quais Deus fala à humanidade, e, portanto, imunes de erro” (Idem).

Para Galileu, “quem pode errar são os intérpretes da Escritura, que não entenderiam adequadamente o que ela diz, ou os estudiosos da Natureza, que tomariam por demonstrações rigorosas o que não passa de hipóteses ou opinião” (Idem). Portanto, era preciso que, no estudo do universo, se observasse primeiro o que acontece no céu e na Terra, buscando uma interpretação racional – influência neoplatônica – utilizando-se dos sentidos e a inteligência que, segundo ele, o próprio Criador os confiou.

Nessa direção, os principais argumentos de Galileu estão presentes em sua principal obra, *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a Due Nuove Scienze - Discursos e Demonstrações Matemáticas acerca de Duas novas Ciências* – publicada em 1632 e reeditada em 1638. Estruturada em forma de diálogos, essa obra configura-se metafóricamente em reuniões de quatro jornadas, nas quais Galileu propõe, de maneira indeterminada, as razões filosóficas e naturais para debater sobre as ideias aristotélicas e as copernicanas. Por sua vez, esses diálogos são proferidos por três personagens: *Filippo Salviati*, erudito de Florença, porta voz de Galileu; *Simplicio*, célebre comentador grego das obras de Aristóteles e defensor de suas ideias; *Giovanni Francesco Sagredo*, personagem culto de Veneza, mediador dos diálogos, cuja residência dá lugar ao espaço fictício de ocorrência dos diálogos. Além disso, essa obra é precedida de um prefácio e uma dedicatória endereçada a Ferdinando II de Médici, Grão-duque da Toscana, como mais um reconhecimento de Galileu a essa família.

Não obstante, por alguns aspectos conceituais presentes nos diálogos serem fundamentais para o início do desfecho deste amplo estudo da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, a seguir, apresentam-se apenas alguns argumentos com os quais Galileu buscou revogar a autoridade de Aristóteles e rever o conceito tradicional de movimento. Portanto, suas discussões sobre o conceito de gravidade e das experiências sobre o movimento dos corpos em queda livre e no plano inclinado, associados à gravitação, são deixadas para o próximo capítulo. A pertinência disso reside no fato de poder retomar as

questões assinaladas na introdução capítulo e, a partir delas, prosseguir até a gravitação universal newtoniana.

Vale destacar que, resumidamente, na primeira jornada Galileu discute a concepção geral do universo, refutando, sobretudo, a ideia aristotélica de um mundo hierarquizado por duas regiões distintas. Na segunda jornada, ele busca centralizar suas discussões nas experiências terrestres para defender a mobilidade da Terra, desqualificando os argumentos a favor de sua imobilidade. Na terceira, centra sua discussão no exame dos fenômenos celestes, buscando confirmar o movimento anual da Terra em torno do Sol. Por fim, na quarta jornada, Galileu tenta mostrar como as marés seriam fenômenos terrestres impossíveis, quando pensadas a partir de uma Terra estacionária. Fenômeno que, para ele, era suscetível de explicação supondo o duplo movimento da Terra (diurno e anual).

Frente a essas considerações, Galileu rejeitou a autoridade de Aristóteles se fundamentando nas convicções de suas observações telescópicas. A partir disso, ele tentou convencer aos seus interlocutores afirmando que até mesmo Aristóteles, com sua vasta inteligência e sabedoria, reconheceria seus erros conceituais, filosóficos, lógicos, se fosse confrontado com as evidências das observações. Nas palavras do porta-voz *Salviati*, na primeira jornada, Galileu assinala que: “quanto mais sábios são, tanto mais conhecem e confessam livremente que sabem pouco; e o sapientíssimo da Grécia, como tal considerado pelos oráculos, dizia abertamente conhecer que nada sabia” (GALILEU, 2011, p. 184). Continuando com esse raciocínio, na segunda jornada, *Salviati* diz a Simplicio:

E vós, dizei-me, por favor, sois tão ingênuos que não entendeis que se Aristóteles tivesse estado presente escutando o doutor que o queria fazer autor do telescópio, teria discutido muito mais com ele que com todos aqueles que riram do doutor e de suas interpretações? Duvidais talvez que Aristóteles, se visse as novidades descobertas no céu, não mudaria de opinião, corrigindo seus livros, para aproximar-se de doutrinas mais sensíveis, afastando de si aqueles tão pobres de juízo que muito pusilanimemente insistem em querer sustentar cada uma de suas afirmações, sem entender que Aristóteles, quando fosse tal e qual eles o imaginam, seria um cérebro indócil, uma mente obstinada, um espírito repleto de barbárie, uma vontade tirânica, que, reputando todos os outros como estúpidos carneiros, quisesse que seus decretos fossem antepostos aos sentidos, às experiências, à própria natureza? São os seus seguidores que outorgaram a autoridade a Aristóteles, e não ele mesmo que a usurpou ou tomou; e, porque é mais fácil ocultar-se debaixo do escudo de outrem que comparecer de visto aberto, temem e nem se aventuram a afastar-se somente um passo, e, antes de alterar alguma coisa no céu de Aristóteles, querem impertinentemente negar aquelas coisas que veem no céu da natureza. (GALILEU, 2011, p. 193)

Diante dessas consistentes interpelações, *Simplicio* pergunta a *Salviati*: “Mas quando se abandona Aristóteles, quem poderia ser nosso guia na filosofia. Designa algum autor” (Ibid., p. 195). Nessa pergunta de cunho filosófico, observa-se o despertar de uma preocupação semelhante à do ponto de vista físico, quando Tycho Brahe, no estudo da estrela nova e do cometa, colocava por Terra o aporte teórico aristotélico das *esferas sólidas cristalinas*, para explicar o movimento dos planetas. Nesse sentido, *Salviati* afirma também que: “É necessário um guia nos países desconhecidos e selvagens, mas nos lugares abertos e planos somente os cegos necessitam de guia; e quem é assim deve ficar em casa, mas quem tem olhos na frente e na mente deve servir-se deles como guia” (Idem). Por fim, ele completa que, quando se discute ou se estuda algum fenômeno natural, os aristotélicos devem apresentar as razões e demonstrações, suas ou de Aristóteles, e não com textos e meras autoridades, porque nossos discursos não devem ser sobre o mundo sensível, e não sobre um mundo de papel (GALILEU, 2011). Por esses argumentos, Galileu estava fortemente seguro de suas observações telescópicas e da necessidade de submeter o mundo terrestre e celeste às mesmas regras – nos dias atuais, as mesmas leis da natureza. Em outras palavras, ele tinha plena consciência de que era possível tirar conclusões racionais dos fenômenos celestes, utilizando-se das experiências realizadas no âmbito de uma *física terrestre*. A partir dessa convicção de Galileu, é oportuno construir mais um vínculo epistemológico com mais um aspecto, característica, princípio da natureza da ciência, que perpassa pela ideia<sup>18</sup> de que:

A experimentação não tem apenas o papel de corroborar ou de refutar teorias em sua forma final. Ela é parte integrante e essencial do processo de construção do conhecimento, que envolve o diálogo entre as expectativas e convicções teóricas do investigador e as observações que ele realiza. (PEDUZZI; RAICIK, 2020, p. 39)

Nessa direção, Galileu observou que seria preciso fazer uma revisão do conceito tradicional de movimento da doutrina aristotélica, isto é, movimento como um processo transitório que leva um “ser em potência” para o lugar natural, onde ele se “realiza”. Já o repouso no lugar natural, ao contrário, era um *estado* (PERNEIRO, 2009). Nessa perspectiva, ele tentou mostrar que não existia diferença essencial entre *repouso* e *movimento*, pois um corpo que se deixa cair adquire, de maneira contínua, todos os graus de velocidade, a partir do repouso. Com isso, concluiu que, “o grau a partir do qual o móvel iniciava o seu movimento era o da extrema lentidão, ou seja, do repouso”. Acerca disso *Salviati* afirmou:

---

<sup>18</sup> No próximo capítulo, as experiências de Galileu sobre a queda dos corpos vão fundamentar ainda mais esse vínculo epistemológico.

Por ter esta inclinação, nasce necessariamente que ele (um corpo), no seu movimento, acelerar-se-á continuamente e, começando com um movimento lentíssimo, não adquirirá grau algum de velocidade, antes de ter passado por todos os graus menores de velocidade, ou poderíamos dizer, de maior lentidão: porque, partindo do estado de repouso (que é o grau de infinita lentidão do movimento), não existe razão alguma pela qual ele deva entrar num determinado grau de velocidade, antes de entrar num grau menor, e em outro ainda menor antes que aquele; pelo contrário, parece perfeitamente razoável passar antes pelos graus mais próximos daquele do qual partiu, e daqueles aos mais afastados; mas o grau a partir do qual o móvel começa a mover-se é aquele da máxima lentidão, ou seja, do repouso. (GALILEU, 2011, p. 100)

A principal implicação ontológica desse importante passo de Galileu é ter observado a equivalência conceitual entre *movimento* e *repouso* e a indiferença de qualquer corpo para um ou outro desses dois estados. Com isso, aos seus olhos, nesse universo não aristotélico, os corpos podiam, indiferentemente, permanecer em repouso em qualquer lugar, ou movimentar-se em qualquer direção (PERNEIRO, 2009). Somando essas conjecturas às suas observações telescópicas (estrelas da Via Láctea, manchas solares, fases de Vênus, luas de Júpiter), o universo de Galileu, apesar de ordenado como o de Copérnico, não possuía hierarquias, os fenômenos celestes não se explicam mais pelas qualidades “substanciais” ou “essenciais” dos corpos (leves e pesados). Portanto, não existindo mais a preponderância dessas qualidades, o conceito de lugar natural aristotélico perdeu seu conteúdo explicativo e seu significado ontológico. Por conseguinte, Galileu buscou aplicar na escala cosmológica os resultados de suas experiências terrestres, especialmente, sobre o movimento dos corpos em queda livre e/ou sobre um plano inclinado. Experiências diretamente ligadas ao comportamento desses corpos frente à gravidade, cujos resultados vão se constituir em um passo fundamental para o desenvolvimento da ciência moderna, no século XVII.

Nesse sentido, em vista da conclusão desse amplo estudo da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, nos próximos três últimos capítulos, serão abordados, respectivamente: as contribuições científicas de Galileu para a constituição de uma nova física (capítulo 12); as contribuições de Kepler para a constituição de uma nova astronomia, juntamente com um adendo histórico a explicação mecânica da gravidade por René Descartes, no contexto de uma nova cosmologia e dos problemas conceituais que serão enfrentados por Isaac Newton (capítulo 13); e finalmente, capítulo 14, a teoria da gravitação universal newtoniana como marco efetivo da nova tradição de pesquisa europeia, refletida tanto no nascimento da ciência moderna do século XVII quanto na própria unificação dessas três áreas pelo significado metodológico, teórico e ontológico da síntese newtoniana (KOYRÉ, 2002).

## 12 AS CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS DE GALILEU PARA UMA NOVA FÍSICA

No capítulo anterior, foram apresentadas e discutidas as defesas do sistema copernicano por Giordano Bruno e Galileu Galilei. Com Bruno, as ideias copernicanas foram tomadas como aporte filosófico de reforma e estruturação do pensamento europeu renascentista, até então, dominado pela tradição escolástica. E com Galileu, seu defensor mais proeminente, as observações telescópicas, realizadas a partir de 1609, serviram para romper com muitas das ideias astronômicas, cosmológicas e físicas aristotélicas, especialmente, sobre a imutabilidade do mundo supralunar; a existência de corpos celestes orbitando outros planetas; a existência de outras estrelas na Via Láctea, além das visíveis a olho nu; a constatação de que os planetas espelham a luz do Sol e Vênus apresenta fases como a Lua; bem como a ressignificação ontológica do conceito de movimento e de repouso. Em face disso, como já observado, neste capítulo, o objetivo é apresentar as contribuições científicas de Galileu, especialmente, para a constituição de uma nova física, a partir de sua busca pela solução dos problemas empíricos (PE) e dos problemas conceituais (PC) fomentados pela astronomia copernicana, materializados em três perguntas fundamentais, apresentadas logo a seguir. Além disso, espera-se demonstrar como a mudança nos aspectos metodológicos e ontológicos iniciados por Galileu, no capítulo anterior, permite observar uma pertinente caracterização do nascimento de uma nova tradição de pesquisa europeia, cognitivamente, distinta da tradição de pesquisa grega antiga, caracterização esta que vai se constituindo cada vez mais, nos capítulos seguintes, com o trabalho de Kepler, Descartes e, finalmente, Newton.

### 12.1 A SOLUÇÃO DE GALILEU PARA OS PROBLEMAS FOMENTADOS PELO SISTEMA COPERNICANO

As contribuições de Galileu para a constituição de uma nova física perpassam pela discussão das soluções que ele apresentou frente aos problemas empíricos e conceituais fomentados pelo sistema copernicano. Por sua vez, esses problemas estão representados na forma e na suposição das seguintes perguntas lançadas pelos opositores às ideias de Copérnico: *Por que os corpos caem em direção ao centro da Terra? Por que não somos atirados fora da Terra por sua rotação? Existe alguma experiência terrestre que mostre que a Terra se move? Qual a teoria física de movimento de Copérnico, se não aceita a física de Aristóteles?* (MARTINS Roberto, 1990).

Diante desses problemas, é válido recapitular que Copérnico tentou, sem sucesso, apresentar respostas pelo *método lógico-verbal aristotélico*. Para o primeiro problema, Copérnico explicou que os corpos caem em direção ao centro da Terra, pois eles possuem uma propriedade chamada de *gravidade*. Uma *essência da matéria* refletida em uma *inclinação natural*, cuja ação é responsável por agrupar a matéria, por exemplo, em formato esférico tanto na Terra quanto em outros corpos celestes.

Para o segundo, Copérnico explicou que os corpos não são expulsos da superfície da Terra, justamente devido ao movimento de rotação terrestre (1.700 quilômetros por hora na região do equador) ser natural (circular) e não violento. Assim, os corpos não podem ser atirados para fora da Terra pela ação da *força centrífuga*, pois essa ação somente apareceria em movimentos rotativos violentos.

Para o terceiro, sua explicação exigia a ideia de um universo extremamente extenso e finito. Ideia que, na verdade, era uma maneira de explicar a não observação da paralaxe, fenômeno celeste capaz de provar o movimento de rotação Terra. Por fim, para o quarto, sua solução não fazia parte dos propósitos da astronomia copernicana.

Nessa direção, antes de apresentar as soluções de Galileu para esses problemas, é importante reforçar o caráter coletivo da produção de conhecimento, exemplificando os alicerces teóricos desenvolvidos por outros pensadores, que fundamentaram suas explicações. Por exemplo, Arquimedes de Siracusa (287 - 212 a. C.), William de Ockham (1288 - 1347) e o grupo de pensadores do Colégio de Merton de Oxford, fundado em 1264.

### 12.1.1 Os Aportes Teóricos que Alicerçaram as Soluções de Galileu

Para oferecer suas explicações aos problemas empíricos e conceituais, Galileu fundamentou-se no trabalho *Sobre os corpos flutuantes* de Arquimedes. Mediante esse trabalho, ele pôde relacionar a velocidade de queda ou de subida de um corpo, em um dado meio, com o peso específico do corpo e do meio por onde ele se desloca. Adotando, para tanto, a relação de Philoponus –  $v \propto (F - R)$ : a velocidade como sendo proporcional à força menos a resistência do meio – mas considerando a relatividade dos conceitos de leve e pesado (PEDUZZI, 2018a).

Com esses aportes teóricos, Galileu chegou a uma importante conclusão, que era contrária às concepções aristotélicas, a saber: dois corpos, independentemente de seus pesos e de seus materiais constituintes, quando soltos de uma mesma altura, atingem o solo

simultaneamente – quando desprezada a resistência entre o meio e esses corpos. Vale dizer que, para os aristotélicos, essa conclusão era inadmissível, pois corpos constituídos de materiais diferentes (uma esfera de chumbo e uma pluma), quando submetidos à mesma situação, cairiam em tempos completamente diferentes.

Nesse embate, a principal implicação da ideia de Galileu residia na possibilidade do movimento natural de um objeto, como sua queda, se realizar no vazio. Não obstante, é importante dizer que não se pode, a partir disso, sustentar o mito do experimento da torre de Pisa, propalado por seu discípulo Viviani.

Sabe-se que um pouco de reflexão e bom senso, conhecimento teórico e de física bastariam para reconhecer a falácia do relato desse discípulo, pois Galileu, à época, era um professor desconhecido pelos seus pares, de menor graduação e menor remuneração, e professor da última faculdade (matemática), que, aos olhos filósofos, não tinha a menor condição intelectual de colocar em dúvida os ensinamentos de Aristóteles. (KOYRÉ, 1982, p. 202)

Em conformidade, Galileu não explicou a causa do movimento de queda dos corpos. Além disso, para os aristotélicos, o vácuo não era um meio físico para poder receber, transmitir e manter um movimento. Em tal movimento hipotético, a velocidade de um corpo seria infinita (KOYRÉ, 1982). Por conseguinte, na filosofia natural aristotélica, no vácuo (como no espaço da geometria euclidiana), não há lugares privilegiados ou direções, nem lugares naturais. Por isso, um corpo colocado no vácuo não saberia para onde ir, nem teria uma razão para se conduzir por uma direção em detrimento de outra; logo, não teria nenhuma razão para se mover. Por isso, sabe-se que somente com a invenção da bomba de vácuo, no século XVII, é que as hipóteses de Galileu foram corroboradas (KOYRÉ, 1982).

Não obstante a isso, Galileu encontrou em Ockham, século XIV, uma definição do conceito de movimento, bem diferente da ideia dos aristotélicos, que foi cunhada pelo *princípio epistemológico* da *Navalha de Ockham*. Por esse princípio, “é fútil usar mais entidades [para explicar alguma coisa], se for possível usar menos [...]” (FRANKLIN, 1976, p. 537). Portanto, se for possível entender o conceito de *movimento*, sem postular *entidades conceituais* (por exemplo, de lugar natural, corpo pesado ou corpo leve), “ou como pensava Aristóteles, em *algo* para empurrar o corpo de modo que ele se mantenha em movimento, então, é desnecessário usar tais *entidades* para definir *movimento*” (DIAS; SANTOS Wilma; SOUZA Mariana, 2004, 260). Ockham considerava que “o movimento podia ser concebido

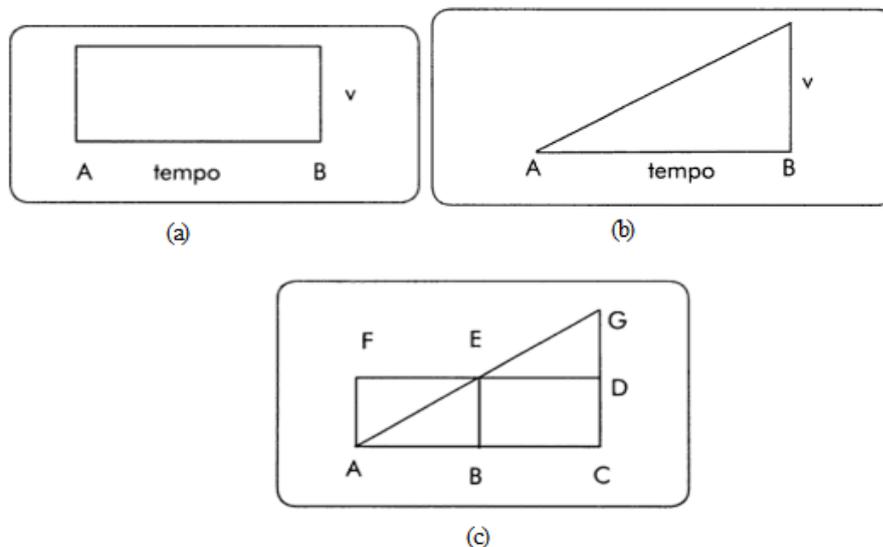
como o mero deslocamento do corpo (no tempo), e isso tornava fútil o uso de outras entidades conceituais” (Idem).

Influenciados pelo *princípio epistemológico de Ockham*, os pensadores do Colégio de Merton desenvolveram seus estudos sem a preocupação com as causas físicas do movimento, mas forneceram ao estudo da cinemática as seguintes contribuições:

Uma clara distinção entre descrição do movimento e causa do movimento. Obviamente isso decorre da definição de movimento dada por Ockham. A definição de velocidade (no sentido de “rapidez” ou de “vagarosidade”) como deslocamento no tempo e a conceitualização de velocidade instantânea. A definição de aceleração com variação da velocidade no tempo. A consideração de movimentos uniformes e movimentos uniformemente acelerados. Traçaram os gráficos ( $v \times t$ ) desses movimentos e entenderam que as distâncias percorridas nesses movimentos são dadas, respectivamente, pelas áreas do retângulo e do triângulo, formados pelo conjunto das ordenadas (velocidade). E a formulação e demonstração do Teorema da Velocidade Média. (DIAS; SANTOS MARIANA; SOUZA WILMA, 2004, 260)

Em conformidade com esses constructos, em 1350, Nicolau Oresme demonstrou geometricamente o *teorema do movimento uniformemente acelerado* (PIRES, 2008). Por esse teorema, um corpo “percorre a mesma distância em um dado tempo, que aquele que ele percorreria, caso se movesse com movimento uniforme, com a velocidade igual à velocidade média” (Ibid., p. 74). Uma demonstração geométrica desse teorema é ilustrada na Figura 60 (a, b, c). Na Figura 60a, tem-se o movimento retilíneo uniforme; e na (Figura 60b) o movimento retilíneo uniformemente acelerado; e o diagrama da (Figura 60c).

Figura 60 – Gráficos primitivos de velocidade em função do tempo.



Fonte: Pires (2008, p. 73).

Mediante gráficos primitivos ( $v \times t$ ) – na (Figura 60a e Figura 60b) acima – interpostos no diagrama (Figura 60c), a demonstração desse teorema por Oresme, considera-se que o movimento no primeiro caso é representado pelo triângulo (AGC) e sua velocidade média pelo segmento (EB); o movimento no segundo caso é representado pelo retângulo (AFDC) do diagrama (c); portanto, a área do triângulo (AGC) é igual à área do retângulo (AFDC) e a distância percorrida é proporcional à área (PIRES, 2008).

Por conseguinte, em outro teorema demonstrado por Oresme, a partir desses gráficos (Figura 60), denota-se que: “a distância percorrida na primeira metade de um movimento uniformemente acelerado, é igual a um terço da distância percorrida na segunda metade – isto é, a área do quadrilátero (BEGC) é três vezes a área do triângulo (AEB)” (Ibid., p. 73). Para demonstrá-lo, considera-se que o movimento, no primeiro caso, é representado pelo triângulo (AGC) e sua velocidade média pelo segmento (EB). O movimento, no segundo caso, é representado pelo retângulo (AFDC) do diagrama (Figura 60c). Assim, a área do triângulo (AGC) é igual à área do retângulo (AFDC), e a distância percorrida é proporcional à área.

A generalização desse teorema perpassou por indicar nessa relação, por exemplo, que “as distâncias percorridas em intervalos de tempos iguais sucessivos, em um movimento uniformemente acelerado, entre si, obedecem à razão 1: 3: 5, [...] uma série de números ímpares começando com 1” (Ibid., p. 74). Por consequência, a *distância percorrida é proporcional ao quadrado do tempo*. Cada segmento (AB, BC, etc.), estendido no diagrama da (Figura 60c), representa a unidade de tempo, e a área do triângulo (AEB) representa a unidade de distância. Por definição, no primeiro intervalo ( $t = 1$ ,  $d = 1$ ); no segundo ( $t = 2$ ,  $d = 4$ ) a soma das áreas nos dois intervalos, no terceiro ( $t = 3$ ,  $d = 9$ ).

Além dessas demonstrações geométricas, Oresme também distinguiu a velocidade linear da velocidade angular, compreendendo que, em um movimento circular, a velocidade linear mede-se pela distância linear que o corpo percorre; já a velocidade rotacional, indica-se pelos ângulos descritos ao redor do centro do movimento (PIRES, 2008). Ao utilizar esses aportes teóricos, Galileu teve uma atitude mais perspicaz, em relação à atitude dos filósofos da natureza medievais (GRANT, 2009). Estes atacavam o problema do movimento de maneira meramente hipotética, bem como não empreendiam qualquer tentativa de relacionar suas hipóteses com os movimentos reais do mundo físico (DIAS; SANTOS Wilma; SOUZA Mariana, 2004). Por isso, brilhantemente, Galileu conseguiu quantificar o conceito de movimento e contribuir, no século XVII, com a fundação concreta de uma *nova física*, cujo

crescimento cognitivo se espelha na pertinência e importância das ideias copernicanas para a constituição de uma nova tradição de pesquisa europeia renascentista.

### 12.1.2 As Soluções dos problemas Apresentadas por Galileu

Frente aos problemas empíricos e os problemas conceituais, Galileu revisitou e reformulou os conceitos aristotélicos de movimento e de repouso. Na concepção aristotélica, o movimento era compreendido ontologicamente com um processo transitório que levava um ser em potência para o seu lugar natural, onde este se realizava – isto é, uma causa finalística da natureza das próprias coisas – já o conceito de repouso, pelo contrário do movimento, era um estado final dessa causa finalística (PEDUZZI, 2018a). Fundamentado pelo princípio epistemológico da *Navalha de Ockham*, Galileu rejeitou os mitos das essências, das qualidades e dos lugares próprios e defendeu que qualquer corpo, em um universo não aristotélico, podia permanecer em repouso em qualquer lugar, ou movimentar-se em qualquer direção. Com isso, o *estado de repouso e/ou de movimento* tornou-se conceitualmente e ontologicamente equivalente.

Nessa direção, com suas experiências sobre o movimento dos corpos em queda livre e sobre o plano inclinado, Galileu acreditava ser possível transportar os resultados para a escala celeste. Neste momento, torna-se oportuno lembrar o vínculo epistemológico criado com o aspecto, característica, princípio da natureza acerca do papel da experiência na construção do conhecimento científico, para fundamentá-lo com as contribuições de Galileu na constituição de uma nova física. Mas, acima de tudo, poder demonstrar efetivamente que esse aspecto, característica, princípio está fundamentalmente ligado aos novos compromissos metodológicos e ontológicos da ciência moderna do século XVII.

Nesse sentido, devido às experiências de Galileu poder ser associadas ao comportamento dos corpos frente à *gravidade*, é válido observar como ele compreendia esse fenômeno, em comparação ao entendimento de Copérnico sobre o mesmo. Acerca disso, Galileu afirmou:

[...] Observo que os graves têm inclinação para o movimento de descida, esse movimento sendo executado por eles, por meio de uma propriedade intrínseca, e sem necessidade de um motor externo, todas as vezes que não se acham impedidos por algum obstáculo. (GALILEU, 1987 *apud* PERNEIRO, 2009, p. 185)

Em comparação ao entendimento de Copérnico, para Galileu, a *gravidade* também era um atributo da matéria, mas, ao mesmo tempo, era uma força pertencente ao corpo, permanente nele, que agia do interior, obrigando-o a se movimentar em direção ao centro da Terra. Segundo Roberto Martins (1994), nessa compreensão de Galileu reside a ideia aristotélica de primeiro motor, pela qual ele era impedido de pensar em uma concepção de gravidade diferente.

Seguindo essa compreensão, frente ao problema empírico – *Por que os corpos caem em direção ao centro da Terra?* –, Galileu buscou uma solução observando, no momento, que não lhe parecia “oportuno empreender a investigação da causa da aceleração do movimento natural” (PERNEIRO, 2009, p. 185), uma vez que os filósofos não tinham consenso sobre essa abordagem. Acerca disso, ele afirmou:

Por ora era suficiente [...], estudar e demonstrar algumas propriedades de um movimento acelerado (qualquer que fosse a sua aceleração) de tal modo que a intensidade da sua velocidade aumente, após ter saído do repouso, com aquela simplíssima proporção com a qual cresce a continuação do tempo, que é o mesmo que dizer que em tempos iguais se fazem acréscimos iguais de velocidade. (GALILEU, 1987, *apud* PERNEIRO, 2009, p. 185)

Na tentativa de explicar a queda dos corpos na superfície da Terra, Galileu construiu hipóteses e experimentos que o levaram à lei da queda dos corpos, demonstrando quantitativamente a proporcionalidade das distâncias percorridas com o quadrado dos tempos envolvidos (PEDUZZI, 2018a). Ele compreendeu que a queda dos corpos se dava de forma acelerada em todo o trajeto, e não apenas em parte dele. Ao associar a queda dos corpos a um movimento com aceleração constante, pela hipótese de que a “natureza sempre se manifesta na sua forma mais simples” (Ibid., p. 167), Galileu afirmou que:

Quando, portanto, observo uma pedra que cai de certa altura a partir do repouso e que adquire pouco a pouco novos acréscimos de velocidade, por que não posso acreditar que tais acréscimos de velocidade não ocorrem segundo a proporção mais simples e mais óbvia? Se considerarmos atentamente o problema, não encontraremos nenhum acréscimo mais simples do que aquele que sempre se repete da mesma maneira. O que entenderemos facilmente, se considerarmos a estrita afinidade existente entre o corpo e o movimento: do mesmo modo, com efeito, que a uniformidade do movimento se define e se concebe com base na igualdade dos tempos e dos espaços (com efeito, chamamos movimento uniforme ao movimento que em tempos iguais percorre espaços iguais), assim também, mediante uma divisão de tempo em partes iguais, podemos perceber que os aumentos de velocidade acontecem com simplicidade; concebemos no espírito que um movimento é uniformemente acelerado quando, em tempos iguais quaisquer adquirem aumentos iguais de velocidade. (GALILEU, 1988, p. 164)

Com base nessa hipótese, Galileu conclui que as distâncias percorridas por um móvel, a partir do repouso, são proporcionais aos quadrados dos tempos gastos para percorrê-las ( $d \propto t^2$ ). Ao observar a equivalência dessas relações, para um movimento uniformemente acelerado, ele transferiu o problema de medida de velocidades instantâneas, para medidas de distâncias, que podiam ser realizadas experimentalmente (PEDUZZI, 2018a).

Para diluir a rapidez que os corpos adquirem na queda livre, Galileu conjecturou a seguinte hipótese: “qualquer que seja a aceleração de um objeto deslizando sobre um plano inclinado, o seu movimento será, assim, como o de um corpo em queda livre, um movimento uniformemente acelerado” (PEDUZZI, 2018a, p. 167). Na plausibilidade dessa hipótese:

[...] um corpo que desce um plano com certa inclinação está, em termos de variação de velocidade, em uma situação intermediária a outras duas: a que envolve uma superfície horizontal, neste caso um objeto nela colocado em repouso permaneceria aí parado, de um lado; e a que se refere a uma superfície com  $90^\circ$  de inclinação, caso em que o objeto cairia como se não existisse a referida superfície. (PEDUZZI, 2018a, p. 167)

Contudo, Galileu precisava demonstrar a validade da relação ( $d \propto t^2$ ) e corroborar sua primeira hipótese – a natureza se serve de um movimento com aceleração constante na queda dos corpos. Para tanto, o tipo de dispositivo utilizado e os resultados obtidos experimentalmente são descritos pelas próprias palavras do Galileu:

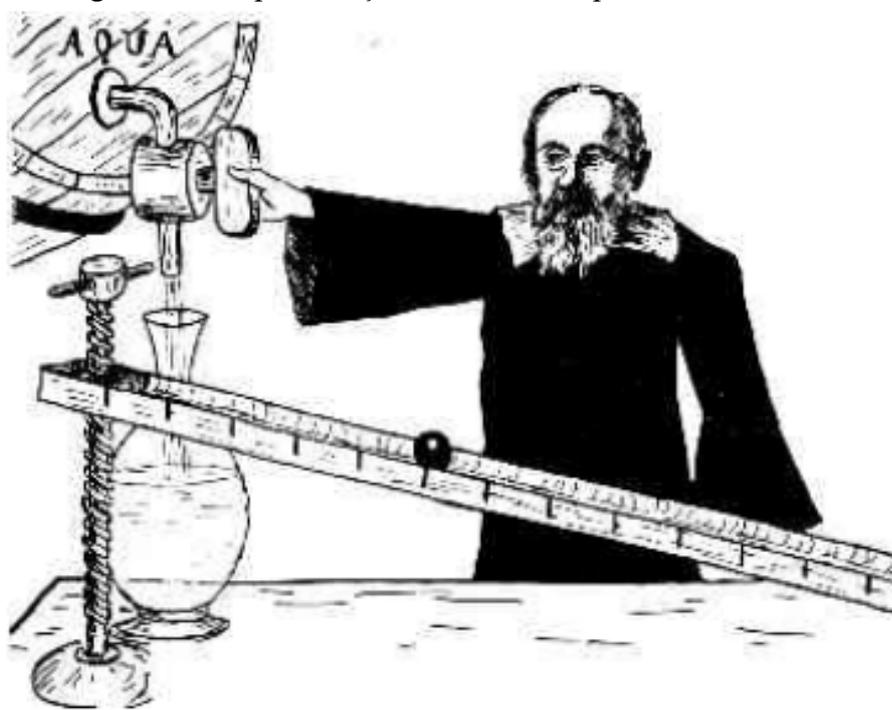
Numa ripa, ou melhor, dito, numa viga de madeira com um comprimento aproximado de 12 braças, uma largura de meia braça num lado e três dedos no outro, foi escavada uma canaleta neste lado menos largo com pouco mais de um dedo de largura. No interior desta canaleta perfeitamente retilínea, para ficar bem polida e limpa, foi colocada uma folha de pergaminho que era polida até ficar bem lisa; fazíamos descer por ela uma bola de bronze duríssima perfeitamente redonda e lisa. Uma vez construído o mencionado aparelho ele era colocado numa posição inclinada, elevando sobre o horizonte uma de suas extremidades até a altura de uma ou duas braças, e se deixava descer (como afirmei) a bola pela canaleta anotando, como exporei mais adiante, o tempo que empregava para uma descida completa: repetindo a mesma experiência muitas vezes, para determinar exatamente a quantidade de tempo, na qual nunca se encontrava uma diferença nem mesmo da décima parte de uma batida de pulso. Feita e estabelecida com precisão tal operação, fizemos descer a mesma bola apenas por uma quarta parte do comprimento total da canaleta; e, medido o tempo de queda, resultava ser sempre rigorosamente igual a metade do outro. Variando a seguir a experiência, e comparando o tempo requerido para percorrer todo o comprimento com o tempo requerido para percorrer metade, ou os três quartos, ou, para concluir, qualquer outra fração, através de experiências repetidas mais de cem vezes, sempre se encontrava que os espaços percorridos estavam entre si como os quadrados dos tempos e isso em todas as inclinações do plano, ou seja, da canaleta, pela qual se fazia descer a bola. (GALILEU, 1988, p. 175-176)

Em conformidade com essa descrição, para as medidas dos tempos de percurso da bola pela canaleta no plano inclinado, Galileu admitiu o seguinte:

[...] empregamos um grande recipiente cheio de água, suspenso no alto, o qual através de um pequeno orifício feito no fundo deixava cair um fino fio de água, que era recolhido num pequeno copo durante todo o tempo em que a bola descia pela canaleta ou por suas partes. As quantidades de água assim recolhidas eram cada vez pesadas com uma balança muito precisa, sendo as diferenças e proporções entre os pesos correspondentes às diferenças e proporções entre os tempos; e isto com tal precisão que, como afirmei estas operações, muitas vezes repetidas, nunca diferiam de maneira significativa. (GALILEU, 1988, p. 175-176)

Para fins ilustrativos, uma representação artística dessa experiência encontra-se na (Figura 61).

Figura 61 – Representação artística da experiência de Galileu



Fonte: PIBID Física 17ª Edição (p. 4, S/A).

Com suas experiências, Galileu obteve experimentalmente a validade da relação ( $d \propto t^2$ ), porém de maneira aproximada, pois tinha consciência das limitações de seus instrumentos e experimentos rudimentares, especialmente, dos efeitos retardadores do meio, no deslocamento dos corpos e das medidas aproximadas da *variável tempo* (PEDUZZI, 2018a). Mesmo assim, Galileu pôde “inferir que o movimento uniformemente acelerado, não rigorosamente, é o movimento que um corpo executa ao cair” (Ibid., p. 269). Portanto, a

queda de um corpo com aceleração constante, por exemplo, em um plano inclinado com 90° graus, só ocorre em caso ideal (no vácuo), em que se obteria com exatidão a relação distância proporcional ao tempo ao quadrado (PEDUZZI, 2018a).

Nesse sentido, o mais importante dessa abordagem hipótese-experimento é observar o indicativo de um novo crescimento científico cognitivo, que está substanciando o nascimento de uma nova física. Diferente da física de Aristóteles, Galileu está demonstrando que é preciso não somente fazer conjecturas acerca do movimento, na queda dos corpos, como submetê-las indispensavelmente ao escrutínio da própria natureza. E é justamente essa atitude que vai configurar o novo espírito científico no contexto da nova tradição de pesquisa europeia.

Dando continuidade, para o problema empírico – *Por que não somos atirados fora da Terra por sua rotação?* – velocidade de 1.700 km/hora – Galileu procurou uma solução discutindo a existência e a razão de seus efeitos, mediante dois exemplos, primeiro com um balde pequeno com água e, segundo, com uma pedra lançada por uma funda. No primeiro, Galileu sugeriu a seguinte experiência:

Coloque-se água em um pequeno balde e amarre esse balde na extremidade de uma corda. Pode-se então segurar a outra extremidade da corda e fazer o balde girar rapidamente, seja em um plano horizontal ou vertical, sem que a água caia de dentro dele. A tendência da água de se afastar do centro supera o seu peso e por isso, mesmo quando o balde está de cabeça para baixo, a água não cai. Se, no fundo do balde, for feito um furo, a água sairá por esse furo, afastando-se do centro de rotação. Da mesma forma, se forem colocadas pedras dentro do balde, elas também não cairão e tentarão se afastar do centro de rotação. (GALILEU, 2011, p. 270-271)

No segundo exemplo, Galileu considerou que, inicialmente, a pedra tem um movimento circular, mas, quando é solta da funda, ela deixa de se mover circularmente e adquire um movimento (inicial) em linha reta, por causa do seu *ímpeto*. Esse movimento retilíneo tem uma direção tangencial ao círculo – em uma direção que faz um ângulo nulo com o seu movimento circular inicial. O movimento da pedra nessa direção tangencial faz como que ela se afaste do centro do círculo (MARTINS Roberto, 1994). Portanto, afirma-se que: “Esse é o motivo da tendência que os corpos em rotação têm de se afastarem do centro: não porque exista uma tendência dos corpos se moverem radialmente para fora, mas por sua tendência a se moverem tangencialmente” (Ibid., p. 199).

Exceto pelo uso do conceito de *impetus*, em detrimento do conceito de *inércia*, a explicação de Galileu estava muito próxima da moderna. Segundo Roberto Martins (1994), na continuação de sua análise é que Galileu introduz considerações matemáticas quantitativas um

pouco problemáticas, mas que, de qualquer forma, não diminuiu o brilhantismo e o significado de seus esforços científicos.

Acerca dessas considerações, mediante seus personagens metafóricos, na obra *Diálogos*, Galileu discutiu o seguinte:

Salviati – [...] Passo agora mais adiante e lhe pergunto se o móvel, depois da separação, ao continuar o seu movimento reto, vai sempre se afastando igualmente do centro, ou se quiser da circunferência, do círculo do qual participou o movimento anterior; o que equivale a dizer: se um móvel que parte do ponto da tangente e se move por essa tangente, se afasta igualmente do ponto de contato e da circunferência do círculo. Simplicio – Não, senhor, pois a tangente na vizinhança do ponto de contato se afasta pouquíssimo da circunferência, com a qual ela contém um ângulo estreitíssimo; mas ao se afastar mais e mais, o afastamento cresce sempre com maior proporção; de modo que em um círculo que tivesse, por exemplo, dez braças de diâmetro, um ponto da tangente que estivesse a dois palmos de distância do contato, estaria distante da circunferência do círculo três ou quatro vezes mais do que um ponto que estivesse a um palmo de distância do ponto de contato; e o ponto que estivesse a uma distância de meio palmo, de modo semelhante crê que apenas se afastaria a quarta parte da distância do segundo. (GALILEU, 2011, p. 274)

Para esclarecer esses argumentos, Galileu utilizou-se das propriedades geométricas do círculo, cuja “distância entre a tangente e a circunferência é aproximadamente proporcional ao quadrado da distância ao ponto de tangência” (MARTINS Roberto, 1994, p. 200). Por essa propriedade, até certo ponto, deve-se observar que o seu raciocínio estava correto. Como ele afirmou, quando um corpo é “lançado horizontalmente a partir de um ponto próximo à superfície da Terra, ele tem um *ímpeto* para se mover segundo a tangente, mas tem ao mesmo tempo uma tendência para baixo, por causa da gravidade” (GALILEU, 2011, p. 274). Nesse contexto, uma pergunta foi lançada por *Salviati*, a saber: *o que acontece quando um corpo começa a se desviar para baixo, ao ser lançado horizontalmente?* (GALILEU, 2011), para a qual Simplicio respondeu que, o corpo começaria imediatamente a se desviar para baixo. *Salviati* ratificou essa resposta dizendo que esse desvio, por menor que fosse, seria suficiente para reter o corpo e impedir que ele se distanciasse do centro (GALILEU, 2011). Em suas palavras,

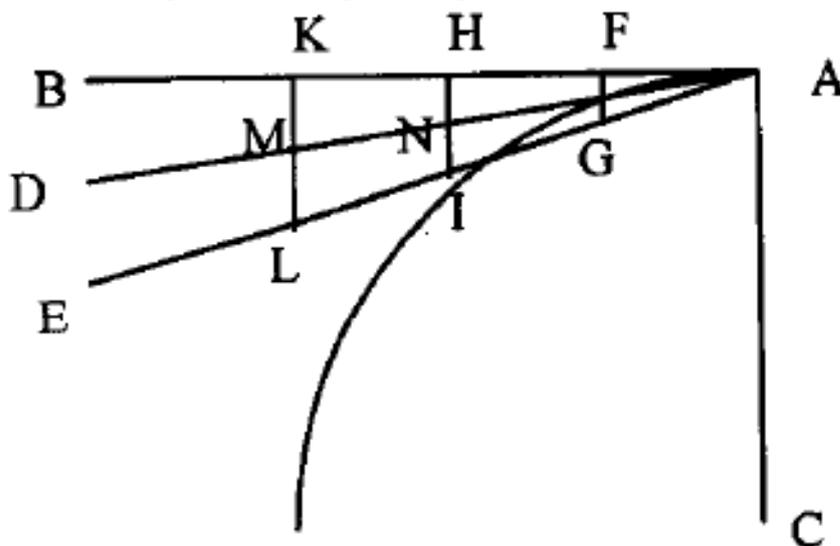
[...] se aquela pedra, que arremessada pela roda que gira com grande velocidade, tivesse uma propensão natural de mover-se para o centro da mesma roda, assim como ela tem a propensão de mover-se para o centro da Terra, seria uma coisa fácil que ela retornasse para a roda, ou melhor, que ela não se separasse da roda; porque sendo o afastamento, no início da separação, tão pequeníssimo, devido à infinita agudeza do ângulo de contato, cada mínima inclinação que desviasse a pedra para o centro da roda seria suficiente para retê-la sobre a circunferência. (GALILEU, 2011, p. 275)

Seguindo esse argumento, *Salviati* esclareceu que, para que um corpo ficasse preso à circunferência de uma roda (ou Terra), bastaria que seu movimento para o centro superasse o distanciamento entre a tangente e a circunferência. Em outras palavras, o movimento tangencial deveria ser tão rápido que, o tempo no qual se move pela tangente – mil braças – tornava-se muito pouco para que o corpo se movesse pela queda, na distância entre a tangente e a circunferência (MARTINS Roberto, 1994).

Por conseguinte, *Salviati* ressaltou que “isso não aconteceria, mesmo que aquele movimento [tangencial] fosse feito mais veloz, e este [para o centro] mais lento, tanto quanto se desejasse” (GALILEU, 2011, p. 275). Colocando em dúvida tal conclusão, *Simplicio* perguntou: *E por que não poderia ser aquele movimento pela tangente tão veloz, que não desse tempo ao corpo de chegar à superfície da Terra?* (Ibid., p. 277). Retrucando, *Salviati* criticou a falta de conhecimentos geométricos por parte de *Simplicio*, afirmando o seguinte: “dizeis assim, e afirmais o falso, devido a um defeito não de lógica ou de física ou de metafísica, mas só de geometria” (Idem).

Em seguida, Galileu usou um diagrama, para *explicar o motivo dos corpos não serem lançados para fora da Terra, devido ao rápido movimento de rotação axial*. Por esse diagrama (Figura 62).

Figura 62 – Diagrama explicativo de Galileu.



Fonte: Galileu (2011, p. 279).

Com base em seu diagrama explicativo (Figura 62), Galileu supôs o seguinte: que as distâncias (AF, FH, HK) sobre a tangente (AB) são todas iguais e representam tempos iguais;

uma reta secante qualquer (AE), traçada a partir do ponto de tangência (A) com qualquer inclinação admitida; que as distâncias (FG, HI, KL) são proporcionais a (AF, AH, AK), pois são lados homólogos de triângulos semelhantes; e que as distâncias (FG, HI, KL) como sendo os graus de velocidade que o corpo adquire em direção ao centro do círculo. Por uma terminologia moderna, a inclinação entre a secante (AE) e a tangente (AB) representa a aceleração do corpo em direção ao centro do círculo.

Em face disso, para representar um movimento que tem a menor tendência em direção ao centro, isto é, com menor aceleração, Galileu utilizou-se da reta secante (AD), de tal modo que os segmentos (KL, HI, FG) entre essa secante e a tangente representassem as velocidades adquiridas pelo corpo em direção ao centro. Com isso, o movimento do corpo podia ser representado, por menor que fosse sua tendência em direção ao centro do círculo. Acerca disso, Galileu considerou evidente que, ao recuar a linha (EA) em direção à linha (AB), diminuindo o ângulo (AEB), infinitamente, “assim como a gravidade pode ser diminuída ao infinito, diminuiria também ao infinito a velocidade de queda, conseqüentemente, a causa que impedia a projeção do corpo para fora” (GALILEU, 2011, p. 278).

Contudo, a análise de Galileu, infelizmente, não estava correta, pois, por menor que seja o ângulo (EAB) e, portanto, por menor que seja a gravidade, a reta (EA) nunca será tangente à circunferência, uma vez que só existe uma tangente, que é (AB). Nesse sentido, a reta (EA) sempre será secante e o movimento inicial do corpo não irá afastá-lo do centro da circunferência, mas aproximá-lo (MARTINS Roberto, 1994). Segundo Roberto Martins (1994), por menor que seja a gravidade, para tempos muito pequenos, ela será suficiente para fazer com que o corpo caia a uma distância maior do que aquela entre a tangente e a circunferência do círculo (área do triângulo AFG) e será suficiente para manter o corpo na superfície terrestre.

Em seu raciocínio, Galileu acreditava que a distância entre a tangente e a secante era proporcional à distância ao ponto de encontro. Mas, pelo contrário, a distância entre a circunferência e a tangente é proporcional ao quadrado dessa distância (MARTINS Roberto, 1994). Logo, para tempos suficientemente pequenos, a distância entre a tangente e a secante sempre será maior do que a distância entre a tangente e a circunferência. Isso implica dizer que, a propriedade geométrica está correta, porém, infelizmente, o raciocínio de Galileu não, pois se a velocidade for suficientemente alta e a atração para o centro suficientemente baixa, o corpo escapará da circunferência e se afastará do centro (MARTINS Roberto, 1994).

De acordo com Roberto Martins (1994), Galileu cometeu um erro muito sutil que estar presente no uso de seu diagrama (Figura 62). Por exemplo, como esse diagrama representa a relação da velocidade em função do tempo, retas secantes são produzidas, porém elas *não são uma indicação da trajetória do corpo*. Isto é, a direção em que o corpo se move não tem nada a ver com o diagrama utilizado por Galileu. Pois não se pode fazer uma comparação entre um gráfico espacial (a circunferência), com um gráfico de velocidade em função do tempo.

Portanto, essa é a razão de Galileu não ter conseguido apresentar uma solução satisfatória para o problema: *Por que não somos atirados fora da Terra por sua rotação?* Solução que veio acontecer somente, trinta anos mais tarde, com *as leis do movimento circular* desenvolvidas por Christian Huygens e Isaac Newton. Mesmo assim, é notório o protagonismo de Galileu em sua tentativa de desenvolver uma *teoria física de movimento*, em detrimento à *física de movimento aristotélica*.

Em protagonismo científico, Galileu determinou corretamente que a “tendência dos corpos serem atirados para fora, cresce com a velocidade e decresce com o raio” (MARTINS Roberto, 1994, p. 205). Embora seja preciso dizer que devido à “aceleração centrípeta ser proporcional ao quadrado da velocidade e inversamente proporcional ao raio” (Idem), Galileu não conseguiu determinar esse tipo de proporcionalidade, pois ele imaginava que os dois efeitos (aumento de raio e aumento de velocidade) podiam se cancelar, isto é, a aceleração centrípeta ser diretamente proporcional à razão entre a velocidade e o raio.

Devido a isso, Galileu sugeriu que a força necessária para manter um corpo em movimento de rotação dependia apenas da velocidade angular do movimento. Já que a capacidade da Terra de lançar para fora os corpos de sua superfície, seria igual à de uma pequena roda que gira também uma vez em vinte quatro horas. Isso demonstra por que ele não conseguia compreender as propriedades do movimento de rotação uniforme (MARTINS Roberto, 1994).

Quatro anos após a morte de Galileu, seu amigo e também defensor das ideias copernicanas, Marin Mersenne (1588 - 1648) publicou o livro *Harmonie Universelle*, no qual mostrava pelo raciocínio do próprio Galileu os motivos de seus erros (MARTINS Roberto, 1994). De acordo com Roberto Martins (1994), Mersenne mostrou que, para Galileu, um móvel que se desloca seguindo a tangente à superfície da Terra (o equador), com a velocidade tangencial da Terra, se afastaria uma polegada por segundo, isto é,  $1/9$  de uma linha na superfície terrestre – a metade do valor encontrado por Mersenne. Nesse mesmo tempo, um

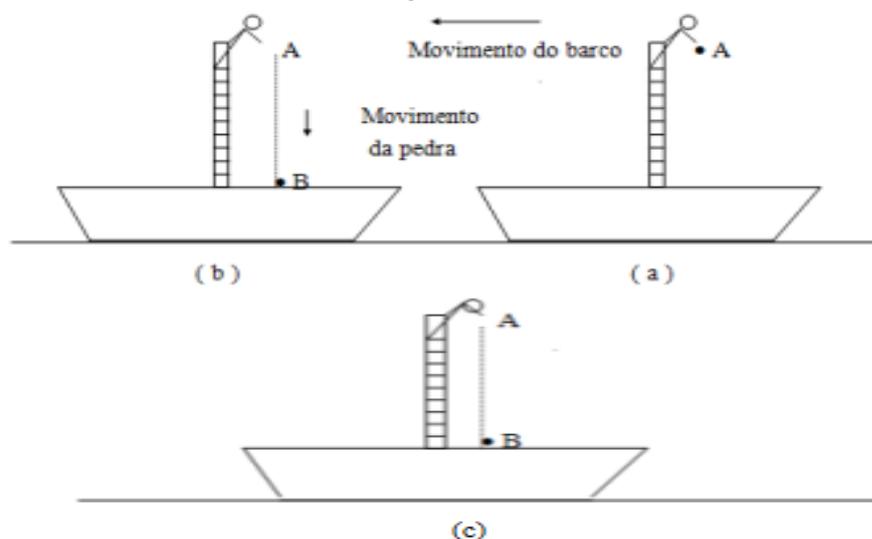
corpo em queda livre cai 144 polegadas – nas medidas de Mersenne – quase 30% inferior ao valor atualmente aceito. Portanto, o efeito da gravidade é 133 vezes superior ao efeito devido à rotação e não infinitamente superior, como pensava Galileu.

Roberto Martins (1994) afirma que, Mersenne avaliou o efeito de uma mudança de velocidade da Terra, pensando que: se a velocidade da Terra fosse o dobro, essa razão cairia para aproximadamente (30:1), isto é, a gravidade seria apenas 30 vezes maior do que o efeito da rotação. Por essa razão, se a rotação da Terra fosse mais rápida ainda, ocorreria a extrusão dos corpos – a gravidade não reteria mais os corpos em sua superfície. Com isso, Mersenne concluiu que os corpos que caem mais lentamente do que as pedras (por serem mais leves), que dessem menos de uma polegada por segundo, não conseguiriam retornar à superfície terrestre. Portanto, “mesmo aumentando o movimento tangencial e diminuindo o que ocorre pela secante [o movimento de queda], a distância que o corpo percorre para chegar à circunferência seria tão pequena” (MARTINS Roberto, 1994, p. 205), que qualquer tempo, por menor que fosse, seria suficiente para atingi-la.

Por fim, no terceiro problema empírico – *Existe alguma experiência terrestre que mostre que a Terra se move?* – para os aristotélicos, um corpo terrestre provisoriamente separado do seu suporte (terrestre) não poderia acompanhar a Terra no seu pretense movimento de rotação, pois se atrasaria para oeste. Submetidos a esse pressuposto aristotélico, estavam o movimento dos pássaros, o movimento das nuvens, o movimento dos projéteis, o movimento de uma pedra solta do alto de uma torre e/ou do mastro do navio, como representado pela (Figura 63 a, b, c), a seguir, supondo-se que tal navio esteja se deslocando em águas tranquilas, como uma condição para se pensar na experiência de pensamento realizada, possivelmente, por um aristotélico da Idade Média (PEDUZZI, 2018a).

Nessa perspectiva, para um aristotélico, se uma pedra fosse solta de cima do mastro de um navio (Figura 63a), ela cairia em algum ponto afastado da base desse mastro, pois enquanto o navio se movimenta, a pedra tenderia a cair verticalmente (Figura 4b), obedecendo à lei do movimento natural (retilíneo). Por essa lei, o movimento do navio não influenciava no movimento de queda da pedra, pois ao cair ela deveria ficar para trás (Figura 4c) – a pedra somente cairia diretamente na base do mastro se o navio estivesse em repouso (PEDUZZI, 2018a).

Figura 63 – O movimento de um objeto abandonado do mastro de um navio.



Fonte: Peduzzi (2018a, p. 173).

Refutando essa experiência (Figura 63), supostamente realizada por um aristotélico, Galileu argumentou que um movimento não pode alterar as relações mútuas de um conjunto de corpos – desde que todos os corpos do conjunto participem do movimento (PEDUZZI, 2018a). Destaca-se que, por trás dessa refutação, encontra-se a ideia de *sistema físico* fundamentado na *teoria do impetus* de Jean Buridan, que outrora também alicerçou Giordano Bruno na defesa do movimento da Terra.

Não obstante, na situação de um corpo caindo sobre a Terra, ou de um mastro de um navio em movimento, o corpo não ficaria para trás como imaginavam os aristotélicos, pois o conjunto corpo-Terra ou pedra-mastro são partes de um mesmo *sistema físico* (PEDUZZI, 2018a). Estendendo essa explicação para a pedra que cai de uma torre, Galileu concluiu que ela também participaria do movimento de rotação da Terra. Conclusão obtida mediante o estudo do *movimento neutro* sobre um plano horizontal e o movimento naturalmente acelerado sobre planos de qualquer inclinação (PEDUZZI, 2018a).

Sobre esse *movimento neutro* – um caso particular da lei da inércia – Galileu notou que, além dos movimentos naturais (circular e retilíneo), um corpo poderia se movimentar de uma terceira forma, sem exhibir movimento violento e sem estar, necessariamente, aproximando-se ou se afastando do centro da Terra. Por isso, chamou esse terceiro movimento de movimento neutro, que foi exemplificado com o uso da “rotação de uma esfera homogênea em torno de um eixo fixo que passa pelo centro” (Ibid., p. 171). Por conseguinte, a importância dessa ideia de Galileu é mostrar que ele estava muito próximo de pensar no

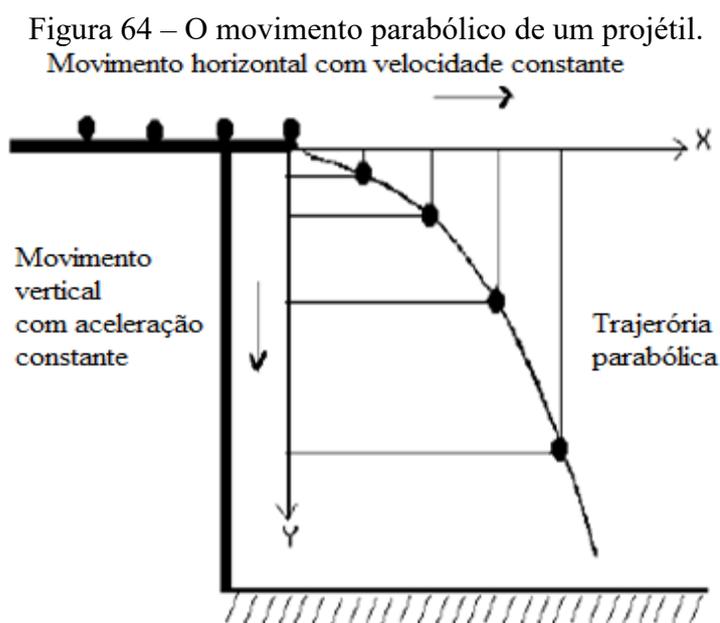
*princípio da inércia*, embora não o tenha formulado – como Newton atribuíra-lhe a autoria de tal feito, mais tarde.

Com mais uma de suas excelentes contribuições para a constituição da nova física, Galileu voltou sua atenção para o movimento de um projétil lançado horizontalmente de certa altura em relação ao solo. Nesse movimento, ele imaginou um corpo arremessado com certa velocidade sobre um plano horizontal finito e livre de qualquer impedimento, executando o movimento uniforme (PEDUZZI, 2018a).

Em seu pensamento, o corpo desloca-se com velocidade constante ao longo de toda a extensão do plano, percorrendo distâncias iguais em intervalos de tempos iguais. Se solto de certa altura em relação ao solo, mas sujeito à gravidade, esse mesmo corpo percorrerá distâncias proporcionais aos quadrados dos tempos envolvidos (PEDUZZI, 2018a). Com isso, em seu corpo de prova e sob a ação simultânea desses dois movimentos, ele considerou que:

[...] se o plano horizontal por onde o corpo se move com velocidade constante estivesse a certa altura do solo, este corpo, uma vez chegado à extremidade do plano, acrescentaria àquele movimento uniforme e indestrutível à tendência de ir para baixo, devido à sua própria gravidade. Os afastamentos horizontal e vertical do projétil da borda do plano representam, evidentemente, as suas coordenadas em relação a este ponto, as quais estão sujeitas, respectivamente, às leis  $(x \propto t)$  e  $(y \propto t^2)$ . (PEDUZZI, 2018a, p. 175)

Por sua vez, a combinação desses dois movimentos perpendiculares resulta em um movimento de trajetória parabólica que é representado pela (Figura 64).



Fonte: Peduzzi (2018a, p. 175).

Mediante a ilustração geométrica da (Figura 64), sem resistência do meio, um corpo quando solto de certa altura, em relação ao solo, fica submetido à ação simultânea de dois movimentos, um horizontal com velocidade constante e outro com aceleração constante. Com isso, Galileu concluiu que a parábola é o constructo matemático que descreve a trajetória do corpo na ação simultânea desses dois movimentos. Nesse amplo estudo experimental de Galileu é fundamental demonstrar como os objetos da matemática, especialmente, da geometria, imaginados por Pitágoras de Samos, no século VI a. C, são utilizados até hoje para estruturar o conhecimento físico sobre os fenômenos da natureza (PIETROCOLA, 2002).

Além disso, suas contribuições científicas ficam ainda mais evidentes na constituição de uma nova física, no século XVII, justamente por suas experiências instituir novos compromissos metodológicos e ontológicos para a produção de conhecimentos científicos, que marcam fundamentalmente o aporte experimental na ciência, como um aspecto, característica, princípio da natureza da ciência moderna que está se constituindo. Nessa direção, no próximo capítulo, serão abordadas as contribuições científicas de Kepler para a constituição de uma nova astronomia; o adendo histórico a explicação mecânica da gravidade, no contexto de uma nova cosmologia, juntamente com os problemas conceituais que Isaac Newton teve que resolver, antes de chegar à sua concepção da teoria da gravitação universal.

Nesse contexto, espera-se poder continuar com a construção de mais vínculos epistemológicos entre o conteúdo da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física e os aspectos, característica, princípios da natureza da ciência referendados pela literatura do ensino de ciência e o ensino de física.

Ou até mesmo, substantivar os vínculos já construídos, ao longo desta importante incursão histórico-filosófica, da mesma maneira que se procedeu nos últimos dois vínculos, respectivamente, no capítulo 8 e 9, em relação ao aspecto, característica, princípio da natureza da ciência relativo à ideia de “que as concepções filosóficas, religiosas, culturais, sociais em que a ciência é desenvolvida influenciam profundamente o trabalho dos investigadores desde tempos remotos” (PEDUZZI; RAICIK, 2020, p. 30). E nos capítulos 11 e 12, com o vínculo referente ao aspecto, característica, princípio relativo à ideia de que:

A experimentação não tem apenas o papel de corroborar ou de refutar teorias em sua forma final. Ela é parte integrante e essencial do processo de construção do conhecimento, que envolve o diálogo entre as expectativas e convicções teóricas do investigador e as observações que ele realiza. (PEDUZZI; RAICIK, 2020, p. 39)

### 13 JOHANNES KEPLER E A CONSTITUIÇÃO DE UMA NOVA ASTRONOMIA

No capítulo anterior, foram apresentadas e discutidas as importantes contribuições de Galileu para a constituição de uma nova física, especialmente, por sua busca de soluções para os três principais problemas empíricos fomentados pela astronomia copernicana.

Em suas explicações, Galileu construiu vários princípios fundantes da nova física: a equivalência ontologicamente dos conceitos de movimento e de repouso; a matematização do conceito de movimento, mediante experimentos sobre o movimento dos corpos em queda livre e sobre um plano inclinado; elaboração intelectual da lei da queda dos corpos; descrever geometricamente as composições dos movimentos uniforme e uniformemente acelerado por meio da parábola e; por fim, concluir corretamente que a tendência de um corpo em movimento circular sair pela tangente, cresce com sua velocidade de rotação e decresce com o raio que o liga ao centro de sua trajetória circular.

Considerando que algumas explicações de Galileu não foram suficientes para a plena solução desses problemas, neste capítulo serão discutidas as contribuições de Johannes Kepler para a constituição de uma nova astronomia e, conseqüentemente, de mais um passo no crescimento científico cognitivo da ciência moderna e, por conseguinte da tradição de pesquisa europeia nascente.

Imerso nos movimentos neoplatônico e hermético do Renascimento científico, Johannes Kepler (1571-1630) foi tanto um copernicano convicto, quanto também compartilhava das premissas metafísicas do culto ao Sol, da crença na harmonia, da beleza e da simplicidade matemática, como instrumento intelectual capaz de auxiliar na descrição e compreensão das leis da natureza que regem o universo físico.

Não obstante, é oportuno lembrar que Kepler também divergiu de Giordano Bruno, quanto à infinitude e pluralidade do universo, argumentando que o Sol e os planetas ocupavam uma posição especial no cosmos – uma ideia muito pertinente, haja vista à posição do sistema solar em nossa galáxia.

Em contraponto, Kepler foi responsável por realizar grandes feitos científicos no processo de constituição da nova astronomia e no estabelecimento da nova tradição de pesquisa europeia, a saber: romper com a dicotomia entre a astronomia e a física; universalizar o conceito de força, extraíndo-o da mecânica terrestre e aplicando-o ao domínio celeste, por um caminho tanto qualitativo quanto quantitativo; inaugurar a física do sistema solar; impor limites às especulações filosóficas, a partir da necessidade da confrontação entre

conjecturas e dados empíricos (observacionais); encontrar empiricamente as três leis do movimento planetário, pedras angulares da mecânica celeste newtoniana.

Com a *lei das órbitas elípticas*, Kepler mudou a abordagem conceitual e metodológica associada ao uso do movimento circular uniforme para descrever a trajetória do movimento dos planetas. Com a *lei das áreas*, explicou por que um planeta se movimenta com velocidade variável em sua órbita. E com a *lei dos períodos*, estabeleceu a relação entre o tempo de revolução e a distância média de um planeta ao Sol. Em face disso, cada um desses feitos será abordado, a seguir, começando com a imposição imposta, pelo próprio Kepler, às suas conjecturas filosóficas e metafísicas.

Além dessas importantes contribuições de Kepler, será feito um adendo histórico à explicação mecânica da gravidade por René Descartes, juntamente a abordagem dos problemas conceituais enfrentados por Newton que, como já observado, suas soluções foram fundamentais para ele conceber sua teoria da gravitação universal.

### 13.1 OS LIMITES ÀS ESPECULAÇÕES FILOSÓFICAS DE KEPLER

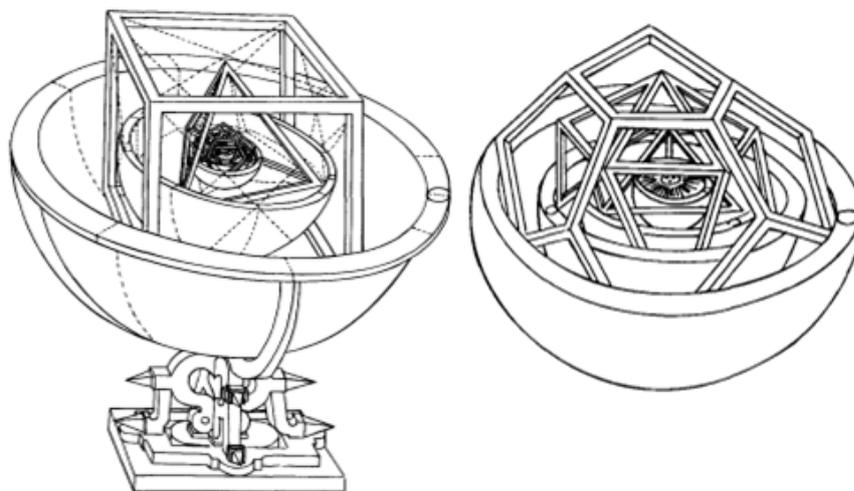
As imposições de Kepler sobre os limites das especulações filosóficas são resultantes da necessidade da confrontação entre conjecturas e dados observacionais. Elas podem ser observadas pelas críticas que Tycho Brahe lançou sobre a primeira obra de Kepler, *Mistério cosmográfico*, publicada em 1596, fundamentada por hipóteses metafísicas, que tomavam os cinco sólidos regulares da geometria como aportes teóricos para a construção do ordenamento do cosmos<sup>19</sup>.

De acordo com essa hipótese de Kepler, a estrutura do universo, um “esqueleto invisível”, podia ser observado pela inscrição e circunscrição dos cinco sólidos regulares (cubo, pirâmide, dodecaedro, icosaedro e octaedro), nas esferas orbitais dos planetas Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter e Saturno, admitindo-se o sistema copernicano (Figura 65), a seguir.

---

<sup>19</sup> Guardadas as devidas proporções epistêmicas, vale observar que, até os dias atuais, a cosmologia moderna e contemporânea, mediante a teoria da relatividade geral de Einstein, nos proporciona uma visão geométrica do universo.

Figura 65 – O modelo cosmológico dos sólidos regulares de Kepler.



Fonte: Bernard Cohen (1992, p. 135).

A partir do modelo cosmológico (Figura 65), Kepler inscrevia e circunscrevia os cinco sólidos em esferas, intercalando-os em uma sequência pertinente, com as dimensões apropriadas, objetivando a conformidade entre as distâncias médias dos planetas ao Sol e os raios dessas esferas. Com isso, ele estabeleceu a seguinte disposição: esfera de Saturno – hexaedro regular (cubo), esfera de Júpiter – tetraedro regular (pirâmide), esfera de Marte – dodecaedro regular, esfera da Terra – icosaedro regular, esfera de Vênus – octaedro regular, esfera de Mercúrio. Com esse modelo, ele acreditava que a estrutura desenhada pela hipótese dos sólidos era de certa forma uma expressão do conceito pitagórico de *harmonia celeste*.

A hipótese dos sólidos perfeitos expressaria, [...], a harmonia celeste, a estrutura objetiva que possibilita ao intelecto humano tanto explicar porque existem seis planetas e porque eles se mantêm a certas distâncias do centro de movimento, o Sol, quanto porque, para qualquer movimento de translação, os movimentos mostram-se constantes. (KEPLER, 1938, p. 14 *apud* TOSSATO, 204, p. 560-561)

É importante observar que Kepler não acreditava na existência real das esferas planetárias, nem atribuía realidade física aos sólidos regulares que as separavam. Pelo contrário, para ele, a harmonia do universo só podia ser compreendida pela linguagem matemática. Por isso, eram os elementos matemáticos, geométricos que forneciam a certeza de que podia encontrar a resposta dos motivos de serem seis e “não vinte ou cem”, os planetas do sistema solar, bem como de distarem esses astros um do outro da forma como o fazem.

Por essa crença de Kepler se encontrada no pensamento científico desde Pitágoras de Samos, torna-se oportuno substantivar, mais uma vez, o vínculo epistemológico criado

(capítulo 4, seção 4.2.1) com o aspecto, característica, princípio da natureza da ciência relativo “a ênfase que a ciência dar à linguagem matemática como meio mais preciso e mais simples de estabelecer relações” (KIMBALL, 1967, p. 112).

Não obstante, fazendo frente a essas pretensões keplerianas, em 1598, Tycho Brahe escreveu uma carta ao professor e mestre de Kepler, Maestlin (1550 - 1631), na qual descrevia suas objeções, dizendo:

Recebi há pouco tempo uma obra interessante do excelente matemático J. Kepler, da Estíria, na qual ele faz de maneira engenhosa uma tentativa para colocar as órbitas dos planetas numa relação harmônica, arranjadas ao modo copernicano, com os cinco corpos regulares. Procurarei escrever logo a esse senhor e, tanto quanto o meu trabalho permite, comunicar-lhe-ei o que penso dessas especulações. Se a melhora da astronomia deve ser feita muito mais *a priori*, por meio desses corpos regulares, do que *a posteriori*, tendo como base o conhecimento dos fatos obtidos pelas observações, tal como tu sugeres, teremos que esperar seguramente um longo tempo, se não eternamente, e em vão, até que alguém o faça. Sendo dado que a utilização das medidas dos corpos regulares deve apoiar-se em observações prévias e ser confirmada por elas, segue-se que, fora das relações gerais, sejam tais ou tais, não se pode deduzir os particulares com a precisão requerida; e disso, sem dúvida, não se pode escapar. (KOYRÉ, 1961, p. 161-162 *apud* TOSSATO, 2004, p. 558)

Nesse trecho, a crítica de Brahe enfatiza que a astronomia feita *a priori* traz problemas de saber qual é a estrutura real do cosmos, isto é, a causa dos movimentos planetários. Isso porque, o alcance desse conhecimento tornava-se impossível, pois seria preciso testar todas as hipóteses existentes, algo humanamente inalcançável (TOSSATO, 2004). Para Brahe, as especulações filosóficas *a priori* eliminavam a possibilidade de admissão da estrutura celeste pelas causas, pois Kepler fazia o caminho inverso, ia da causa para os efeitos. Portanto, Brahe o criticava, afirmando que:

[...] se é que existe de fato uma estrutura harmônica no céu, o trabalho deve ser conduzido a partir dos efeitos, isto é, a partir dos dados observacionais. São os posicionamentos planetários, as observações dos fenômenos celestes, tais como o cometa de 1577, os eclipses, as conjunções, as oposições etc. que determinam a estrutura que se construirá para descrever as harmonias celestes. (TOSSATO, 2004, p. 558)

Com mais essa crítica, Brahe considerava que as especulações filosóficas de Kepler, por serem *a priori*, não passavam de suposições metafísicas, as quais não podiam ser obtidas a partir dos fenômenos celestes observados, por exemplo, o movimento dos planetas. Escrevendo diretamente para Kepler, ele confessou o seguinte:

[...] No entanto, o mais importante é que eu não aprovo aquilo que no teu engenhoso escrito se mostra, entre outras coisas, como um erro comum, o de atribuir realidade às órbitas celestes. Por esta via, ordenas prontamente as imaginações copernicanas e, desse modo, não negarei que subscreves facilmente os movimentos celestes, para obter certa simetria, à qual subjazem razões para os planetas moverem-se ao redor de um centro com distância diferente do Sol ou da Terra; mas as proporções das disposições e a harmonia são dadas a posteriori pelos movimentos, quando as suas ocorrências se apresentam e, ao contrário, não se pode pretender que são dadas a priori, tal como tu e Maestlin querem, e elas são difíceis de encontrar. (BRAHE, 1984 *apud* TOSSATO, 2004, p. 559)

Em face disso, para Brahe, os movimentos celestes não podiam ser descobertos pela admissão prévia de uma estrutura como as dos sólidos regulares. Pelo contrário, eram os próprios movimentos observados que determinavam, satisfatoriamente, quais eram os elementos que a estrutura deveria conter.

Portanto, Brahe enxergou na hipótese de Kepler sua “dificuldade de expressar os movimentos planetários, isto é, a estipulação das causas sem um exame prévio dos efeitos, torna a empreitada sem suporte, sem base sólida, sujeita apenas ao título de opinião” (TOSSATO, 2004, p. 562), não de conhecimento seguro para a astronomia. Em face disso, a influência de Brahe sobre a mudança metodológica de Kepler encontra-se expressa no conteúdo de sua segunda obra, *Astronomia nova*, publicada em 1609, na qual Kepler apresenta as duas leis empíricas dos movimentos planetários, *a lei das áreas e a lei das órbitas elípticas*.

Ao ter colocado os limites para a metafísica kepleriana, Brahe forneceu a Kepler um arrefecimento da possibilidade de fazer astronomia supondo apenas a estrutura matemática subjacente aos fenômenos celestes. Com isso, Kepler aderiu à ideia de que o conhecimento deve ser elaborado a partir das informações factuais, observacionais e da confrontação com as hipóteses (TOSSATO, 2004).

Com efeito, a partir desse direcionamento epistêmico impulsionado, especialmente, por Brahe, torna-se pertinente a criação de um importante um vínculo epistemológico específico, desta vez, sobre a natureza do conhecimento científico, produzido no contexto do século XVII, relativos às ideias sobre o seu: caráter experimental e sujeito a mudanças; empírico (baseado e/ou derivado da observação do mundo natural); subjetivo (carregado de pressupostos teóricos); em parte, produto da inferência humana, da imaginação e da criatividade (envolve a invenção da explicação); social e culturalmente incorporado (ABD-EL-KHALICK; BELL; LEDERMAN, 1998). Frente a cada um desses aspectos fundamentais, é importante afirmar que suas substantivações transcorrem a história conceitual da

astronomia, da cosmologia e da física, desde a Grécia Antiga, porém, é no contexto dos séculos XVI e XVII, que a maior parte deles torna-se, ainda mais, evidente e vinculantes à ciência moderna nascente nesses períodos. Dessa forma, sob a influência desse direcionamento epistemológico,

No mesmo livro em que ele [Kepler] diz não ter palavras para expressar o sentimento de alegria e de satisfação que se apoderou do seu espírito ao compreender o mistério cósmico, ele afirma, algumas páginas depois, cautelosamente, que se a determinação astronômica das órbitas não referendar a sua tese, “terão sido inúteis todos os nossos esforços prévios” – “a verdade ou a mentira decidida pelos fatos observados: sem transição, em um único surpreendente salto, atravessamos a fronteira entre a especulação metafísica e a ciência empírica.” O modelo kepleriano do universo não suportou o confronto com os fatos, como compreenderia mais tarde Kepler, para a sua frustração, ao ter acesso ao acervo das observações precisas de Tycho Brahe. (PEDUZZI, 2018a, p. 184)

Nessa direção característica do novo *modus operandi* de se produzir conhecimento científico, na próxima seção, encontra-se a abordagem sobre as leis de Kepler e sua mudança conceitual e metodológica para a constituição de uma nova astronomia.

### 13.2 AS LEIS DE KEPLER E SUAS MUDANÇAS METODOLÓGICAS

As leis de Kepler e suas mudanças conceituais e metodológicas estão associadas ao uso do movimento circular uniforme para descrever a trajetória do movimento dos planetas. Uma vez que esses elementos tornaram-se parte fundamental do empreendimento científico direcionado para o rompimento da dicotomia entre a física e a astronomia, na constituição da astrofísica. Em sua obra *Astronomia nova*, Kepler anunciou qual era a principal tarefa científica, a saber:

Meu objetivo no presente trabalho é o de reformular a teoria astronômica (especialmente para o movimento de Marte) em todas as suas três formas de hipóteses [ptolomaica, copernicana e brahiana], de modo que se possam construir tabelas que correspondam aos fenômenos celestes [...] Inquiri sobre as causas físicas e naturais dos movimentos (dos planetas). O resultado eventual dessas considerações é a formulação de argumentos claros que mostram que a opinião de Copérnico sobre o mundo (sofrendo pequenas alterações) é a verdadeira e que as outras duas são falsas. (KEPLER, 1938, p. 20 *apud* TOSSATO, 2004, p. 562)

Sobre o problema empírico da órbita de Marte, Ptolomeu e Copérnico tentaram estabelecer, sem sucesso, os parâmetros de sua órbita. Mas, por um breve período, a cada 17 anos, tanto as predições de um quanto do outro, mostravam-se terrivelmente erradas. Para

Ptolomeu, Marte ficava para trás nas previsões em cinco graus (GINGERICH, 2008). Para Copérnico, o planeta ultrapassava cerca de quatro graus. Em face disso, a órbita de Marte tornava-se um *problema empírico anômalo*, isto é, não resolvido tanto para o sistema copernicano quanto para o conjunto de teorias ptolomaicas.

De posse dos dados de Brahe, mas utilizando-se da premissa do movimento circular uniforme, Kepler testou, primeiramente, a conformidade entre as observações de Marte e o modelo equante da *teoria planetária ptolomaica* (Figura 66).

Figura 66 – Modelo equante da teoria planetária ptolomaica.



Fonte: Peduzzi (2018a, p. 186).

Nesse teste, Kepler tentava encontrar um raio da órbita circular; a direção da reta, em relação às estrelas fixas, que passa pelos pontos de aproximação de máxima e mínima elongação (afélio e periélio) de Marte, em relação ao Sol; e a posição de três pontos sobre essa reta, o centro da órbita de Marte, o ponto equante e a localização do Sol (KOESTLER, 1989). Pela dificuldade da tarefa, dramaticamente, ele escreveu:

Se tu, leitor, estás cansado deste fatigante método de cálculo, apieda-te de mim que tive de fazer dele pelo menos setenta repetições, como enorme perda de tempo; não ficarás, tampouco, surpreendido, se souberes que já faz cinco anos quase que enfrentei Marte. (KOESTLER, 1989, p. 220)

“Após cinco anos de árduo trabalho, Kepler conclui que algumas posições previstas teoricamente para Marte apresentavam uma discordância de 8 minutos de arco, em comparação com os dados observacionais de Tycho Brahe” (PEDUZZI, 2018a, 185), cuja precisão era de quatro minutos de arco.

Diante da confrontação entre observação e teoria, Kepler aprendeu com Brahe que, se seu modelo não fosse corroborado, ele deveria ser modificado ou até mesmo abandonado.

Mas, se optasse pela alteração, seria obrigado a aumentar sua complexidade matemática, tirar sua realidade física e torná-lo puramente geométrico descritivo, semelhante às astronomias ptolomaica e copernicana (PEDUZZI, 2018a). Por contragosto,

[...] uma teoria construída sobre anos de trabalho e tormentos foi imediatamente deixada de lado por uma discordância de oito míseros minutos de arco. Porém, em vez amaldiçoá-los com uma pedra de tropeço, Kepler transformou-os na pedra fundamental de uma nova ciência. (KOESTLER, 1989, p. 221)

Como grande expressão desse momento tão significativo para o desenvolvimento cognitivo da astronomia, estar o novo ideal de produção do conhecimento científico, que se apresenta com rara propriedade (PEDUZZI, 2018a).

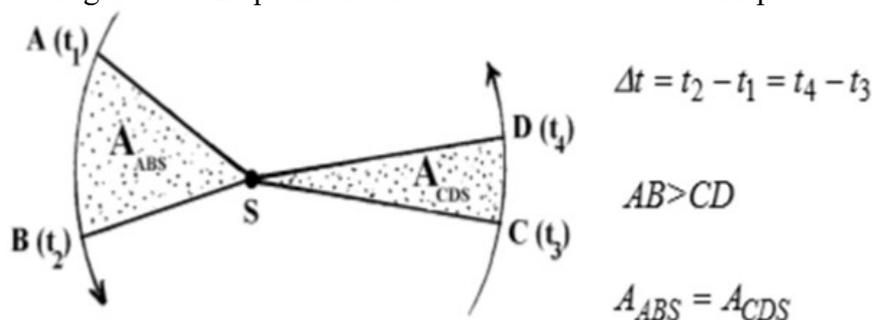
Nesse novo ideal, a aceitação de uma teoria passa a ser condicionada à sua conformidade e/ou compatibilidade como os dados empíricos. Antes de Kepler, “quando um pormenor de menos peso não se ajustava a uma hipótese de maior importância, era dissimulado ou posto fora. Mas essa indulgência consagrada pelo tempo deixou de ser permissível” (KOESTLER, 1989, p. 221). Em outras palavras, o conhecimento científico adquiriu mais um elemento de validade, que obtém suas credenciais, por meio do confronto rigoroso entre hipóteses explicativas e dados empíricos.

Nessa direção, Kepler compreendeu que o ponto de partida para a solução do problema da órbita de Marte passava, inicialmente, pela determinação da órbita da Terra. Em sua labuta, ele constatou que a órbita encontrada para a Terra estava muito próxima da forma geométrica circular, mas com o Sol um pouco deslocado do ponto central.

Mediante as posições aparentes do Sol, para cada data do ano, Kepler conseguiu localizar a posição da Terra na sua órbita e estimar sua velocidade ao longo de sua órbita. Com isso, aferiu que a Terra se move rapidamente quando próxima do Sol, implicando que, em um mesmo intervalo de tempo, os comprimentos dos arcos descritos por ela, para pontos de sua órbita mais afastados do Sol, eram menores do que aqueles determinados, quando estava mais próxima desse astro (PEDUZZI, 2018a).

A ilustração de dois trechos da órbita da Terra (Figura 67), a seguir, denota esse fato. Para um mesmo intervalo de tempo ( $\Delta t = t_2 - t_1 = t_4 - t_3$ ), a Terra se movimenta mais rapidamente no trecho (AB) e mais lentamente no trecho (CD), de forma que as áreas (ABS e CDS) são iguais.

Figura 67 – Esquema ilustrativo da lei das áreas de Kepler.



Fonte: Peduzzi (2018, p. 187).

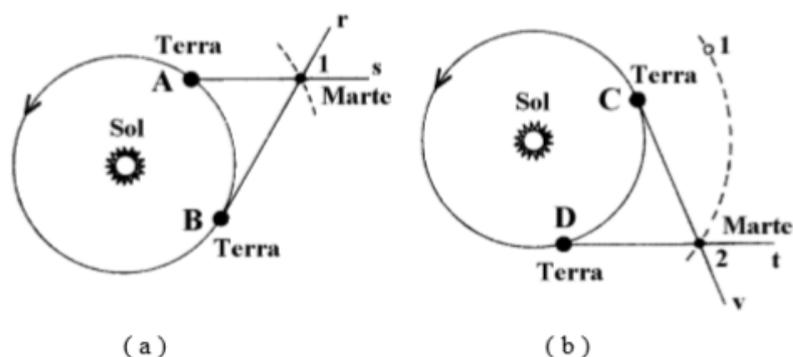
Na brilhante descoberta de Kepler, nessa evidência observacional ilustrada pela (Figura 67), uma linha traçada da Terra ao Sol gera áreas iguais, em iguais intervalos de tempo. Vale lembrar que, quando chegou a esse resultado, Kepler ainda não conhecia a órbita de Marte, mas constatou que essa regra encontrada para a Terra se aplicava também ao planeta vermelho. Além disso, Kepler realizou o cálculo das áreas apenas para posições mais próximas e mais distantes dos planetas Terra e Marte. Nesse sentido, acredita-se que seus pressupostos metafísicos neoplatônicos de beleza, de harmonia e de simplicidade os tenham influenciado na conclusão da validade geral para as órbitas dos demais planetas.

Por essa generalização, Kepler obteve a *lei das áreas* ou *segunda lei de Kepler* do movimento planetário, cujo princípio diz que: *uma linha traçada do Sol a um planeta varre áreas iguais em iguais intervalos de tempo*. Destaca-se que, nos livros de física, essa lei aparece como *segunda lei de Kepler*, por um critério talvez didático, mas ele a encontrou antes da *lei das órbitas* ou *primeira lei de Kepler*.

Por correspondência, a determinação da forma da órbita de Marte pela *lei das áreas* tornou-se tão clarividente que, ao encontrar a forma elíptica, Kepler exclamou admirado, o seguinte: “Ah que tolo sou eu! Eu não conseguia descobrir por que o planeta entrava numa órbita elíptica. [...] Estando as razões em concordância com a experiência, não há outra figura para descrever a órbita do planeta (Marte) que não uma elipse perfeita” (GINGERICH, 2008, p. 114). Para chegar a essa conclusão, Kepler teve de obter vários pontos da órbita desse planeta, separados por um período marciano, utilizando as propriedades das cônicas desenvolvidas por Apolônio de Perga.

Em sua tarefa, Kepler levou em consideração que a Terra se encontrava em diferentes posições na sua órbita, para um dado período de Marte: a intersecção das retas que passam pelos dois planetas especifica uma posição de Marte em sua órbita (Figura 68), a seguir.

Figura 68 – Posições da órbita de Marte vistas da Terra.



Fonte: Peduzzi (2018a, p.188).

Na Figura 68: na ilustração (a) estão as posições (A e B) ocupadas pela Terra, em sua órbita, após um período marciano (durante esse tempo, a Terra não chega a executar duas voltas completas); a interseção das semiretas (r e s) especifica um (ponto-1) da órbita de Marte em torno do Sol; a determinação de outro (ponto-2) dessa órbita ilustração (b) exige um novo par de dados observacionais de Marte, separados por um período e o conhecimento das respectivas posições da Terra, em sua órbita, nesse intervalo de tempo.

A descoberta extraordinária da forma da órbita de Marte foi acompanhada por outra, qual seja, a de que o Sol encontrava-se em um dos focos da *elipse*, estando o outro foco vazio. Estendendo esse resultado para os demais planetas, Kepler estabeleceu mais um constructo para o rompimento da dicotomia entre a física e a astronomia: a *lei das órbitas elípticas*, ou *primeira lei de Kepler* do movimento planetário. Por ela, *cada planeta do sistema solar tem por órbita uma elipse com o Sol em um dos focos*. Por sua vez, a *lei das órbitas elípticas* obtida empiricamente foi o constructo que, de uma vez por toda, suplantou o uso do movimento circular uniforme, empregado na astronomia por mais de dois mil anos, desde Pitágoras de Samos.

Por conseguinte, os pequenos valores da excentricidade orbital dos planetas do sistema solar, conhecidos até a época de Kepler, mostram que as dificuldades para banir o uso do movimento circular uniforme, realmente não foram triviais. Por exemplo, Mercúrio ( $e = 0,206$ ) – o único com maior excentricidade – e os demais planetas, em ordem decrescente, apresentam as seguintes excentricidades: Marte ( $e = 0,093$ ), Saturno ( $e = 0,056$ ), Júpiter ( $e = 0,048$ ), Terra ( $e = 0,017$ ) e Vênus ( $e = 0,007$ ). A excentricidade de uma elipse é uma propriedade geométrica que determina o seu maior ou menor grau de achatamento, quanto

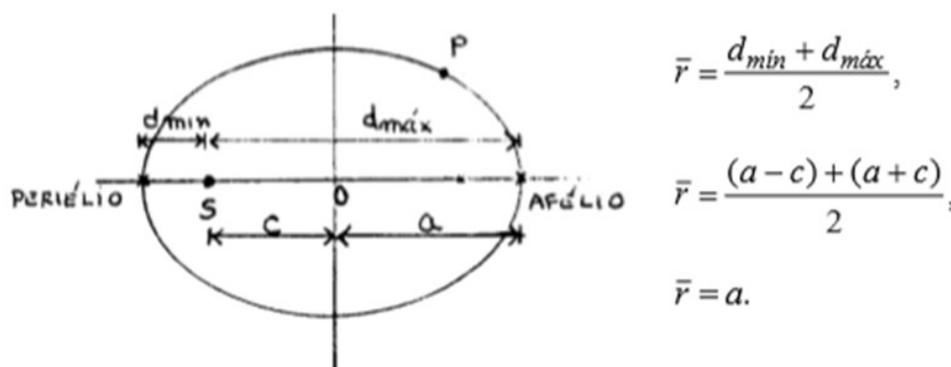
mais próximo de um, mais achatada será sua forma, e quando igual a zero, tem-se o caso particular da circunferência.

Nessa jornada científica, oito anos depois de encontrar as duas primeiras leis, Kepler encontrou a *terceira lei* ou *lei dos períodos*, publicando-a, em 1618, na sua terceira obra, *Harmonice Mundi* – A harmonia dos mundos. Nesse trabalho, ele demonstrou a acentuada intuição do seu espírito científico ao estabelecer a relação de dependência entre as distâncias dos planetas ao Sol e o seu período de revolução.

Nessa demonstração, ele percebeu que “as velocidades orbitais dos planetas decresceram com a distância ao Sol, com o conseqüente aumento dos correspondentes períodos de revolução” (PEDUZZI, 2018a, p. 192). E, ansioso desde sempre para encontrar uma lei que vinculasse as diversas órbitas planetárias, seu achado foi alcançado justamente pela *lei dos períodos: a razão entre o cubo da distância média de um planeta ao Sol e o quadrado do seu período de revolução é a mesma para todos os planetas do sistema solar* (Idem). Matematicamente se lê ( $r^3/T^2 = k$ ), em que  $k$  é uma constante que tem o mesmo valor para todos os planetas (PEDUZZI, 2018a).

Pela terceira lei de Kepler, “a distância média de um planeta ao Sol é igual à metade da distância entre o periélio e o afélio, pontos, respectivamente, de menor e de maior afastamento do planeta em relação ao Sol”. O que significa que essa distância média ( $r$ ) é igual ao semieixo maior da órbita elíptica, expresso nas equações do lado direito da (Figura 69).

Figura 69 – Distância planetária ao Sol igual ao semieixo maior da órbita elíptica.



Fonte: Peduzzi (2018a, p. 192).

A partir desses aportes teóricos, Kepler buscou uma solução para os problemas ligados à causa física do movimento dos planetas, próxima seção, na qual será oportuno

observar que as perguntas são aproximadamente semelhantes às fomentadas pelos trabalhos de Tycho Brahe sobre a estrela nova e o cometa, mas acrescidas em suas suposições, o elemento ontológico causal do movimento planetário.

### 13.3 SOLUÇÕES DE KEPLER PARA A CAUSA DO MOVIMENTO PLANETÁRIO

Após estabelecer os novos aportes teóricos para a constituição da nova astronomia, Kepler procurou uma solução para as seguintes perguntas: *Qual é a causa do movimento planetário? Que tipo de força proveniente do Sol vincula os planetas às órbitas elípticas e faz com que as suas velocidades orbitais decresçam segundo a ordem em que dele distam? Qual o mecanismo de ação dessa força e como ela varia com a distância Sol-planeta?* (KOESTLER; 1989; PEDUZZI, 2018a).

Em busca de respostas, Kepler se fundamentou no trabalho do físico inglês William Gilbert (1540 - 1630), *De magnete*, publicado em 1600. Acerca disso, ele próprio afirmou: “Você estará convencido após ler meu livro, que eu pus um telhado celeste na filosofia de Gilbert, o qual havia construído seus alicerces terrestres” (GUIMARÃES, 2000, p. 77). Esse livro de Gilbert:

[...] representa um marco na ciência do século XVII, quanto à atitude em relação à natureza e às ciências. Gilbert criou um tratado completo de magnetismo, mas seus objetivos eram maiores: ele esperava inaugurar uma nova cosmologia, na qual o magnetismo teria papel central, ou uma nova filosofia da natureza. Sua obra divide-se em seis livros, cada um com seis capítulos. No prefácio, para não deixar dúvida quanto ao seu compromisso com a ciência experimental, Gilbert dedicava o *De magnete* aos que não buscam o conhecimento nos livros, mas nas próprias coisas. (GUIMARÃES, 2000, p. 74)

Em seu projeto cosmológico, Gilbert considerava que o próprio globo terrestre fosse um grande ímã, no qual, por exemplo, o alinhamento de uma bússola, na direção norte-sul, podia ser comparado com o fato de o eixo de rotação ter uma direção constante no espaço, desprezando-se os movimentos de precessão e de nutação – uma pequena oscilação periódica do eixo de rotação da Terra, com um ciclo de 18,6 anos, causada pela força gravitacional da Lua sobre a Terra (GUIMARÃES, 2000).

Acreditando nessa ligação entre o magnetismo de uma pedra e o da pedra-ímã extraída de uma mina, para Gilbert, “cada fragmento separado da Terra exibia em

experimentos indubitáveis, todo o ímpeto da matéria magnética, e nos seus vários movimentos, seguia o globo terrestre e o princípio comum de movimento” (Ibid., p. 78).

Mediante essa ideia, e retomando dois problemas empíricos fomentados por Copérnico, a saber: *Por que os corpos não são ejetados para fora da Terra, devido ao seu movimento de rotação? Por que os corpos caem em direção centro da Terra?* Gilbert apresentou as seguintes explicações: para o primeiro, a ação do ímã sobre a matéria ordinária a mantinha coesa e agrupava os corpos sobre a superfície da Terra, por isso, eles não eram ejetados para fora devido ao rápido movimento de rotação axial (1700 km/hora); para o segundo, a queda dos corpos era devido à ação de uma força magnética exercida pela Terra sobre eles.

Em seus resultados experimentais do magnetismo, com ímãs de diferentes tamanhos e formas, de modo qualitativo, isto é, sem mensurar esses resultados, Gilbert constatou que, quanto maior o tamanho de um ímã, maior o alcance dos seus efeitos. Assim, para o caso da Terra, ele pensava que a força do seu magnetismo se estendia até a Lua. Outra conclusão sua, dizia respeito à reciprocidade da interação entre dois ímãs, corpos de massas diferentes se atraem mutuamente, com intensidades dependentes das massas. Para o caso da interação Terra-Lua, por exemplo, se a Terra exercesse uma força magnética sobre a Lua, o contrário era recíproco, mas a intensidade dessa força seria menor, devido ao tamanho da Terra em comparação com o tamanho da Lua.

Nesse contexto, Gilbert também apresentou uma concepção da *gravidade* muito diferente das concepções de Copérnico e de Galileu, cuja ideia fundamentalmente aguçou o espírito científico, na direção da gravitação universal newtoniana. Para Gilbert, a gravidade, ao contrário de um atributo da matéria, era pedaços concretos de matéria que ele considerava como centros de gravidade, que exercia, entre si, forças de natureza magnética (PEDUZZI, 2018a).

De posse dessas ideias, Kepler as aplicou no seu sistema solar, acreditando ter encontrado uma explicação física para o movimento dos planetas. Para tanto, ele também tratou a Terra como um grande ímã que atrai os corpos para a sua superfície, mediante a ação de sua força magnética, e adotou a ideia de atração mútua entre dois corpos. Em um trecho da introdução de seu livro *Astronomia nova*, ele escreveu sua ideia de gravidade proporcional à massa de atração:

[...] se duas pedras fossem colocadas em qualquer lugar do espaço, uma perto da outra, e fora do alcance 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)

Embora não desenvolvida, a ideia de Kepler foi tão brilhante que o matemático e astrônomo francês Jean Baptiste J. C Delambre (1749 - 1822) escreveu: “eis uma coisa nova, verdadeiramente bela, e que só precisava de alguns desenvolvimentos e de algumas explicações. Eis os fundamentos da física moderna, celeste e terrestre” (MASON, 1962, p. 154-155 *apud* PEDUZZI, 2018a, p. 194). Porém, por via contrária, Kepler seguiu o caminho do magnetismo de Gilbert, procurando explicar a causa do movimento dos planetas, supondo, para isso, que: “o Sol emitia eflúvios magnéticos que, à semelhança dos raios de uma roda, giravam com ele no plano de rotação dos planetas. Essas emanações magnéticas os impeliam em seus cursos devido a forças tangenciais” (PEDUZZI, 2018a, p. 194). Por essa explicação,

[...] força e velocidade estavam intimamente relacionados no pensamento de Kepler, que, dessa forma, não podia aceitar um movimento sem força. Por outro lado, essas forças, que como braços gigantes arrastam os planetas em suas órbitas, deviam sua existência ao movimento de rotação do Sol. Se o Sol não girasse, nenhum planeta poderia se mover em torno dele. Analogamente para o sistema Terra-Lua: se a Terra não girasse, a Lua não poderia se mover em torno da Terra. (PEDUZZI, 2018a, p. 194)

Especulando as razões da lei das órbitas elípticas, Kepler concebeu o Sol como um grande ímã esférico com um polo no centro e outro distribuído sobre sua superfície, bem como os planetas como magnetos bipolares. Para tanto, ele considerou que cada planeta apresentava um eixo com uma orientação fixa no espaço e poderia alternadamente ser atraído ou repellido pelo Sol. Além disso, admitiu também que, na circularidade da órbita planetária deformada em uma elipse, cada planeta, conforme apontasse para o Sol, seu polo magnético, por atração o aproximaria, ou por repulsão o afastaria do Sol (KOESTLER, 1989; GUIMARÃES, 2000; PEDUZZI, 2018a).

Com suas especulações, Kepler buscou uma relação de dependência da força atrativa do Sol com a distância dos planetas, supondo que a intensidade dessa força pudesse variar com o inverso do quadrado da distância média do planeta ao Sol. Uma ideia brilhante, mas que foi abandonada, devido às consequências que ele não acreditava serem possíveis: “uma força do tipo  $(1/r^2)$  deveria se estender em todas as direções através do espaço, como ocorre com a luz, e não restringir sua ação ao plano das órbitas planetárias, como acreditava” (PEDUZZI, 2018a, p. 194).

A partir da *lei das áreas* e a proporcionalidade entre força e velocidade da física aristotélica, Kepler também encontrou a relação de dependência entre força e distância ( $F$  e  $r$ ). Mediante sua segunda lei, constatou que para qualquer ponto da órbita elíptica de um planeta, “o produto da velocidade do planeta, neste ponto, pela sua distância ao Sol, é uma constante ( $r \cdot v = \text{constante}$ )” – (PEDUZZI, 2018a, p. 195). Com isso, a “velocidade ( $v$ ) do planeta é inversamente proporcional à sua distância ao Sol ( $v \propto 1/r$ )” – (Idem). Com isso, “observando a proporcionalidade entre força e velocidade da física aristotélica ( $F \propto v$ ), a qual Kepler compartilha, segue que ( $F \propto 1/r$ )” – (Idem).

Apesar do conteúdo específico de sua física estar errado, observa-se em seu trabalho uma brilhante originalidade e esforço sem igual na abordagem dinâmica do sistema solar. Suas exposições astrofísicas possuem uma mensagem especial para os cientistas que sentiram a necessidade de indagar os primeiros princípios da explicação mecânica da natureza (PEDUZZI, 2018a).

Embora seu estudo transmita essa mensagem, alguns comentários de seus pares, físicos e astrônomos alemães, materializaram-se na aversão da comunidade científica, à época, para com a aceitação de suas leis empíricas do movimento planetário (KOESTLER, 1989). Por exemplo, em termos da compreensão dos procedimentos matemáticos adotados por Kepler, o físico alemão, conhecido por Johannes Brengger, afirmou:

Quando dizeis que o vosso alvo é ensinar ao mesmo tempo uma nova física do céu e uma nova espécie de matemática, não baseada em círculos, mas em forças magnéticas e inteligentes, rejubilo-me convosco, embora deva confessar francamente que não consigo imaginar, e muito menos compreender, tal procedimento matemático. (KOESTLER, 1989, p. 240)

Outro astrônomo, chamado de Dantzig, P. Crueger, afirmou que: “Tentando provar a hipótese copernicana pelas causas físicas, introduz Kepler estranhas especulações que não pertencem ao domínio da astronomia, mas ao da física” (Ibid., p. 240). Essa objeção, em particular, foi compartilhada com a observação do próprio professor de Kepler, Maestlin, quando ele estava procurando as causas físicas da variação de velocidade dos planetas em torno do Sol. Maestlin comentou com Kepler: “Acredito que as causas físicas devam ser deixadas de fora desse assunto, e as questões astronômicas explicadas apenas de acordo com o método astronômico, com a ajuda de hipóteses e causas astronômicas, e não físicas” (GINGERICH, 2008, p. 213).

Em face disso, nem na Itália com Galileu, nem na Alemanha, com os seus compatriotas, o significado e as implicações dos estudos de Kepler foram percebidos. Somente os britânicos: o viajante Edmund Bruce, o matemático Thomas Harriot, preceptor de Sir Walter Raleigh, o reverendo John Donne, o astrônomo Jeremiah Horrocks e finalmente Isaac Newton demonstram uma atitude diferente (KOESTLER, 1989).

Newton, em particular, transformou as três leis de Kepler na pedra angular da sua mecânica celeste, mostrando, no *Principia*, o verdadeiro significado físico e as condições de generalidade e aplicabilidade de cada uma delas. Ele demonstrou inequivocamente a ampla relevância desse conhecimento para a estruturação da *nova física* e da nova astronomia nascentes.

Antes de chegar ao trabalho de Newton, na próxima seção, é importante fazer o adendo histórico, já mencionado, sobre explicação mecânica da gravidade de René Descartes (1596 - 1650), no contexto de uma nova cosmologia fundamentada na sua visão de mundo e filosofia mecanicista, predominante no pensamento científico europeu, por muitos séculos. A principal função deste adendo, mesmo que breve, perpassar por dimensionar a importância do trabalho de Newton, ao fazer frente a uma nova filosofia da natureza, isto é, a filosofia mecanicista cartesiana, que fazia parte do contexto da revolução científica do século XVII.

#### 13.4 A EXPLICAÇÃO MECÂNICA DA GRAVIDADE POR RENÉ DESCARTES

No contexto da tradição de pesquisa europeia, que amplamente vai se constituindo, a filosofia da natureza de Descartes preconizava uma visão de mundo mecanicista, pela qual todos os fenômenos naturais deveriam ser explicados pelas leis da matéria em movimento, diferentemente das ideias aristotélicas. A matéria, por exemplo, inerte, possuía extensão e movimento e, todo corpo, simplesmente, era uma substância com três dimensões (comprimento, largura e profundidade) – (PEDUZZI, 2018b).

Descartes definiu o movimento afirmando que: o movimento propriamente dito, em detrimento do senso comum, isto é, ação pela qual um corpo passa de um local para o outro, “é a translação de uma parte da matéria ou de um corpo da proximidade daqueles que lhe são imediatamente contíguos – e que consideramos em repouso – para a proximidade de outros” (DESCARTES, 1997, p. 69). Em outras palavras, o movimento e o repouso, como estados da matéria, são apenas duas maneiras diferentes em que o corpo se encontra, em relação a outros corpos, isto é, a um referencial.

Para esse filósofo francês, apenas o contato e o choque representavam possibilidades de ação entre os corpos. E no cerne da sua filosofia mecanicista, as leis da natureza podiam ser expressas por leis matemáticas imutáveis, pois estas traduziam o curso regular dos fenômenos da natureza através do tempo. Em conformidade com essa visão de mundo, Descartes formulou o conceito de *quantidade de movimento*, por uma perspectiva escalar, como o produto da quantidade de matéria de um corpo pela velocidade com a qual ele se acha animado. Por conseguinte, considerou também que a quantidade *de movimento do universo* era conservada. E, por fim, formulou uma ideia, que posteriormente, veio a se construir, com Newton, no *princípio da inércia*, justamente porque no espaço de Descartes a ideia do vazio era impossível. Em seu livro *Principia Philosophiae, Princípios da Filosofia*, publicado em 1644, Descartes enunciou essa ideia considerando-a com duas leis da natureza, a saber:

A primeira lei da natureza: cada coisa permanece no seu estado se nada o alterar; assim, aquilo que uma vez foi posto em movimento continuará sempre a se mover; a segunda lei da natureza: todo corpo que se move tende a continuar o seu movimento em linha reta. (DESCARTES, 1997, p. 76-77)

Por esses dois enunciados, é correto afirmar que com Descartes, a ideia de *inércia*, apesar de inconcebível em um espaço preenchido por matéria, é efetivamente *linear, e não circular* como concebida pelo *movimento neutro* de Galileu. Isso porque, na visão de mundo mecanicista cartesiana, o universo é pleno e cheio de matéria em toda a sua extensão, não existe propriedades físicas nem dimensões no vazio, pois o nada é a ausência de substância.

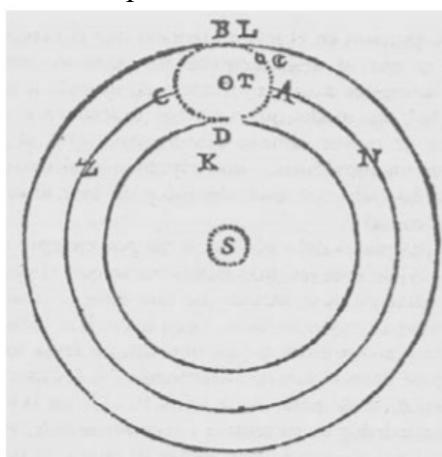
Por outro lado, é a matéria que concede sentido ao conceito de espaço – “nunca distinguido da extensão em comprimento, largura e altura” (Ibid., p. 65). Tornando a matéria e extensão duas propriedade indissociáveis no universo, para Descartes, a correção da “falsa opinião da nossa percepção a respeito do vazio” (Ibid., p. 67) poderia ser obtida abstraindo uma ideia semelhante à “relação necessária de uma figura côncava de um recipiente e a extensão compreendida nesta concavidade” (Idem), o nada, vazio, não pode ter extensão. Para ele:

É por isso que se nos perguntassem o que aconteceria se Deus retirasse qualquer corpo que está em um recipiente sem permitir que outro aí entrasse, responderíamos que as suas paredes [se aproximariam tanto que] imediatamente se tocariam. Ora, dois corpos tocar-se-iam necessariamente quando não há nada entre eles, porque seria contraditório que dois corpos estivessem afastados, isto é, que houvesse distância entre ambos e que, apesar de tudo, essa distância não fosse nada: é que a distância é uma propriedade da extensão e não poderia subsistir sem algo extenso. (DESCARTES, 1997, p. 67)

Descartes concebia que a extensão da matéria era indefinida e isso era suficiente para pensar que o universo não podia ser percebido como infinito. Considerando que apenas sua percepção era única medida utilizada para afirmar ou negar suas ideias sobre o universo, ele só podia pensar que, por isso, “o mundo era indeterminado ou indefinido, por que não lhe reconhecia quaisquer limites. Porém, não se atrevia a chamá-lo infinito” (KOYRÉ, 2006, p. 106). No foco desses argumentos, estava a concepção de Descartes de que o ser humano não precisava entrar em conflito sobre a ideia de infinito, nem por razões matemáticas nem físicas, necessitando, apenas, sustentar como indefinido tudo aquilo para o qual não encontramos limites (PEDUZZI, 2018b).

Com base nessa breve e singela explanação da filosofia mecanicista cartesiana, torna-se possível acessar brevemente a primeira explicação mecânica para a causa da gravidade, para a qual o filósofo francês construiu um modelo teórico para a formação do universo. Para tanto, ele considerou que além do movimento de translação do planeta em sua órbita, existiam processos de colisões entre a matéria do céu e o planeta que provocavam o giro desse corpo celeste. Com isso, a causa desse giro era devido aos desvios que um corpo maior impunha a corpúsculos possuidores de grande tendência centrífuga, quando se chocam contra o corpo maior. Nesse sentido, um planeta (T) descrevia sua órbita (ACZN) em torno do Sol (S), devido à impulsão que recebia da matéria do céu que o permeia (Figura 70). Esta figura ilustra, respectivamente, os movimentos de translação e de rotação da Terra (T) em torno do Sol e da Lua em torno da Terra.

Figura 70 – O movimento dos planetas no modelo cosmológico de Descartes.



Fonte: Descartes (1991, p. 134). Extraído de Peduzzi (2018b, p. 47).

Na Figura 70, ao incidir sobre (T), em (A), a matéria do céu era desviada para (B), devido à inclinação de corpúsculo de grande velocidade ser a do movimento retilíneo. Por conta desse movimento rotacional, o planeta girava seguindo o movimento desses corpúsculos; reciprocamente, com o giro do planeta, a matéria do céu seguia seu curso de (B) para (C) e para (D), formando um céu particular em torno do planeta.

Considerando esse exemplo, para um corpo celeste menor do que a Terra, a Lua, mas com uma velocidade maior do que ela, a órbita desse corpo se dirigia para a região superior do pequeno céu (ABCD), uma vez que possuía mais “força” que a matéria, que dava manutenção à sua rotação, segundo o círculo (ACZN).

Nesse pequeno céu, a Lua, por exemplo, seguia seu curso em torno do corpo maior (T). Por outro lado, um objeto nas mediações da Terra era imediatamente impulsionado por essa matéria para um lugar compatível com a sua menor tendência centrífuga – quanto maior e mais sólido o corpo, com mais “força” e velocidade ele iria se mover (PEDUZZI, 2018b).

Descartes acreditava ter uma explicação convincente para problema empírico fomentado pelo sistema copernicano – *por que os corpos não são ejetados para fora da Terra devido ao seu movimento de rotação?* Do mesmo modo, para o problema da queda dos corpos – *por que os corpos caem em direção ao centro da Terra?*

Frente a esses dois problemas, Descartes afirmava que isso acontecia porque a matéria do turbilhão terrestre empurrava os corpos para o centro do vórtex, isto é, para o centro da Terra. Para esse filósofo, não existindo o vazio em parte alguma do universo, os corpúsculos que se encontravam mais próximos do centro de um vórtex, não conseguiam dele se distanciar, pois eram impedidos por outros semelhantes, que já ocupavam posições mais afastadas.

Tomando o exemplo do movimento de uma pedra, ele considerava que qualquer mudança de posição envolvia uma troca de lugar entre a mesma e uma quantidade de ar equivalente ao espaço que a pedra ocupava. Em razão disso, ele acreditava também que:

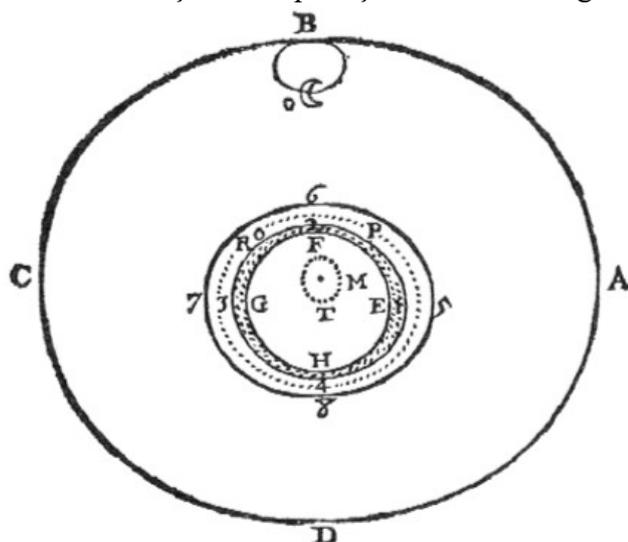
É evidente que essa pedra, que contém muito mais matéria da Terra, e, por conseguinte, muito menos do céu, que uma quantidade de ar de igual extensão [...] não deve ter a força para ascender por cima dele. Ao contrário, é o ar que deve ter a força para fazê-la descer, pois é leve em comparação com ela, mas pesado quando comparado com a matéria totalmente pura do céu. É assim podeis ver que cada parte dos corpos terrestres é pressionada em direção a T, não indistintamente por toda a matéria ao seu redor, mas apenas por uma quantidade dessa matéria justamente igual ao seu tamanho que, ao estar por debaixo, pode ocupar seu lugar quando a pedra desce. (KOYRÉ, 1982, p. 164-165 *apud* PEDUZZI, 2018b, p. 48)

Nessa direção, Descartes apresentou sua explicação mecânica da gravidade, preservando a matéria das qualidades ocultas associada, por exemplo, a *ação a distância* entre os corpos, sem a presença de um meio. Acerca disso, ele afirmou que:

Vê-se, portanto, o quanto é contrário ao bom senso admitir o vazio: não só o vazio é, em si, impossível; não só a aceitação da sua existência nos forçaria a admitir a noção obscura e mágica de uma ação à distância (atração), mas também, de uma maneira mais concreta, a suposição do vazio não facilitaria de modo algum a queda dos graves: pelo contrário, torná-la-ia impossível. (MARTINS, 1986, p. 157)

Para Descartes, se a matéria sutil que girava à volta da Terra não girasse, nenhum corpo seria pesado. Com sua ideia mecanicista da gravidade, ele procurou explicar por que os graves apresentam um movimento retilíneo, quando abandonados de certa altura em relação à superfície da Terra (Figura 71).

Figura 71 – Ilustração da explicação mecânica da gravidade.



Fonte: Descartes (1991, p. 139). Extraído de Peduzzi (2018b, p. 49).

Na Figura 71, a Terra é representada pelo círculo (EFGH), a água pelos números (1234) e o ar pelos números (5678); a matéria do céu preenche todos os espaços entre os círculos (ABCD) e os números (5678), assim como os pequenos interstícios que existem por debaixo entre as partes de ar, de água e de Terra. Por sua vez, o ar e a água em volta da Terra giravam com ela, formando uma massa corpórea; logo, não se devia pensar que, ao se deixar cair a pedra (R), ela se desviava (para 6 - ocidente ou para 7 – oriente). Portanto, por causa disso, o movimento de uma pedra quando cai próximo à superfície da Terra se torna efetivamente retilíneo (DESCARTES, 1991).

De acordo com Descartes,

Todas as partes terrestres compreendidas no círculo 5678, ao serem pressionadas para T pela matéria do céu, e, além disso, por terem figuras muito irregulares e diversas, devem unir-se e engancharem-se umas nas outras, e assim formar uma massa que é arrastada em sua totalidade pelo movimento do céu ABCD; de forma que, ao girarem, aquelas partes que estão, por exemplo, em torno de 6, permanecem sempre em frente as que estão em torno de 2 e de F, sem se afastarem consideravelmente dali, a não ser pelos ventos ou por outras causas particulares que as obriguem a isso. (DESCARTES, 1991, p. 139 citado por PEDUZZI, 2018b, p. 49)

Por essa compreensão, para Descartes (1991), na estrutura da pedra existia mais substância terra do que em uma quantidade de ar de mesma extensão. Por isso a pedra era muito mais pressionada para baixo, pela matéria do céu, do que o ar nela existente. Contudo, tal matéria não exercia “força” em maior ou menor quantidade, do que a estritamente necessária para empurrá-la para baixo, implicando em seu movimento retilíneo.

Por sua vez, essa era uma explicação compatível com a ideia de *sistema físico* utilizada por Bruno e Galileu, no qual os corpos não ficam para trás em uma Terra em movimento. Com efeito, esse foi um forte golpe que liquidou, de uma vez por todas, os argumentos aristotélicos discutidos nas contribuições de Galileu, em particular, o exemplo, da pedra que cai do mastro de um navio se movimentando em águas tranquilas. Nessa direção, na próxima seção, são abordados os problemas empíricos e conceituais enfrentados por Newton, antes da concepção de sua teoria da gravitação universal.

### 13.5 OS PROBLEMAS EMPÍRICOS E CONCEITUAIS ENFRENTADOS POR NEWTON

Antes de iniciar o assunto que encabeça essa seção, é importante destacar alguns aspectos sobre Sir Isaac Newton (1642 - 1727), nascido aproximadamente entre o natal de 1642 e março de 1643, anos estes ligados à morte de Galileu.

Pelos seus feitos científicos, Newton tem desfrutado, até hoje, de uma grande influência e autoridade na comunidade científica, que somente se compara ao prestígio alcançado por Aristóteles, dois milênios antes, cuja visão de mundo predominou até o século XVII. Isso porque, até o advento da mecânica quântica e das teorias da relatividade de Einstein, nossa visão de mundo, de todo modo, passou a ser a visão de mundo newtoniana.

Vale destacar que, pouco se sabe sobre o íntimo do espírito científico de Newton e sobre o método pelo qual ele realizou sua monumental síntese. Além disso, existe uma vasta

literatura sobre esse gigante da ciência, com as mais diversas interpretações de sua vida e trabalho. Dentre os especialistas com vasta produção científica sobre esse assunto, destacam-se os historiadores norte-americanos Richard Westfall (1924 - 1996) e Bernard Cohen (1914 - 2003), responsáveis por elucidar muitos dos pormenores que envolvem o enigmático Isaac Newton.

Ao completar trinta anos, depois da morte de Kepler e vinte anos após a morte de Galileu, data de 1660, Newton se deparou com muitas incompatibilidades (problema conceituais internos) presentes na nova estrutura teórica que emergia, principalmente, dos trabalhos de Galileu, Kepler, Gilbert e Descartes.

O primeiro desses problemas conceituais internos foi a incompatibilidade existente entre os aportes de Galileu e de Kepler, que residia, respectivamente, entre as leis do movimento dos corpos celestes e as leis do movimento dos corpos terrestres. Os elementos estruturais responsáveis por essa incompatibilidade eram os seguintes: nas leis de movimento dos corpos celeste, as forças (magnéticas) que impeliam os planetas não resistiam ao escrutínio da análise teórica; da mesma forma, as leis de movimento dos corpos terrestres (a lei da queda dos corpos) não possuíam relação aparente com o movimento dos corpos celestes. Por analogia, podemos dizer que esse problema de incompatibilidade é semelhante ao que ocorre hoje, com a falta de integração entre a mecânica quântica e a relatividade geral de Einstein (KOESTLER, 1989).

Especificamente, na física celeste de Kepler e de Galileu, respectivamente tinham-se as seguintes incompatibilidades: (i) órbitas dos planetas elipses *versus* órbitas circulares; (ii) movimentos dos planetas orientados por raios e causados por uma força (magnética) oriunda do Sol *versus* planetas não absolutamente movidos, devido ao movimento circular perpetuar-se a si próprio; (iii) uma inércia dos planetas que os faziam em seus movimentos tenderem a ficar para trás *versus* a consideração de que o próprio princípio da inércia fazia os planetas persistir em girar em círculos.

Adjacente a isso, as ideias da filosofia mecanicista de René Descartes acentuavam, ainda mais, as incompatibilidades entre a física celeste e a física terrestre do século XVII. Por exemplo, para Descartes, a inércia não fazia os corpos persistirem em movimento circular, como em Galileu, mas em movimento linear, uma ideia assombrosa, pois os corpos celestes podiam se mover em círculos ou elipses, porém, indubitavelmente, não em linha reta (KOYRÉ, 2002).

Nesse sentido, o filósofo francês admitia que os planetas eram movidos por círculos impulsionados por vórtices num éter que a tudo penetrava, não deixando espaço para a existência do vazio.

Com efeito, mais dois elementos materializavam o desacordo entre a física terrestre e a física celeste: a natureza da força que faz os planetas girar e os mantém nas órbitas; e a questão de saber o que faria, na vastidão do espaço, um corpo deixado sozinho, sem nenhum agente externo a influenciá-lo. Esses dois elementos expressam a essência dos principais problemas empíricos e problemas conceituais enfrentados por Newton: *Por que os corpos caem em direção ao centro da Terra? Que teoria física de movimento pode substituir a física de Aristóteles? Qual a causa do movimento dos planetas?*

Para solucionar tais problemas, Newton concebeu claramente o significado do conceito de *peso* dos corpos; compreendeu a importância do misterioso fenômeno do magnetismo de Gilbert, como promotor intuitivo de sua teoria da gravitação universal; e discriminou claramente o conceito de força, da miscelânea dos vários conceitos que ele mesmo estabeleceu em uma de suas obras, *De motu*, antes de escrever sua célebre obra *Principia*.

Essas foram tarefas indispensáveis que Newton precisou concluir com êxito, para resolver os problemas conceituais, isto é, as dificuldades internas e externas (visão de mundo) da estrutura conceitual das teorias que buscavam explicar: o comportamento dos corpos celestes no espaço; a ausência de qualquer meio de interferência; contradições conceituais nas explicações acerca das forças que fazem os planetas girarem; versões distintas (linear *versus* circular) sobre o *princípio da inércia*; conflitos da visão de mundo sobre o centro do universo e existência de tal centro. E por fim, permeando a tudo isso, era preciso também clarificar a questão de saber se o Deus das Escrituras se ajustava no quadro conceitual compatível com a nova visão de mundo latente no pensamento científico do século XVII.

Por conseguinte, para Newton clarificar o significado do conceito de *peso* dos corpos celestes e terrestres, as observações telescópicas de Galileu foram fundamentais. Especialmente, a constatação de vales e montanhas na Lua, semelhantes aos que se observam na Terra. As observações das manchas solares e as luas de Júpiter, como forma de conceber uma ideia convicta de que tais corpos celestes tinham tanto a mesma natureza dos corpos terrestres, quanto podiam estar submetidos às mesmas leis da natureza.

Nesse sentido, o significado do conceito físico de *peso* se constituiu no mais importante atributo (atração) de que compartilham todos os corpos da Terra. Por sua vez, a

compreensão newtoniana desse significado refletiu-se em seu primeiro passo, para pensar no importante problema empírico da queda dos corpos – *Por que os corpos caem em direção ao centro da Terra?* – novamente, na *física aristotélica* todos os corpos terrestres possuíam uma inclinação natural que os impulsionam a se moverem em direção ao centro do mundo, coincidente com o centro da Terra. Já os corpos celestes obedeciam a leis diferentes, como uma marca distinta entre a *física do céu* e a *física da terra*. Diante dessas convicções, a nova filosofia da natureza nascente, a *física clássica newtoniana*, negou o dualismo dessa explicação aristotélica, indo contra as percepções intuitivas do senso comum.

No entanto, além da necessidade de estabelecer em relação ao significado de *peso* dos corpos celestes, se os corpos celestes tinham a mesma natureza que os corpos terrestres, a física newtoniana precisou enfrentar outros problemas conceituais importantes, a saber: O que significa o peso de um planeta? Contra o que se comprime? Ou para onde tende a cair? Se o motivo pelo qual uma pedra cai em direção ao centro da Terra não é a posição desta no centro do universo, então por que ela cai? (KOESTLER, 1989).

Relembrando as três explicações distintas para o significado de peso dos corpos, a primeira delas, fornecida por Copérnico, tinha-se que: os objetos do Sol e da Lua tinham peso como corpos na Terra e significava a tendência de toda a matéria a se dispor em formato esférico em torno de um centro.

Na segunda explicação, dada por Galileu, o *peso* significava uma qualidade absoluta de toda matéria terrestre, o que não exigia uma causa, nem se distinguia da sua inércia. Ao passo que nos corpos celestes, esse peso era associado à persistência dos planetas se moverem ao longo de uma trajetória circular. Na terceira, oferecida por Kepler, pela primeira vez, o *peso* significa uma *atração mútua* entre dois corpos. Kepler postulou que dois corpos no espaço não expostos a outra influência se aproximariam um do outro, encostando-se a um ponto intermediário, de forma que as distâncias percorridas por cada corpo estariam na razão inversa das suas massas.

Com essa concepção Kepler chegou até a atribuir corretamente o fenômeno das marés à atração do Sol e da Lua sobre a Terra. Mas, como explicitado anteriormente, ele não acreditava nessas possibilidades teóricas e se afastou da fantástica noção de uma *Anima Mundi* gravitacional (KOESTLER, 1989; KOYRÉ, 2002).

Da mesma forma, não se pode conferir a Newton o crédito da concepção da *interação à distância*, alicerce fundamental da teoria da gravitação universal, uma vez que entre os historiadores da ciência, o pensamento consensual é o de que:

[...] não se saber quando nem em que circunstâncias exatas a pedra angular da teoria foi instituída. Sem prova concreta, para alguns teria ocorrido, em 1645, com um personagem chamado Boulleau, derivando-se, por analogia, a difusão da luz que, como Kepler sabia, também diminuía em intensidade com o quadrado da distância. (KOESTLER, 1989, p. 351)

Em conformidade, sabe-se também que “a doutrina da ação a distância se deve ao produtor do prefácio do *Principia* de Newton, por nome Cotes, que argumentando contra a teoria dos vórtices de Descartes, deixou entender essa ideia” (CAJORI, 1990, p. 276). Além disso, é de conhecimento da comunidade que, também:

James Clark Maxwell, afirmara que, estudando as questões em ótica de Newton, observa apenas que ele tentou explicar a gravitação através de um meio, e que a razão pela qual não publicou essas investigações, provinha do fato de achar não ser capaz de levar em conta satisfatoriamente tal meio, a partir do experimento e da observação, e seu modo de operação para produzir os principais fenômenos da Natureza. (CAJORI, 1990, p. 277)

Esses relatos refletem bastante um dos sentidos possíveis da famosa frase de Newton *Hypotheses non fingo* – não invento hipóteses – utilizada por ele na ausência de uma explicação satisfatória. Por fim, em outro relato, sabe-se que Newton teria dito que descobriu a fórmula da *interação à distância* ( $1/r^2$ ), calculando a força exigida para equilibrar a força centrífuga da lua, mas sem ser de todo modo convincente (KOYRÉ, 2002).

No que confere o misterioso fenômeno do magnetismo, a teoria magnética de Gilbert concebia a Terra como um gigantesco ímã; e essa comparação induziu Kepler a identificar a ação do Sol sobre os planetas com a força *magnética*. Como implicação, a confusão entre magnetismo e a gravidade surgiu como algo natural, uma vez que o ímã constituía a única demonstração concreta e tangível da misteriosa tendência da matéria a se unir a ela mesma, sob a influência de uma “força” agindo sem contato e sem intermediários.

Nesse contexto, o ímã de Gilbert tornou-se o arquétipo da *ação à distância* e preparou o caminho de Newton para sua teoria da gravitação universal. Isso significa que sem o estudo de Gilbert:

O homem teria estado muito menos preparado para trocar a teoria simples e tradicional de que o “peso” significava a tendência natural dos corpos a caírem em direção ao centro, pela aventurosa noção de que significava a atração dos corpos um pelo outro através do espaço vazio. (KOESTLER, 1989, p. 349)

Observa-se que, mesmo assim, o *magnetismo*, a *gravidade* e a *ação à distância* nada perderam do embaraçador mistério desde Gilbert. Por exemplo, Galilei pensava que Gilbert tinha proporcionado a explicação de o eixo da Terra apontar sempre para a mesma direção no espaço, por ser esse eixo, simplesmente, uma espécie de agulha magnética. Robert Boyle (1627-1691), personagem da química moderna, acreditava que a gravidade era “vapores magnéticos que se desprendiam da Terra” (KOESTLER, 1989, p. 352).

Para deixar o horizonte científico encontrado por Newton ainda mais nebuloso, Descartes repudiava as hipóteses do magnetismo, da gravidade e de qualquer força de interação à distância. Com isso, suas explicações do magnetismo e da gravidade se baseavam na existência de vórtices no éter, e não na existência de espaço vazio, no qual se tornava possível o efeito da interação à distância.

Até mesmo o próprio Newton achava paradoxal e inacreditável o fato da força gravitacional, que retém a Terra na sua órbita, ser transmitida do Sol através de 93 milhões de milhas – uma milha corresponde a 1,61 quilômetros – de espaço, sem qualquer meio material que transportasse essa força. Para Newton, era inconcebível que:

[...] a matéria bruta inanimada pudesse, sem mediação de qualquer outra coisa que não é material, influenciar e afetar outra matéria sem contato mútuo [...] E essa é [afirmara Newton] uma razão pela qual desejeis que não me atribuíssem a gravidade inata. (KOESTLER, 1989, p. 352)

Reforçando sua incredulidade sobre o papel da interação à distância na teoria da gravitação, Newton afirmou, no *Principia*, o seguinte:

Que um corpo possa atuar sobre o outro a uma distância através do vácuo, sem a mediação de qualquer outra coisa, por e através da qual sua ação e força possam ser transportadas de um para outro, é para mim um absurdo tão grande que acredito que nenhum homem dotado de uma faculdade competente em assuntos filosóficos possa nele recair. (NEWTON, 1990, v.1, p. 276)

Em face disso, Newton admitia que a gravidade fosse causada por um agente em constante atividade de acordo com determinadas leis, porém deixou para seus leitores o cuidado de saber se tal agente era material ou imaterial.

Diante da dificuldade de conceber um universo cheio de gravidade, no qual as estrelas fixas podiam se precipitar para um ponto de encontro, “numa espécie de super explosão cósmica final”, Newton se viu obrigado a atribuir a Deus a função de combater a

gravidade e manter as estrelas fixas em seus devidos lugares. Um de seus argumentos expressa isso:

E mesmo que a matéria estivesse dividida, a princípio, em vários sistemas, e cada sistema fosse, por um poder divino, constituído como nosso, os sistemas exteriores desceram para o ponto médio, de modo que essa estrutura de coisas não poderia substituir sempre sem uma força divina para conservá-la. (KOESTLER, 1989, p. 352)

Nesse argumento, fica evidente que mesmo tendo trilhado por caminhos metodológicos desconhecidos, Newton foi capaz de preencher o espaço do universo com forças de atração oriundas de todas as partículas de matéria, que agiam simultaneamente sobre todas elas. Ele conseguiu unificar a *física terrestre* de Galileu e a *física celeste* de Kepler, como uma tarefa fundamental para a constituição da nova física, cuja teoria da gravitação universal é um de seus constructos teóricos basilares.

Nessa direção, no próximo e último texto serão discutidos tanto os passos intelectuais newtonianos, em direção à concepção da teoria da gravitação universal quanto a importância dessa teoria para o estabelecimento de uma nova visão de mundo, que estabelece os pilares da tradição de pesquisa europeia do século XVII, sem qualquer tipo de vínculo metodológico ou ontológico com a tradição de pesquisa grega antiga, especialmente, no contexto da histórica conceitual da astronomia, da cosmologia e da física.

## 14 A TEORIA DA GRAVITAÇÃO NEWTONIANA E A SOLUÇÃO DOS PROBLEMAS NO FOCO DE UMA NOVA TRADIÇÃO DE PESQUISA

No capítulo anterior, inicialmente, foram abordadas as contribuições científicas de Kepler para constituição de uma nova astronomia – a astrofísica. Como copernicano convicto e sob uma forte influência de Tycho Brahe, Kepler mudou radicalmente sua forma de lidar com os problemas da astronomia, isto é, de uma abordagem cinemática descritiva, para uma abordagem metodológica preocupada com a *causa eficiente* do movimento dos planetas e, com isso, pôde ditar novos rumos metodológicos e ontológicos de sua atividade científica. Como resultado, ele pôde realizar diversos feitos científicos, dentre eles, elaborar suas três leis empíricas do movimento planetário, que como será abordado neste capítulo, tornou-se a pedra angular da mecânica celeste newtoniana.

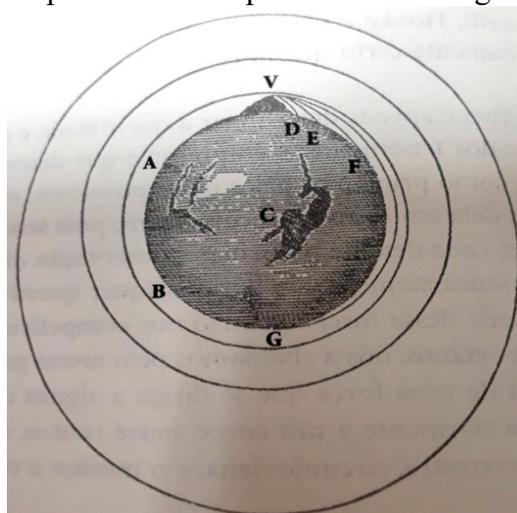
Em conformidade, em seguida, foi feito um adendo histórico à explicação mecânica da gravidade por René Descartes, a qual se encontra no contexto de uma nova cosmologia, marcada por sua filosofia sobre a natureza e sua visão de mundo mecanicista. Por fim, esse penúltimo capítulo da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, foi finalizado com a abordagem contextual dos diversos problemas empíricos e conceituais que Newton precisou enfrentar para poder chegar à sua concepção da teoria da gravitação. Dentre esses problemas, os conceituais internos de incompatibilidades entre as estruturas teóricas das físicas terrestres e celestes de Galilei, Kepler, Gilbert e Descartes, foram os mais agudos para a atividade científica. Frente a esses problemas, tentou-se mostrar o esforço cognitivo de Isaac Newton para dirimir essas incompatibilidades, mediante uma ressignificação ontológica do conceito físico de peso (atração), que fosse capaz de ser operacionalizado em ambos os mundos (terrestre e celeste). É importante destacar, também, que nesse esforço cognitivo, Newton não fazia distinção entre as massas (inercial e gravitacional), o que referenda, atualmente, sua expressão matemática, em módulo, para a força gravitacional [ $F = G M_1 * M_2 / d^2$ ]. Nessa direção, Newton também precisou adotar alguns conceitos de força, dentre as diversas miscelâneas encontradas em sua época – um dos assuntos deste último. Ao resolver essas tarefas, Newton pôde finalmente dar seus passos intelectuais em direção à teoria da gravitação, com a qual solucionou todos os problemas empíricos e problemas conceituais inerentes à astronomia, cosmologia e física praticadas no século XVII. Por essa razão, é possível afirmar que todo o empreendimento científico europeu, de Copérnico até Newton, sob a lente da solução dos problemas, permitiu a constituição de uma nova

astronomia, de uma nova cosmologia e de uma nova física, cujos aportes metodológicos e ontológicos estabeleceram uma nova visão de mundo e uma nova tradição de pesquisa europeia cognitivamente distinta da visão de mundo grega e de sua tradição de pesquisa.

#### 14.1 OS PASSOS INTELECTUAIS NEWTONIANOS RUMO À TG

Admitindo que seguir os passos intelectuais newtonianos em direção à teoria da gravitação (TG) não é, nem de perto, uma tarefa trivial, acredita-se que os indícios de suas pegadas devem ser ilustrados, a partir da ideia central da união da física terrestre de Galileu Galilei e a física celeste de Johannes Kepler (KOESTLER, 1989). Por essa ideia central, o primeiro passo intelectual de Newton foi tomar a Lua como um corpo celeste mediador, identificando a órbita kepleriana da Lua, com a órbita galileana do projétil, os quais caíam constantemente para a Terra, observando que somente a Lua não a atingia, devido ao seu rápido movimento tangencial. A partir dessa ideia engenhosa de Newton, é possível construir mais um vínculo com o aspecto, característica, princípio da natureza da ciência, que preconiza que os “experimentos de pensamento mostram o valor essencial das conjecturas pré-observacionais, dos conhecimentos e das convicções teóricas do sujeito na investigação científica” (PEDUZZI; RAICIK, 2020, p. 27). Por exemplo, em seu *Tratado Sistema do Mundo* – Livro III do Principia, o raciocínio de Newton encontra-se ilustrado na Figura 72, precedida por uma explicação qualitativa de sua experiência de pensamento.

Figura 72 – A órbita kepleriana de um planeta e a órbita galileana de um projétil.



Fonte: Bernard Cohen e Westfall (2002, p. 318).

Na Figura 72 encontra-se a comparação newtoniana entre a órbita kepleriana de um planeta e a órbita galileana de um projétil lançado de uma montanha na Terra. Para Newton:

Se um projétil for disparado por cima de uma montanha, será desviado do caminho reto pela atração da terra. De acordo com a velocidade inicial recebida, seguirá as curvas D, E, F, ou G; e se a velocidade inicial exceder um determinado valor crítico, o projétil descreverá um círculo ou uma elipse “e voltará à montanha de que foi disparado”. E, de acordo com a *Segunda lei de Kepler*, lei das áreas, a sua velocidade, quando voltar à montanha, não será menor do que era, e, conservando a mesma velocidade, descreverá a mesma curva, rapidamente, em virtude da mesma lei [...] e continuará a girar, através dos céus precisamente como os planetas em suas órbitas. (KOESTLER, 1989, p. 353)

Segundo Koestler (1989), a principal implicação do raciocínio de Newton reside na ideia de integração de duas forças: a força da gravidade que atrai os planetas ao Sol e a força centrífuga que lhes afastam. O modo simples de exemplificar essa ideia é fazer girar uma pedra na extremidade de uma corda. A força que mantém a corda tensa é a força centrífuga da pedra; a coesão da corda que mantém a pedra cativa na órbita representa a atração gravitacional.

Em função disso, Newton teve que resolver mais um problema subjacente à sua tarefa de unificação, a saber: *Por que a órbita descrita pelo movimento de um planeta é elíptica e não circular?* E como parte de suas especulações, Newton tinha uma resposta meramente qualitativa a essa pergunta, pela qual afirmou o seguinte:

[...] à medida que o planeta se aproxima do Sol, cresce sua velocidade, e ele se projeta para além do Sol, mas assim fazendo, a mão agarradora da gravidade o obriga a girar, tal qual gira em torno do mastro, a criança que corre e a ele se agarra, de modo que continua na direção oposta. E se a velocidade, na aproximação, tivesse sido precisamente a exigida para evitar que ele caísse no Sol, o planeta continuaria num círculo. Mas sendo um pouco maior, a trajetória de regresso o transportará numa órbita alongada, percorrida numa velocidade reduzida, sob os dentes da atração do Sol, por assim dizer, curvando-se aos poucos para dentro, até que, após transpor o afélio, a curva mais uma vez se aproxima do Sol, e o ciclo inteiro recomeça. (KOESTLER, 1989, p. 354)

Contudo, sabe-se que essa explicação qualitativa de Newton não era suficiente, pois aos olhos da comunidade científica, construir hipóteses sem submetê-las ao escrutínio da matematização e comparação com os dados empíricos, além de ultrapassado, não era sensato para a construção do conhecimento, no contexto da nova tradição de pesquisa europeia. Em outras palavras, não era sensato postular que a Lua “cai” constantemente para a Terra, como um projétil, ou como a “queda da maçã no jardim de Woolsthorpe”.

Por isso, Newton não podia apenas postular que a atração da Terra chegava até a Lua, como a atração do Sol até os demais planetas, nem que o espaço interestelar estava realmente “carregado” de gravidade. Pelo contrário, ele tinha de substantivar suas suposições arrojadas com rigorosas provas matemáticas. Mas, para tanto, precisava resolver mais problemas: *calcular a intensidade da aceleração centrípeta da Lua em volta da Terra e a intensidade da aceleração da gravidade que a Terra exerce sobre a Lua* (KOESTLER, 1989).

Para solucionar esses dois novos problemas, Newton teve primeiro que saber em que razão a gravidade da Terra diminuía com a distância. A maçã cai da árvore com uma aceleração conhecida de aproximadamente de 10 jardas por segundo (KOESTLER, 1989) – 1 jarda é aproximadamente (0,91) metros. Mas *qual seria o valor da aceleração da Lua em comparação com a Terra?* – a resposta era descobrir a lei da gravitação universal. Significando também uma mudança de abordagem cinemática para dinâmica, nas preocupações iniciais de Newton com a solução do problema.

Não obstante, Newton precisava conhecer o valor exato da distância Terra-Lua e decidir se era certo tratar dois enormes globos, como a Terra e a Lua, de maneira abstrata, como se toda a massa deles se concentrasse em um único ponto central. Além disso, para minimizar as dificuldades matemáticas, ele teve de tratar a órbita da Lua como um círculo, e não uma elipse (WHITESIDE, 1970).

Em seus primeiros resultados, em face de todas as dificuldades matemáticas, os cálculos de Newton só concordavam de maneira “bastante aproximada” com os fatos empíricos, implicando sua completa. Devido a isso, Newton abandonou todo esse trabalho por quase vinte anos insatisfação (KOESTLER, 1989).

Dentre algumas explicações para esse longo intervalo de abstinência dos estudos dos problemas da mecânica celeste e a publicação do *Principia*, encontra-se o argumento de que Newton não conhecia, ainda, a segunda lei de Kepler, ou, pelo menos, não tinha uma compreensão apropriada do seu caráter geral (WHITESIDE, 1970; TEIXEIRA; PEDUZZI; FREIRE JR, 2010).

Atrelado a isso, ele se deparou também com dificuldades existentes sobre as imprecisões no valor da distância Terra-Lua e a falta de uma estrutura dinâmica exata para realizar os cálculos necessários das órbitas. Ao que tudo indica, “Newton parece não ter plenamente e precisamente formulado sua dinâmica até a década de 1680” (CUSHING, 1982, p. 620).

Nesse intervalo de tempo, acontecimentos como: as expedições científicas de Jean Picard a Caiena forneceram informações melhoradas do diâmetro da Terra e da distância Terra-Lua (KOESTLER, 1989). Nesse contexto, Newton conseguiu desenvolver, de forma independente de Leibniz, o cálculo diferencial, instrumento indispensável para atacar os problemas fundamentais de sua mecânica celeste.

Destaca-se que, esse fato de ter abandonado seus estudos, por quase vinte anos, é importante para desmistificar duas ideias equivocadas que são propagadas, respectivamente, pela literatura e por livros didáticos de física. A primeira ideia é a de que Newton teria deduzido a teoria da gravitação universal, por um *insight* de gênio, presenciando a queda de uma maçã no jardim da residência rural de sua família, em Woolsthorpe. Feito alcançado nos idos de seus vinte e três ou vinte quatro anos de idade, anos 1665-1666 – período que ficou conhecido como *anni mirabiles* –, quando se refugiava da assolação da peste bubônica, que dizimou grande parte da população de Londres. Apesar disso, esse período foi descrito por Newton como o mais profícuo de sua carreira científica, pois concebeu a ideia de que a gravidade da Terra se estendia até a Lua (WESTFALL, 1995).

Especialistas em seus estudos, como os historiadores Bernard Cohen e Richard Westfall, afirmam que a nota biográfica em que se encontra essa afirmação, representa bem mais um argumento de Newton por estar envolvido em disputas de patentes e de autoria, por exemplo, da lei de força ( $1/R^2$ ), do que o que se propaga erradamente sobre esse assunto na literatura.

Mesmo se Newton tivesse concebido, na década de 1660, que a gravidade da Terra se estendia até a Lua, isso não significava que ele compreendia a verdadeira natureza da força gravitacional. Pois sua concepção de gravidade solar, como uma constante, era diferente do que estabeleceu, mais tarde, no *Principia* publicado em 1687 (TEIXEIRA; PEDUZZI; FREIRE JR, 2010).

Nessa obra, Livro I – *O movimento dos corpos* – Definição V, Newton afirmou que a gravidade é um tipo de força centrípeta: “aquela pela qual os corpos são dirigidos ou impelidos, ou tendem de qualquer maneira, para um ponto como centro” (NEWTON, 1990, p. 3). Como exemplos dessa força, acrescenta: “são forças desse tipo: [...], o magnetismo, pelo qual o ferro tende para a magnetita; e aquela força, seja ela qual for, pela qual os planetas são continuamente desviados dos movimentos retílineos” (Idem). Portanto, durante os *anni mirabiles*, Newton não tinha como formular a teoria da gravitação universal. Nesse período, ele ainda era adepto de uma concepção sobre a dinâmica orbital baseada na ideia de equilíbrio

entre tendência centrífuga e gravidade solar, e não o sentido descrito no *Principia* – Livro I. Acerca dessa concepção da dinâmica orbital baseada no equilíbrio entre tendência centrífuga e gravidade solar, sabe-se que:

Essa era uma explicação fundamentada na filosofia mecanicista de Descartes, qual seja, a de que um planeta era mantido em órbita estável em torno do Sol por ser constantemente desviado de sua tendência de sair em linha reta tangente à órbita, isto é, da sua tendência centrífuga. Por sua vez, esse desvio era provocado pela matéria do espaço, imediatamente superior à órbita do planeta, que girava em vórtices e que, por ser dotado de maior tendência centrífuga que o planeta, o retinha em sua trajetória orbital. (TEIXEIRA; PEDUZZI; FREIRE JR, 2010, p. 218-219)

Antes de ver os *anni mirabiles* como um período que institui, falsamente, o mito da genialidade de Newton, associada a uma ideia de *insight*, ou “o mito do homem que, iluminado pelo dom da sabedoria, pôde realizar tamanha produtividade em tão pouco tempo” (TEIXEIRA; PEDUZZI; FREIRE JR, 2010, p. 222), o mais importante é reconhecer os fatores de suas estupendas produções científicas. Por exemplo: dedicação exclusiva aos estudos influenciada pelo seu isolamento social; e a continuidade de seus estudos por independência intelectual (autodidatismo), em relação ao tempo que esteve em Cambridge e seu amadurecimento intelectual. Posto que, nesse período, Newton não tinha nem colegas suficientemente interessados, nem tutores suficientemente conhecedores em assuntos da ciência moderna para servir como seus interlocutores, e as evidências oriundas dos manuscritos que sobreviveram daquela época, apontam para um Newton singularmente autodidata.

De mesmo modo equivocado, propaga-se, em livros didáticos de física básica, que Newton teria formulado a teoria da gravitação universal diretamente das leis de Kepler. Apesar de constarem em edições antigas de livros, frequentemente essa dedução é replicada em livros didáticos recentes (TEIXEIRA; PEDUZZI; FREIRE JR, 2010).

A refutação dessa ideia, como se observou, reside no fato concreto de que até 1679-1680 as leis de Kepler não tinham credibilidade dentro da comunidade científica. Por exemplo, nessa época, a validade da primeira lei de Kepler – *lei das órbitas elípticas* – era questionada por que foi encontrada apenas pelos dados de um único planeta (da órbita de Marte). Além disso, mesmo para um ferrenho defensor da astronomia kepleriana, seu discípulo Jeremiah Horrox (1618 - 1641), que escreveu um tratado de quinhentas páginas, a segunda lei de Kepler não era explicitamente citada. Nesse contexto, apenas a terceira lei – *lei*

*dos períodos* –, no intervalo de 1609 a 1687, possuía uma aceitação consensual (TEIXEIRA; PEDUZZI; FREIRE JR, 2010).

No que diz respeito à sua segunda lei – *lei das áreas* –, nesse período, sabe-se que ela possuía um *problema conceitual interno*, que ficou conhecido como “o problema de Kepler”, a saber:

O uso da lei das áreas para determinar a posição futura de um planeta depende da solução quão próxima de um problema geométrico que carece de solução exata, qual seja, dados os pontos  $P_0$  e  $P_1$  de uma elipse, determinar o ponto  $P_2$ , tal que as áreas dos setores focais associados ( $P_0SP_1$  e  $P_1SP_2$ ) se encontrem em uma razão dada, a saber, segundo a lei das áreas de Kepler, a dos tempos de trânsito de  $P_0$  a  $P_1$  e de  $P_1$  a  $P_2$ . O Sol se encontra no foco S da elipse. (COHEN BERNARD, 1983, p. 250)

De acordo com Bernard Cohen (1983), a solução desse problema foi dada por Christopher Wren (1632 - 1723), em um ensaio publicado em 1659. Mas Newton somente a utilizou no *Principia*, quando tinha consciência da função das leis das áreas na dinâmica orbital dos corpos celestes. Além disso, Cohen assinala a existência de mais um *problema conceitual interno de incompatibilidade lógica entre a terceira lei de Kepler e a teoria da gravitação universal*.

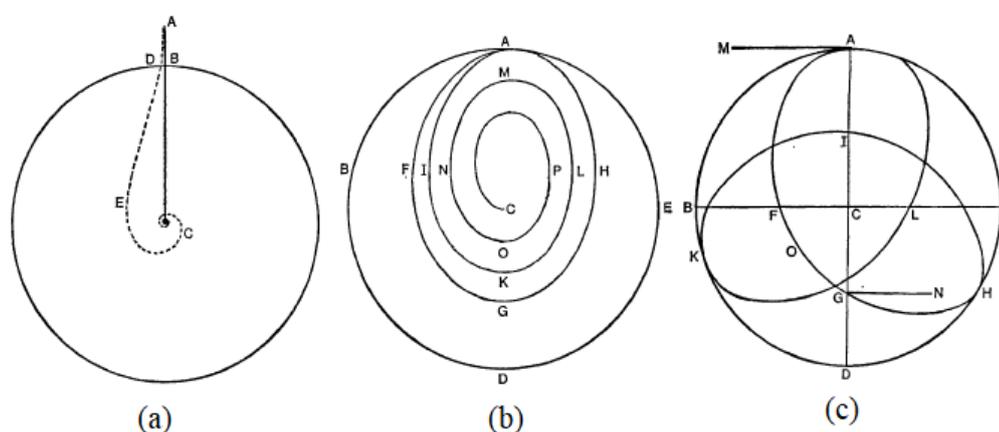
Nesse problema, enquanto a terceira lei de Kepler – em que a razão ( $T^2/R^3$ ) é constante, sendo T o período orbital de um planeta e R sua distância média ao Sol – era válida para um sistema de corpos orbitando em torno de um ponto central – sem considerar a atração mútua entre dois corpos (Sol e planeta), nem as atrações entre muitos corpos (os planetas entre si) –, o sistema planetário newtoniano era um sistema de muitos corpos (os planetas e o Sol), que interagem entre si em torno de um centro de gravidade não fixo, mostrando que, no sistema newtoniano, a terceira lei de Kepler não seria válida (COHEN Bernard, 1983).

A solução desse problema de incompatibilidade lógica somente podia ser encontrada mediante um “método de aproximação”, isto é, considerando as massas dos planetas desprezíveis, quando comparadas com a massa do Sol, bem como desprezando as interações mútuas entre os planetas. Newton somente conseguiu encontrar uma solução, após ter feito, em 1684, a revisão do seu *Tratado De Motu* – retomada mais à frente (COHEN Bernard, 1983).

Antes de discutir sobre essa revisão, é preciso assinalar sobre as importantes correspondências, nos finais de 1679, entre Robert Hooke (1635 - 1703), secretário da Royal Society, e Newton. Nesse período, Hooke apresentou a Newton uma hipótese que o colocaria

no caminho correto para a gravitação universal. Segundo essa hipótese, o movimento orbital de um planeta ocorria conforme a combinação de um movimento tangencial à órbita e uma atração em direção ao Sol, segundo a lei  $(1/R^2)$  – (WESTFALL, 1971). Mas, ao invés de se reportar diretamente a essa hipótese, Newton propôs demonstrar que a Terra girava em torno do seu próprio eixo, supondo que “a trajetória da queda de um corpo solto de uma torre, era ligeiramente deslocada para leste, com um movimento em espiral da superfície para o centro da Terra” (TEIXEIRA; PEDUZZI; FREIRE JR, 2010, p. 225) – como descrito na (Figura 73), a seguir.

Figura 73 – Modelos geométricos das hipóteses de Hooke e de Newton.



Fonte: Westfall (1971, p. 426-428).

Frente a esses modelos geométricos representados pela (Figura 73), é importante destacar que, as discussões entre Hooke e Newton correspondiam às suas perspectivas cinemáticas sobre a trajetória de um corpo em torno de um ponto. E a divergência, por trás disso, aponta para a dinâmica planetária que eles queriam estabelecer (WESTFALL, 1995).

Hooke e Newton criaram uma tensão teórica entre seus dois modelos dinâmicos, na tentativa de solucionar o problema empírico do movimento orbital dos planetas. Mas, para todo caso, o modelo dinâmico de Hooke era melhor do que o de Newton, pois continha a chave mestra da ideia de força central, que foi assimilada por Newton, posteriormente. Mediante sua invenção do cálculo diferencial, ele conseguiu dar o passo fundamental para a teoria da gravitação universal (TEIXEIRA; PEDUZZI; FREIRE JR, 2010). É importante dizer também que, sem a hipótese de Hooke, Newton teria demorado muito mais tempo para conseguir esse feito. E mesmo que ele não tenha reconhecido pessoalmente a contribuição de Hooke, a história da ciência mostra o contrário, pois evidencia uma dívida intelectual não

paga, referente à ideia de força central e da componente inercial (tangente à órbita), presente na lei de força ( $1/R^2$ ), que Hooke tanto reivindicou.

A partir dessa relevante contribuição intelectual de Hooke e de outros importantes personagens da ciência para com as ideias de Newton, é oportuno criar mais um vínculo epistemológico com o aspecto, característica, princípio da natureza da ciência relativo à ideia de que “a ciência (o empreendimento científico) é uma construção coletiva; o esquecimento ou mesmo o anonimato de muitos de seus personagens é injustificável” (PEDUZZI; RAICIK, 2020, p. 36). Nessa perspectiva, a mecânica celeste de Hooke era muito mais evidente sobre a solução do problema empírico, pois incorporava o conceito de inércia, pois ele considerava o movimento orbital como uma elipse e a variação da gravidade com o inverso do quadrado da distância.

Quando as correspondências entre esses dois ilustres personagens da ciência encerraram-se, em detrimento de considerar a gravidade constante, Newton adotou a hipótese de Hooke admitindo que uma força externa fosse o agente de mudança na direção do movimento do planeta (WESTFALL, 1971). Newton aplicou no problema empírico do movimento orbital o seu próprio conceito de força externa (força de impulso), concebida, inicialmente, para resolver problemas de colisões entre corpos.

Nesse caminho, Newton compreendia essa força como atuando discretamente sobre o corpo, alterando a cada ponto a direção do movimento orbital. A “força total” (referente à mudança total do movimento) se constituía da soma das forças impulsivas discretamente durante o mesmo intervalo de tempo (TEIXEIRA; PEDUZZI; FREIRE JR, 2010). Para a materialização dessa tarefa,

Em um artigo não publicado de 1679, Newton demonstrou matematicamente a conjectura de Hooke de que na elipse, obedecendo-se à lei das áreas, a força é do tipo  $1/R^2$ . Ele incluiu nesse artigo a ‘Hipótese I’, que é uma replicação do princípio de inércia extraído de Hooke. (TEIXEIRA; PEDUZZI; FREIRE JR, 2010, p. 227)

Para Bernard Cohen (1983, p. 272), foi mediante as correspondências com Hooke que Newton passou a compreender o significado físico das leis de Kepler, transformando-as “de simples regras cinemáticas ou descritivas, para princípios dinâmicos ou causais”. Não obstante, existem outras interpretações que tornam esse assunto ainda mais emblemático.

Nessa direção, vale situar a famosa visita a Newton de seu amigo Edmond Halley (1656 - 1742), em agosto de 1684, como mais um acontecimento importante após o período de correspondências com Hooke. Para Richard Westfall (1995), foi isso que impulsionou os

passos intelectuais newtonianos em direção à teoria da gravitação universal, uma vez que, no mesmo ano dessa visita, Newton enviou a Halley uma primeira versão do seu tratado *De motu*, marcando seu retorno aos estudos sobre a mecânica celeste.

Nesse período, Teixeira, Peduzzi e Freire Jr (2010) afirmam que o pensamento científico de Newton encontrava-se no mesmo estágio de desenvolvimento observado em 1660, nos seus manuscritos *De Gravitatione* e *West Book*. Por exemplo, suas ideias conceituais sobre a dinâmica, apresentados nessa primeira versão do *De motu*, estavam repletas de inconsistências internas, isto é, concepções que o impediam de sustentar as demonstrações matemáticas necessárias na solução dos problemas da mecânica celeste (WESTFALL, 1995).

Somente com as próximas versões, três no total, sendo que a terceira passou por duas revisões, ao longo dos anos 1685-1686, é que Newton conseguiu evoluir seu pensamento científico, esboçando os aportes teóricos fundamentais da sua obra *Principia* (WESTFALL, 1995). Ele empregou, pela primeira vez, o termo “força centrípeta”, que é oposta à ideia de “força centrífuga” cunhada por Huygens. Essa atitude simboliza seu primeiro passo intelectual para compreender o problema empírico do movimento orbital dos corpos celestes.

De acordo com Westfall (1995, p. 164), “Nenhuma palavra isolada caracterizou os *Principia*, que foram, mais do que qualquer outra coisa, uma investigação das forças centrípetas em sua determinação do movimento orbital”. Com efeito, o uso do termo “força centrípeta” abriu as “portas para a dinâmica moderna, pois mostrou que o movimento orbital tem a mesma natureza de um movimento retilíneo acelerado – são cinematicamente diferentes, mas dinamicamente equivalentes” (TEIXEIRA; PEDUZZI; FREIRE JR, 2010, p. 229). Isso significa dizer também que, “dado o conceito de inércia retilínea, o movimento circular é possível apenas quando uma força desvia continuamente um corpo de sua trajetória retilínea” (Idem).

Nesse processo de revisão, Newton desenvolveu uma ideia melhor do conceito de *força inerente*, isto é, de um tipo de força mantenedora do movimento, para um conceito de força de resistência à mudança de estado do corpo, mais próximo do conceito de inércia, bem como definiu seis tipos de forças, a saber:

- (i) força inerente – a resistência de um corpo à mudança do seu estado de movimento ou de repouso; (ii) força exercida – um suplemento desse novo conceito de força inerente; e representa a forma manifesta dessa última, quando o corpo sofre uma força impressa devido a outro corpo. Proporcional a essa força impressa, é a força exercida para reagir a esta. Trata-se de um passo gradual para a conhecida

terceira lei de Newton; (iii) força de movimento – uma tentativa de Newton de salvar a ideia antiga de força inerente, ou seja, uma força interna que faz o corpo perseverar no seu estado; (iv) força impressa – um termo geral para qualquer força externa que atue sobre um corpo para mudar seu estado; (v) força centrípeta – um tipo de força impressa atuando em um corpo no caso do movimento circular e voltada para o centro da rotação; e (vi) força de resistência – uma força impressa exercida sobre um corpo por um meio resistente. (TEIXEIRA; PEDUZZI; FREIRE JR, 2010, p. 233)

Após suas revisões, Newton cancelou quatro delas e ficou apenas com duas ideias: a *força inerente* de resistência à mudança de estado de um corpo, que é proporcional à sua massa e à própria mudança de estado; e a *força impressa*, que age sobre um corpo devido a outro, para mudar seu estado.

A intenção de Newton, por trás disso, foi criar uma distinção entre força interna e externa, pela qual sua terceira lei de ação-reação estabeleceria um vínculo entre elas. Portanto, devido a essas revisões na terceira versão do *De motu*, é possível afirmar que isso pode ter representado um passo intelectual muito significativo para que ele escrevesse sua obra *Principia* e chegasse diretamente à teoria da gravitação universal (WESTFALL, 1995; TEIXEIRA; PEDUZZI; FREIRE JR, 2010)

Em outra interpretação envolvendo esse momento, observa-se que compreender as leis de Newton entre o período das correspondências com Hooke, em 1679, e a última versão do *De motu*, em 1686, é preciso ter em mente duas coisas. A primeira diz respeito aos conceitos de força: *força externa* – impressa a um corpo, devido a outro, causando uma mudança de estado; *força interna* – a que oferece resistência à mudança de estado provocada por uma força externa; e *força continua* – caso limite da sucessão de forças de impacto quando o intervalo de tempo entre estas forças tende a zero. E a segunda, deve-se observar o “estilo newtoniano” de tratar as forças “como se fosse reais”, mediante simplificação do *sistema físico* para formas matematicamente tratáveis – como assinalado em uma de suas tarefas.

Quando Newton não conseguiu provar a causa da força gravitacional, ele apelou para a força dos resultados matemáticos. Por isso, Newton fincou uma sequência de passos intelectuais para chegar à teoria da gravitação universal que está presente tanto no *De motu* quanto no *Principia* (WESTFALL, 1995; TEIXEIRA; PEDUZZI; FREIRE JR, 2010). Nesse contexto, Westfall (1995) afirma que:

O ponto crucial da dinâmica de Newton estava na relação entre a força intrínseca e a força impressa, ou o que mais tarde (em seu esforço de esclarecê-las), ele chamou de

“força intrínseca, inata e essencial de um corpo” e a “força induzida para empurrar ou impressa sobre um corpo”. O desenvolvimento ulterior de sua dinâmica articulou-se em torno desses dois conceitos. (WESTFALL, 1995, p. 165)

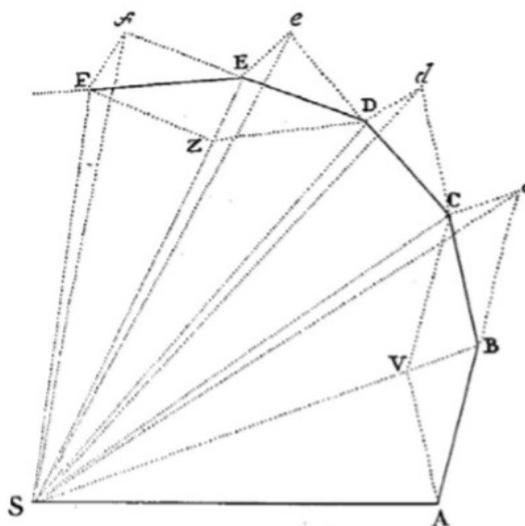
Em conformidade, na próxima seção, esses passos intelectuais newtonianos em direção à teoria da gravitação universal serão pormenorizados a partir de sua célebre obra *Principia*.

#### 14.2 OS PASSOS INTELECTUAIS NEWTONIANOS NO LIVRO I DO PRINCIPIA

Os passos intelectuais newtonianos, no *Principia* Livro I, estão marcados, especificamente, na seção II – *A determinação de forças centrípetas*; e na seção III – *O movimento de corpos em seções cônicas excêntricas*, ver (NEWTON, 1990, p. 49-66).

Seguindo esses rastros, a seção II é iniciada com a *Proposição I. Teorema I*, na qual Newton estabeleceu que um corpo inicialmente inercial, ao ser submetido a uma força central, move-se obedecendo à lei das áreas de Kepler. Por sua vez, encontra-se nessa proposição a explicação para a pergunta: *Por que a órbita descrita pelo movimento de um planeta é elíptica e não circular?* (Figura 74).

Figura 74 – Ilustração geométrica da Proposição I de Newton.



Fonte: Newton (1990, p. 50).

Frente à Figura 74, nas palavras de Newton, “as áreas nas quais os corpos giram e descrevem por meio de raios traçados até um centro de força imóvel, de fato, situam-se nos

mesmos planos imóveis e são proporcionais aos tempos nos quais elas são descritas” (NEWTON, 1990, p. 49).

Pela Proposição I, Newton forneceu o significado físico (dinâmico) para a *lei das áreas*, transformando-a de uma simples lei matemática, para uma lei que fornecia a explicação de como ocorre o movimento de um corpo submetido a uma força central. Dessa forma, um segmento traçado do centro de força ao corpo varre áreas iguais em intervalos de tempos iguais, descrevendo, no limite, um movimento curvo. Nessa Figura 74, Newton apresentou uma demonstração geométrica, considerando o que segue.

Suponha que o tempo seja dividido por partes iguais e, na primeira parte desse tempo, faça o corpo descrever, pela sua força inata (força inercial), a linha reta (**AB**). Na segunda parte desse tempo, o corpo prossegue (pela Lei I)<sup>20</sup> se não for impedido diretamente até (*c*), ao longo da linha (**Bc**) igual a (**AB**), tal que pelos raios (**AS**, **BS**, **cS**), traçados até o centro, as áreas iguais (**ASB**, **BSc**) são descritas. Mas, quando o corpo chega a (**B**), suponha que uma força centrípeta atue imediatamente com um grande impulso, que desviando o corpo de sua linha reta (**Bc**), força-o a continuar seu movimento ao longo da linha reta (**BC**).

Traçando-se o segmento de reta (*cC*) paralelamente a (**BS**) em (**C**), e no final da segunda parte do tempo, o corpo (pelo Corolário I das Leis) se encontrará em (**C**), no mesmo plano que o triângulo (**ASB**). Portanto, demonstrando que as áreas dos triângulos (**ASB** e **SBC**) são iguais. Newton concluiu que o movimento do corpo obedece à lei das áreas ou primeira lei de Kepler. Do mesmo modo, quando o corpo alcança os pontos (**C**, **D**, **E**, **F**) e assim sucessivamente, bem como no limite em que o número de triângulos aumenta e suas áreas diminuem proporcionalmente, a trajetória do corpo tende a uma curva.

Nesse sentido, o Corolário I diz que *um corpo, submetido a duas forças simultaneamente, descreverá a diagonal de um paralelogramo no mesmo tempo em que ele descreveria os lados pela ação daquelas forças separadamente* (NEWTON, 1990, p. 17). Por conseguinte, pela Proposição II, dessa mesma seção, Newton afirma que:

Todo corpo que se move em qualquer linha curva descrita em um plano, e por um raio traçado até um ponto imóvel ou que se move com um movimento retilíneo uniforme, descreve em torno deste ponto áreas proporcionais aos tempos, é impelido por uma força centrípeta dirigida para aquele ponto. (NEWTON, 1990, p. 51-52)

---

<sup>20</sup>“Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele” (NEWTON, 1990, p. 15).

Com essa proposição, Newton apresentou uma generalização da Proposição II, para um centro de força que pode se mover acelerado. Sua intenção foi aplicá-la ao problema ligado ao sistema físico Terra-Lua, como descrito na passagem a seguir:

Faça L representar o primeiro corpo e T o segundo; e (pelo corolário VI das Leis)<sup>21</sup> se ambos os corpos são impelidos da direção de linhas paralelas, por uma nova força igual e contrária àquela pela qual o segundo corpo T é impelido, o primeiro corpo L prosseguirá descrevendo em torno do outro corpo T as mesmas áreas que antes. Mas a força pela qual aquele outro corpo T foi impelido será agora anulada por uma força igual e contrária; e, portanto (pela Lei I), aquele outro corpo T, agora abandonado a si mesmo, estará ou em repouso ou movendo-se uniformemente para frente em uma linha reta; e o primeiro corpo L, impelido pela diferença das forças, isto é, pela força remanescente, continuará descrevendo em torno do outro corpo T áreas proporcionais aos tempos. E, portanto, (pelo Teorema II)<sup>22</sup>, a diferença das forças está dirigida para o outro corpo T como seu centro. (NEWTON, 1990, p. 53-54)

Conquanto, Newton apresenta a Proposição IV<sup>23</sup>, constructo de grande importância, para estabelecer, pela primeira vez, uma medição da força centrípeta para o movimento circular uniforme, indicando a extrapolação dessa medida para o caso dos corpos celestes<sup>24</sup>. De acordo com Newton, as forças centrípetas dos corpos:

[...] tendem aos centros dos círculos (pela Proposição IV e Corolário II da Proposição I) e estão umas para as outras da mesma forma que os versos-senos dos arcos menores descritos em tempos iguais (pelo Corolário IV, Proposição I), ou seja, da mesma forma que os quadrados dos mesmos arcos aplicados aos diâmetros dos círculos (pelo Lema VII)<sup>25</sup>, e, portanto, já que estes arcos são proporcionais aos raios, as forças serão proporcionais aos quadrados de quaisquer arcos descritos no mesmo tempo e aplicados aos raios dos círculos. (NEWTON, 1990, p. 55)

Representando a conclusão fundamental da Proposição IV, em linguagem matemática contemporânea, tem-se ( $F \propto S^2/R$ ), em que se lê que a força centrípeta é

<sup>21</sup>“Corolário IV – o centro comum de gravidade de dois ou mais corpos não tem seu estado de movimento ou repouso alterado pelas ações dos corpos entre si e, portanto, o centro comum de gravidade de todos os corpos agindo uns sobre os outros (excluindo ações externas e impedimentos) ou está em repouso, ou se move uniformemente em uma linha reta”. (NEWTON, 1990, p. 21)

<sup>22</sup>“Proposição II. Teorema II. Todo corpo que se move em qualquer linha curva descrita em um plano, e por um raio traçado até um ponto imóvel ou que se move como movimento retilíneo uniforme, descreve em torno deste ponto, áreas proporcionais aos tempos, é impelido por uma força centrípeta dirigida para aquele ponto” (NEWTON, 1990, p. 51-52).

<sup>23</sup>“As forças centrípetas de corpos, que por movimentos iguais descrevem círculos diferentes, tendem para os centros dos mesmos círculos; e estão umas para como os quadrados dos arcos descritos em tempos iguais divididos, respectivamente, pelos raios dos círculos” (NEWTON, 1990, p. 55).

<sup>24</sup>Para melhor explicitá-la, segue-se a exposição extraída do próprio Principia, em conjunto com a discussão feita por (TEIXEIRA; PEDUZZI; FREIRE JR, 2010, p. 236-238).

<sup>25</sup>“Lema VII – o mesmo sendo suposto, afirmo que a razão final do arco, da corda e da tangente, qualquer um para qualquer outro, é a razão de igualdade” (NEWTON, 1990, p. 39).

proporcional ao quadrado do arco (S), dividido pelo raio (R) do círculo. Por conseguinte, o impacto desse constructo é substantivado com o Corolário VI:

Corolário VI – Se os tempos periódicos forem como os raios elevados à potência (3/2), e as velocidades, portanto, inversamente como as raízes quadradas dos raios, as forças centrípeta serão inversamente com os quadrados dos raios; e vice-versa. (NEWTON, 1990, p. 55)

Por sua vez, são justamente os Corolários I e II que permitem compreender essa conclusão. Por exemplo, pelo Corolário I, Newton afirmou que “estes arcos são proporcionais às velocidades dos corpos, e as forças centrípeta estão em uma razão composta da razão direta dos quadrados das velocidades e da razão inversa simples dos raios” (NEWTON, 1990, p. 55).

Em face disso, para tempos iguais, Galileu obteve como resultado a expressão ( $S \propto v$ ), o arco descrito por um círculo é proporcional à sua velocidade. Desse modo, incluindo esse resultado na conclusão da Proposição IV ( $F \propto S^2/R$ ), a força centrípeta encontrada é proporcional ao quadro da velocidade, dividido pelo raio do círculo ( $F \propto v^2/R$ ). Pelo “Corolário II – E uma vez que os tempos periódicos são como os raios divididos pelas velocidades, as forças centrípeta são como os raios divididos pelos quadrados dos tempos periódicos” (NEWTON, 1990. p. 55).

Diante disso, sabe-se que, de acordo com Galileu, o tempo periódico é proporcional ao raio do círculo dividido pela velocidade ( $T \propto R/v$ ). E, novamente, incluindo essa última relação na expressão ( $F \propto v^2/R$ ) e fazendo as simplificações, obtém-se a relação ( $F \propto R/T^2$ ), que permitiu a conclusão que Newton alcançou com o Corolário VI. Sabendo-se que pela terceira lei de Kepler ( $T^2 \propto R^3$ ), pelas expressões ( $T \propto R/v$ ) e ( $T^2 \propto R^3$ ), encontra-se facilmente que: ( $v \propto R/T$ ), ( $v^2 \propto R^2/T^2$ ), ( $v^2 \propto R^2/R^3$ ) e ( $v^2 \propto 1/R$ ), que na expressão ( $F \propto R/T^2$ ) resulta em ( $F \propto R/R^3$ ) e, finalmente, na medida da força centrípeta dada pela relação ( $F \propto 1/R^2$ ). Por sua vez, o significado físico dessa expressão ( $F \propto 1/R^2$ ) estabelece que a força centrípeta que gera um movimento circular e uniforme é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o corpo que gira e o centro do círculo (TEIXEIRA; PEDUZZI; FREIRE JR, 2010).

Compreendendo o valor científico de sua medida da força centrípeta, Newton comentou o seguinte, no Escólio que precede os nove Corolários da Proposição IV:

O caso do sexto Corolário prevalece nos corpos celestes (como Sir Christopher Wren, Dr. Hooke e Dr. Halley separadamente observaram); e, portanto, no que segue, pretendo tratar de forma mais geral o que está relacionado à força centrípeta que descreve com os quadrados das distâncias a partir dos centros. Além disso, por meio da Proposição anterior e de seus Corolários, podemos descobrir a proporção de uma força centrípeta para qualquer outra força conhecida, como a da gravidade. Porque se um corpo, por meio de sua gravidade, gira em um círculo concêntrico à Terra, essa gravidade é a força centrípeta daquele corpo. Mas a partir da queda de corpos pesados, o tempo de uma revolução inteira é obtido, bem como o arco descrito em qualquer tempo dado (pelo Corolário IX desta proposição). E por tais Proposições, Mr. Huygens, em seu excelente livro *De horologio oscillatório*, comparou a força da gravidade com as forças centrífugas dos corpos que giram. (NEWTON, 1990, p. 55-56)

Com mais esses dados corroborativos, advindos dos trabalhos de outros importantes personagens da história da ciência, o vínculo epistemológico criado a partir da dívida intelectual de Newton com Hooke fica ainda mais consubstanciado. Uma vez que, o impacto da Proposição IV ( $F \propto S^2/R$ ), para a teoria da gravitação universal foi bastante contundente. No mesmo Escólio, Newton teve a preocupação de demonstrar essa Proposição, de modo diferente, utilizando a geometria de um polígono, ver (NEWTON, 1990, p.56-57).

Já na “Proposição V – sendo dada, em quaisquer lugares, a velocidade com a qual um corpo descreve uma dada figura, por meio de forças dirigidas a algum centro comum, é requerido encontrar esse centro” (Ibid., p. 57) –, Newton apresentou um modo claro de encontrar o centro de forças de uma órbita e a velocidade em dois pontos quaisquer. Com isso, na Proposição VI, uma generalização da anterior, ele forneceu um método para medir a força centrípeta, por meio da expressão ( $T \propto R/v$ ), para qualquer órbita com centro imóvel.

Esse método permitiu a Newton resolver, por demonstrações geométricas, todos os problemas elencados no Principia Livro I, desde a Proposição VII a XIII. Porém, antes de apresentar as soluções alcançadas por Newton, é importante,

[...] levar em conta que esses resultados apresentados por Newton eram considerados sempre no limite em que os arcos, cordas e tangentes tendiam a coincidir entre si por aproximação entre os extremos de tais linhas, portanto, era com tais aproximações que os resultados eram válidos. (TEIXEIRA; PEDUZZI; FREIRE JR, 2010, p. 239)

Por conseguinte, as proposições VII a XIII relativas aos problemas solucionados por Newton, foram as seguintes:

Proposição VII – Se um corpo gira na circunferência de um círculo, propõe-se encontrar a lei de força centrípeta dirigida para um ponto dado qualquer. Proposição VIII – Se um corpo se move em uma semicircunferência (dada), propõe-se encontrar a lei de forças centrípeta que tende para um ponto (dado), tão remoto que todas as

linhas traçadas naquela direção podem ser consideradas paralelas. Proposição IX – Se o corpo gira em uma espiral (dada), cortando todos os raios, com um ângulo dado, propõe-se encontrar a lei da força centrípeta que tende para o centro dessa espiral. Proposição X – Se o corpo gira em uma elipse, propõe-se encontrar a lei de força centrípeta que tende para o centro da elipse. Proposição XI – Se um corpo gira em uma elipse, propõe-se encontrar a lei da força centrípeta que tende para o foco da elipse. Proposição X – Se o corpo gira em uma elipse, propõe-se encontrar a lei de força centrípeta que tende para o centro da elipse. Proposição XI – Se um corpo gira em uma elipse, propõe-se encontrar a lei da força centrípeta que tende para o foco da elipse. Proposição XII – Suponha que um corpo se mova em uma hipérbole, propõe-se encontra a lei de força centrípeta que tende para o foco dessa figura. Proposição XIII – Se um corpo move-se no perímetro de uma parábola, propõe-se encontrar a lei de força centrípeta que tende para o foco dessa figura. (NEWTON, 1990, p. 62-71)

Respectivamente, a Figura 75 contempla as soluções de todas essas proposições.

Figura 75 – Síntese das soluções dos problemas-Proposições VII a XIII.

Proposição	Forma da órbita	Localização do centro de força	Lei de força
VII (também em <i>De Motu</i> )	Círculo	Qualquer ponto do círculo	$F \propto \frac{1}{R^2 C^3}$ R = altura do corpo (da posição do corpo na órbita ao centro de força) C = corda que sai do corpo e passa pelo centro de força
VIII	Semicircunferência	Ponto muito distante	$F \propto \frac{1}{R^3}$
IX	Espiral	Centro	$F \propto \frac{1}{R^3}$
X (também em <i>De Motu</i> )	Elipse	Centro	$F \propto R$
XI (também em <i>De Motu</i> )	Elipse	Um dos focos	$F \propto \frac{1}{R^2}$
XII	Hipérbole	Um dos focos	$F \propto \frac{1}{R^2}$
XIII	Parábola	Um dos focos	$F \propto \frac{1}{R^2}$

Fonte: Teixeira, Peduzzi e Freire Jr. (2010, p. 239).

Mediante a solução dos problemas enunciados pelas proposições VII a XIII, Newton mostrou que para o movimento orbital descrito por uma elipse, uma hipérbole e uma parábola (com centro em um dos respectivos focos dessas figuras geométricas), a força é inversamente proporcional ao quadrado da distância. Por conseguinte, ele generalizou os resultados das

proposições XI, XII e XIII, evidenciando que para as secções cônicas, a força também é do tipo  $(1/R^2)$ . Além disso, Newton também compreendeu que a atração mútua entre a Terra e o Sol é um caso particular da sua Terceira Lei - “A toda ação há sempre oposta uma reação igual, ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas” (NEWTON, 1990, p. 16). O que deixa evidente sua solução para o problema conceitual interno de incompatibilidade lógica entre a terceira lei de Kepler e a teoria da gravitação universal.

Em duas passagens do *Principia* citadas por Bernard Cohen, a compreensão de Newton sobre a interação mútua entre os corpos também se tornou evidente. Na primeira delas, Newton afirmou:

A força atrativa encontra-se em ambos os corpos [...] Embora as ações de cada planeta sobre o outro se possam distinguir entre si e possam ser consideradas como as duas ações, pelas quais um atrai o outro, porém, como se trata de ações entre os mesmos dois corpos, não são duas ações, mas uma operação simples entre dois termos [...]. A causa da ação é dupla, nomeadamente a disposição de cada um dos dois corpos; a ação é de, outro modo, dupla, na medida em que se exerce entre dois corpos; mas, por ser entre dois corpos, ela é singular e unitária. Não há, por exemplo, uma operação pela qual o Sol atraia Júpiter e outra operação pela qual Júpiter atraia o Sol, mas uma operação pela qual Júpiter e o Sol se atraem mutuamente. (COHEN BERNARD, 1983, p. 279)

Frente a essa passagem, o problema conceitual com a terceira lei de Kepler residia no fato desta ser válida para um sistema de corpos orbitando em torno de um ponto central, desconsiderando a atração mútua entre dois corpos (Sol e planeta) e as atrações entre muitos corpos (os planetas entre si).

Newton considerou que se Terra e o Sol interagem mutuamente, os demais planetas também devem interagir entre si e com esses dois corpos celestes. Por conseguinte, ele generalizou o problema de dois corpos para o problema de muitos corpos, porém reconheceu não existir uma solução exata. A principal implicação da solução desse problema, em particular, tornou-se de grande importância para o desenvolvimento da física, pois Newton abordou os corpos celestes de maneira abstrata, como se toda a massa deles se concentrasse em um único ponto central.

Nesse sentido, Cohen (1983, p. 269) afirma que, apesar de as três leis de Kepler terem se tornado a pedra angular da dinâmica planetária newtoniana, elas “não são estritamente verdadeiras no mundo físico”. Pelo contrário, elas “são verdadeiras apenas para uma construção matemática na qual as massas pontuais não interagem entre si e orbitam ou

um centro de força matemático ou um corpo estacionário que as atrai” (COHEN Bernard, 1988, p. 269 *apud* TEIXEIRA; PEDUZZI e Freire Jr., 2010, p. 241). Portanto, Newton mostrou com a *terceira lei de Kepler* – válida apenas por aproximação da dinâmica celeste newtoniana – que a força de atração mútua entre o Sol e cada planeta é exatamente a mesma.

Por esses feitos extraordinários, Newton efetivamente desenvolveu a teoria da gravitação universal no Livro III (Sistema do mundo) do *Principia*, no qual concebe, de forma geral, a força gravitacional como uma propriedade universal de todos os corpos. Em adição a essa generalização, ele explicou o movimento dos cometas, tratando-os como corpos celestes que, interagindo gravitacionalmente com o Sol, movem-se em trajetória elíptica, para os períodos que retornavam, ou em trajetórias parabólicas, para os períodos que não retornavam – não periódicos.

No Escólio da Proposição V, Livro III, finalmente, Newton renomeou a força centrípeta, afirmando que:

A força que retém os corpos celestiais em suas órbitas foi até aqui chamada de força centrípeta; mas, sendo tornado claro agora que não pode ser nenhuma outra senão uma força gravitacional, a chamaremos, a partir de agora, de gravidade. Pois, a causa desta força centrípeta que retém a Lua em sua órbita irá se estender para todos os planetas. (COHEN BERNARD, 1983, p. 806)

Por essa concepção, enquanto a palavra *gravitação* se refere à *atração*, a palavra *universal* significa que toda partícula de matéria do universo atrai todas as outras partículas de matéria, com uma força precisamente definida.

Portanto, pelo impacto científico que a teoria da gravitação universal alcançou, Newton ampliou seu *valor epistêmico de abrangência* não só para o sistema solar, mas também para todo o universo. E, nesse sentido, é importante, na próxima seção, finalizar esse amplo estudo da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, apresentando como sua teoria da gravitação universal contribuiu para que fosse possível estabelecer uma nova visão de mundo e uma nova tradição de pesquisa europeia, sem vínculos metodológicos e ontológicos com a tradição de pesquisa grega antiga.

Ao findar com esse breve significado do trabalho de Newton, é possível defender sob a lente epistemológica da solução dos problemas de Larry Laudan, especialmente, localizados nas áreas da astronomia, da cosmologia e da física, como nascem e se desenvolvem as tradições de pesquisas científicas, e como é possível, a partir disso, poder construir diversos vínculos epistemológicos entre o conteúdo da história da ciência e os aspectos, características,

princípios da natureza da ciência inerentes à dinâmica e complexa produção científica. Especialmente, quando se observa a ciência como uma incansável atividade intelectual e coletiva humana de solução de problemas.

#### 14.3 O SIGNIFICADO DA SÍNTESE NEWTONIANA POR ALEXANDRE KOYRÉ

Para falar sobre o significado da síntese newtoniana, no estabelecimento da nova tradição de pesquisa europeia, especialmente, astronômica, cosmológica e física, é oportuno afirmar que Newton foi responsável por montar o disperso “quebra-cabeça” científico intelectual, no contexto do século XVII, cujas peças foram forjadas arduamente por Copérnico, Bruno, Brahe, Kepler, Galileu, Descartes, Gilbert, Huygens, Halley, Hooke, Christopher Wren, dentre outros. E, por isso, o próprio Newton não deixou de reconhecer que se enxergou tão longe, foi porque se apoiou em ombros de verdadeiros gigantes.

Nessa direção, Alexandre Koyré (2002) afirma que o objetivo mais profundo da visão de mundo newtoniana foi abolir o mundo do “mais ou menos”, o mundo das qualidades e da percepção sensorial, mundo da avaliação de nossa vida cotidiana, substituindo-o pelo universo (arquimediano) da precisão, das medidas exatas e da determinação rigorosa. Com Newton, pode-se dizer que, de fato, a nova tradição de pesquisa europeia foi estabelecida. Posto que uma nova visão de mundo foi capaz de destituir o *cosmos* inventado pelos gregos, há mais de dois mil anos, e todos os conceitos filosóficos, metafísicos associados à sua visão de mundo, incluindo o banimento do pensamento científico europeu, de seus compromissos metodológicos e ontológicos.

Com a destruição do *cosmos grego*, o mundo da ciência, o mundo real, deixou de ser concebido como um todo finito e hierarquicamente ordenado e qualitativamente e ontologicamente diferenciado. Em detrimento disso, na *nova visão de mundo*, o universo foi concebido como indefinido por Descartes, e até infinito por Giordano Bruno, porém unido não por uma estrutura imanente, mas apenas pela identidade de seus conteúdos e leis fundamentais.

Contrária à *visão de mundo aristotélica*, divisão de dois mundos distintos (supralunar e sublunar), na *nova visão de mundo newtoniana*, todos os componentes do céu e da Terra foram situados no mesmo nível ontológico: a *física celeste* e a *física terrestre* foram identificadas e unificadas, tornando física e astronomia interdependentes, devido à sujeição comum das duas áreas para com a geometria. Por sua vez, a principal implicação dessa

interdependência foi o desaparecimento do pensamento científico de “todas as considerações baseadas no valor, na perfeição, na harmonia, no significado e no objetivo, porque todos esses conceitos, doravante meramente subjetivos, não podiam ter lugar na nova ontologia” (KOYRÉ, 2002, p. 87). Isso significa dizer também que desapareceram do pensamento científico europeu “todas as causas formais e finais, como modalidades de explicação, isso porque são rejeitadas pela nova ciência, ou porque são substituídas por causas eficientes e até mesmo materiais” (Idem).

Somente as causas eficientes têm sua existência admitida no novo universo da geometria hipostasiada<sup>26</sup>, e é somente nesse mundo (arquimediano) abstrato-real, onde corpos abstratos movem-se em um espaço abstrato, que as leis do ser e do movimento da nova ciência – a clássica – são válidas e verdadeiras. (KOYRÉ, 2002, p. 87)

Em outras palavras, a compreensão de como a ciência clássica substituiu o mundo da qualidade pelo da quantidade, perpassa por saber que não existem qualidades no mundo dos números ou nas figuras geométricas, não existe lugar para esses construtos na ontologia da matemática. Em conformidade, Newton criou a geometrização do espaço, isto é, instaurou o espaço dimensional homogêneo e abstrato da geometria euclidiana, em substituição do contínuo posicional concreto e diferenciado da física e da astronomia pré-galileanas – uma geometrização da natureza e, portanto, a matematização (geometrização) da ciência. Para tanto, deve-se lembrar de que, aproximadamente, cem anos antes do nascimento de Newton, 1543, Copérnico resgatava a ideia heliocêntrica de Aristarco de Samos, para arrancar a Terra do centro do universo e lançá-la no espaço, transformando-a em mais um planeta do nosso sistema solar.

Posteriormente, as observações telescópicas de Galileu, a partir de 1609, mostraram aos olhos humanos fenômenos celestes (fases de Vênus e as manchas solares), crateras e montanhas na Lua e os satélites (quatro luas) orbitando o planeta Júpiter, cujos olhos humanos nunca tinham percebido antes. Galileu descortinou para a investigação científica da nova tradição de pesquisa europeia dois mundos interligados, do infinitamente grande ao pequeno. Além disso, ele sujeitou o movimento ao número e abriu caminho para uma nova formulação dos conceitos de matéria e movimento – pilares das novas ciências astronomia, cosmologia e física. Da mesma forma, entre 1609 a 1619, Kepler forjou suas leis dos movimentos

---

<sup>26</sup> Considerar falsamente (uma abstração, um conceito, uma ficção) como realidade; transformar uma relação lógica numa substância (no sentido ontológico da palavra).

planetários e banuiu metodologicamente o movimento circular uniforme da prática da astronomia, que descrevia a trajetória dos planetas como circulares e uniformes.

Com efeito, na *física newtoniana*, o conceito de movimento substituiu a ideia de movimento da *física aristotélica*, por uma ideia puramente matemática, que também se opõe à concepção pré-galileana e pré-cartesiana. Essa substituição ocorreu na troca de uma ideia que percebe o movimento como uma espécie de devir – processo de mudança que afeta os corpos submetidos a ele – por outra, que interpreta o movimento como uma espécie de ser, não um processo, mas um *status* que, tão permanente e indestrutível quanto o repouso, afeta os corpos em movimento.

Estando no mesmo plano ontológico, repouso e movimento tornaram-se indistinguíveis, pois não estão nos corpos em si, os corpos é que estão em repouso ou em movimento, em relação uns aos outros, ou ao espaço em que existem, repousam ou se movem. Foi essa interpretação que sustentou a estrutura da nova tradição de pesquisa europeia, espelhada pela nova astronomia, cosmologia e física, que mesmo com dificuldades intrínsecas, ancoram-se na *lei da inércia* – o fundamento da ciência moderna do século XVII (WESTFALL, 1995, p. 164) – primeira lei do movimento de Sir Isaac Newton. Por sua vez,

O movimento sobre o qual versa essa lei não é o movimento dos corpos de nossa experiência; não deparamos com ele em nossa vida cotidiana. Trata-se do movimento dos corpos geométricos (arquimedianos) no espaço abstrato. É por essa razão que nada tem a ver com a mudança. O “movimento” dos corpos geométricos no espaço geométrico não se modifica em nada; os “lugares” desse espaço são equivalentes, ou até idênticos [...]. (KOYRÉ, 2002, p. 89)

Por conseguinte, pode-se compreender, com isso, um dos significados da matemática ser vista como um constructo intelectual estruturante do pensamento físico, pois sem a invenção do cálculo diferencial, por Newton e Leibniz, não seria possível, nesse contexto histórico, demonstrar a identidade entre a gravitação terrestre e a celeste e o papel da lei do inverso do quadrado da distância.

Deve-se observar, então, que a *visão de mundo newtoniana* está alicerçada em quatro aportes fundamentais: primeiro – o conceito de *matéria*, um número infinito de partículas separadas e isoladas, concretas e imutáveis, mas não idênticas; segundo – o conceito de *movimento*, constructo de estado relacional, que transporta as partículas em qualquer direção no vazio infinito e homogêneo; terceiro – o conceito de espaço, um vazio infinito e

homogêneo, no qual, sem oposição, os corpúsculos<sup>27</sup> executam seus movimentos; e quarto – a *atração* responsável pela coesão e sustentação do mundo newtoniano.

Ressalta-se que, os conceitos de vazio, as ideias de ação através do vazio e de ação à distância (atração), presentes na visão de mundo newtoniana, tornaram-se objeto de críticas feitas por nomes importantes, contemporâneos a Newton, dentre eles, Huygens, Leibniz, Berkeley, bem treinados na rejeição cartesiana das ideias pouco claras e inteligíveis (JAMMER, 2010). Contudo, as objeções de cada um desses críticos ao conceito de espaço absoluto da mecânica newtoniana não serão assinaladas aqui, pois demandam uma nova jornada histórico-filosófica em direção à mudança ontológica dos conceitos de espaço e de tempo, encontrada na mecânica relativística de Albert Einstein, que será parte de um projeto futuro!

Não obstante, no mundo newtoniano composto principalmente pelo vazio infinito, em que apenas uma parte ínfima é preenchida pela matéria, os corpúsculos são unidos por uma lei matemática muito simples que os conectam e os integram, isto é, a lei da atração. Mediante essa lei, cada corpúsculo se relaciona com os demais e a todos está unido, participando e desempenhando um papel na constituição do novo *Sistema Mundi*, no qual se encontra o centro operacional da nova tradição de pesquisa europeia, no contexto histórico da astronomia, da cosmologia e da física, dos babilônios à teoria da gravitação universal newtoniana, no século XVII.

Findado esse extenso estudo da histórica conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, fundamentado na solução de problemas de Larry Laudan, no próximo capítulo será apresentada uma síntese da Unidade de Ensino elaborada como uma das principais contribuições desta tese para o ensino de ciências/física e para a promoção do pensamento crítico sobre a natureza da ciência.

---

<sup>27</sup>A estrutura corpuscular da matéria, enfaticamente afirmada, constituiu uma base sólida para a aplicação da dinâmica matemática à natureza. Produziu os *fundamentos* para as relações expressas pelo espaço. A cautelosa filosofia corpuscular não sabia realmente o que estava fazendo. Na verdade, vinha apenas mostrando o caminho para a síntese newtoniana da matemática e da experimentação. (KOYRÉ, 2002, p. 91).

## 15 A UNIDADE DE ENSINO SOBRE A HC DA ACF FUNDAMENTADA NA SP

Estruturalmente, a unidade de ensino sobre a história conceitual (HC) da astronomia, cosmologia e física (ACF), fundamentada na solução de problemas (SP), cujo plano de aulas encontra-se no apêndice, comporta vinte aulas de cinquenta minutos cada, divididas em dois contextos científicos investigativos bem marcantes, o da tradição de pesquisa grega antiga e o da nova tradição de pesquisa europeia, que brota cientificamente a partir do advento da astronomia copernicana e que vai se constituindo na direção da teoria da gravitação universal newtoniana.

Nessa direção, ela contém quinze textos<sup>28</sup> informados por uma perspectiva histórico-filosófica que vê a ciência como uma atividade intelectual de solução de problemas científicos, classificados como empíricos e conceituais; uma estratégia didática de elaboração de perguntas e respostas, acompanhada por um parecer avaliativo – *feedback* por pares; e dois opinários de sondagem (ANEXO 1), respectivamente, sobre: (i) as ideias dos estudantes acerca da importância da pergunta na construção de conhecimentos científicos pela ciência e sua relevância didática e em sala de aula; (ii) suas receptividades a respeito da proposta de ensino como um todo, da estratégia didática que guia as leituras dos textos, dos conteúdos dos textos e da percepção dos aspectos, características e princípios da natureza da ciência, que os textos veiculam e transmitem.

Teoricamente, esta proposta está fundamentada pelo alinhamento de dois referenciais principais (educacional e epistemológico), mais um terceiro, no âmbito didático, referente a uma série de estudos acadêmico-científicos nacionais e estrangeiros, que remontam trabalhos, desde finais do século XIX até os dias atuais, sobre a importância didática da pergunta como instrumento de ensino-aprendizagem. Esses três referências são orientados pelo eixo do domínio cognitivo, em detrimento dos eixos do domínio atitudinal e psicomotor, ambos pertencentes à área educacional.

No primeiro referencial, têm-se seis *objetivos educacionais* da Taxonomia de David Bloom, original e revisada, publicada nos anos de 1956 e 2001, que devem ser alcançados pelos estudantes. Esses objetivos perpassam por seis categorias gerais de ações verbais cognitivas, a saber: conhecer, entender, aplicar, analisar, criar/sintetizar, avaliar, que estão diretamente ligadas ao *saber fazer* do sujeito cognoscente – isto é, aquele que é capaz de

---

<sup>28</sup>É importante destacar que, apesar desses textos não serem anexado junto ao plano de aulas, seus títulos dão acesso ao conteúdo histórico abordado na tese, ao longo dos capítulos, isto é, do quarto ao décimo quarto.

conhecer. Para cada uma dessas categorias, existem ações verbais específicas que devem ser mobilizadas cognitivamente pelos estudantes nas atividades de ensino-aprendizagem.

Por exemplo, para o objetivo na categoria **conhecer**, o estudante poderá: apontar, citar, definir, descrever, distinguir, enumerar, enunciar, especificar, estabelecer, exemplificar, expressar, identificar, relatar, selecionar, etc.; na categoria **entender**: explicar, ilustrar, representar, diferenciar, distinguir, exprimir, interpretar, localizar etc.; na categoria **aplicar**: esboçar, estruturar, extrapolar, generalizar, interpretar, organizar, ordenar, comparar, etc.; na categoria **analisar**: criticar, correlacionar, relacionar, debater, etc.; na categoria **criar/sintetizar**: comunicar, construir, documentar, escrever, esquematizar, formular, produzir, propor, sistematizar, etc.; na categoria **avaliar**: argumentar, contrastar, escolher, julgar, valorizar, validar. Assim, quanto mais o pensamento estudantil transitar entre as categorias gerais e mobilizar essas ações verbais específicas, mais pode se aproximar de um ideal de desenvolvimento do pensamento crítico sobre um conteúdo, assunto, tema ou informação.

No segundo referencial, encontra-se a visão epistemológica do físico e filósofo da ciência Larry Laudan, que vê a ciência, acima de tudo, como uma atividade de solução de problemas empíricos e problemas conceituais. Laudan analisa o crescimento cognitivo da ciência mediante a dialética básica da atividade científica intelectual de solução de problemas e elaboração de *teorias*. Nesse contexto, os problemas são as perguntas da ciência, marcadas por contextos científicos, históricos, filosóficos e metafísicos guiados por compromissos metodológicos e ontológicos pertencentes às tradições de pesquisas – conjunto de afirmações metodológicas e ontológicas que orientam a elaboração de teorias e modelos para a solução de problemas. É importante ressaltar que, aqui, o termo *teoria* é utilizado para fazer referência às teorias e/ou modelos nos domínios disciplinares da astronomia, cosmologia e física. Nesses domínios, as teorias e/ou modelos podem ser classificados (as), especificamente, como explicativos (as), descritivos (as) ou preditivos (as).

Por exemplo, no domínio da astronomia, têm-se as teorias astronômicas planetárias gregas, que descreviam cinematicamente – sem se preocupar com a causa – tanto o movimento retrógrado dos planetas no céu, quanto permitiam as predições das posições dos planetas, dos alinhamentos dos corpos celestes – Terra, Lua, Sol e planetas –, e dos eclipses lunares e solares. Na cosmologia, os modelos cosmológicos gregos e europeus – geocêntrico, híbrido e heliocêntrico – descreviam cinematicamente o ordenamento dos planetas no céu. Por fim, no domínio da física, especialmente, nesta unidade de ensino tem-se a teoria da

gravitação universal newtoniana, que além de explicar a causa (interação à distância) do movimento dos planetas, dos cometas e dos corpos próximos à superfície da Terra e de outros planetas – incluindo a queda dos corpos e a órbita de satélites naturais e artificiais – permitiu a predição da existência de novos planetas (Urano, Netuno e Plutão<sup>29</sup>) no Sistema Solar. Além disso, é possível citar as demais teorias que estão para além dessa unidade, a saber, a teoria do eletromagnetismo, da radioatividade, da relatividade especial e geral, etc.

Mediante essa perspectiva epistemológica, os quinze textos representam os desdobramentos de alguns capítulos da tese (do quarto ao décimo quarto), que versam sobre a história da astronomia, da cosmologia e da física. Nos sete primeiros textos, os estudantes terão a oportunidade de construir conhecimentos sobre as perguntas da ciência, que marcam o contexto investigativo da tradição de pesquisa grega antiga. Incluindo, também, a compreensão de alguns aspectos, características e princípios da natureza da ciência que foram epistemologicamente vinculados aos conteúdos da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, nesses contextos investigativos.

Nesse cenário, o recorte temporal é iniciado a partir da astronomia babilônica, séculos VIII e IX, antes de Cristo, e vai perpassando, respectivamente: pelos trabalhos cosmológicos de Pitágoras de Samos e de seu discípulo Filolau de Crotona; pela cosmologia de Platão e a prescrição das perguntas mais importantes para o desenvolvimento da astronomia matemática instrumentalista grega; pela teoria planetária das esferas concêntricas de Eudoxo de Cnido; pela cosmologia e visão de mundo de Aristóteles; pelos modelos cosmológicos de Heráclides de Ponto e Aristarco de Samos – astrônomo responsável pela primeira medida quantitativa das distâncias relativas entre a Terra, o Sol e a Lua, e pela ideia astronômica heliocêntrica resgatada e desenvolvida na astronomia copernicana – incluindo adendos sobre a medida da esfericidade da Terra por Eratóstenes de Cirene e no destaque a Hipátia de Alexandria – primeira filósofa do ocidente; pela teoria planetária do epiciclo-deferente de Apolônio de Perga; pelas contribuições astronômicas de Hiparco de Nicéia; e, por fim, encerra-se no trabalho astronômico de Cláudio Ptolomeu – que foi responsável por sintetizar todo conhecimento astronômico grego em sua obra *Almagesto*, aperfeiçoar a teoria planetária de Apolônio, com a inclusão do artifício matemático *equante*, a fim de fornecer

---

<sup>29</sup>É importante ressaltar que, desde 2006, a União Astronômica Internacional decidiu que Plutão não é mais um planeta do sistema solar, classificando-o como “planeta anão” (ALBUQUERQUE; LEITE, 2016).

uma explicação quantitativa (cinemática descritiva) para os movimentos (Sol, Lua, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter, Saturno).

Nos textos seguintes, oito, os estudantes terão a oportunidade de observar o crescimento científico cognitivo, inerente a um novo desenvolvimento da astronomia, da cosmologia e da física, mediado pelas mudanças metodológicas e ontológicas que marcam o nascimento e o estabelecimento da nova tradição de pesquisa europeia.

Nessa direção, essas transformações poderão ser aferidas, respectivamente, por meio: dos conteúdos relativos aos fatores externos e internos à ciência e às práticas astronômicas, cosmológicas e físicas, nos antecedentes medievais europeus, isto é, entre os treze séculos que separam Cláudio Ptolomeu de Copérnico, séculos II ao XV d. C; do próprio trabalho de Copérnico, *A Revolução dos Orbes Celestes*; dos trabalhos de Tycho Brahe, particularmente, sobre o aparecimento da supernova e do cometa, respectivamente, nos anos de 1572 e 1577 e suas implicações astronômicas e cosmológicas materializadas em novas perguntas da ciência; da defesa do sistema copernicano por Giordano Bruno e por Galileu Galilei, incluindo suas observações telescópicas realizadas a partir de 1609, os estudos do movimento dos corpos em queda livre e sobre o plano inclinado, o lançamento de projéteis e suas explicação para os problemas empíricos fomentados pelo sistema copernicano; dos trabalhos astronômicos de Johannes Kepler, especialmente, suas leis empíricas dos movimentos planetários; de alguns aspectos da filosofia mecanicista de Descartes e a sua explicação mecânica da gravidade; e, finalmente, por meio dos passos intelectuais newtonianos em direção à concepção da teoria da gravitação universal, descrita em sua obra magna, *Principia*.

Por fim, no que se refere à série de estudos estrangeiros e nacionais sobre a importância da pergunta, como instrumento didático de ensino-aprendizagem, terceiro capítulo da tese, têm-se tanto o desenvolvimento de estratégias de ensino apresentada na terceira aula desta unidade quanto os conhecimentos acerca da aprendizagem dos estudantes. Por exemplo, a elaboração de perguntas, em sala de aula, tanto pelo professor (a) quanto pelo estudante, permite: (i) monitorar e auto avaliar as compreensões dos conteúdos; (ii) fornecer informações de diagnósticos sobre os processos de pensamento, ajudando a aumentar a motivação e o interesse pelos conteúdos de ensino; (iii) estimular a conscientização sobre as dificuldades de leitura e interpretação dos conteúdos de ensino, especialmente, em textos científicos, resolução de problemas/exercícios a lápis e papel, dentre outros, proporcionando-se a oportunidade do torna-se monitores ativos de seu próprio estado de compreensão de leitura; (iv) estimular o papel ativo dos estudantes, fundamental para a construção do

conhecimento; (v) o desenvolvimento da criatividade, impulsionada à medida em que os estudantes tornam familiar o desconhecido, isto é, informações que eles não entendem no texto e, por isso, necessitam formular perguntas claras para obter respostas desejáveis.

No que diz respeito à estratégia de ensino adotada, ela funciona como: (vi) uma estratégia de auto monitoramento externo, que permite os estudantes se conscientizarem da qualidade de suas perguntas; (vii) têm o *feedback* dos colegas, que auxilia a esclarecer perguntas confusas, ou mal formuladas e, com isso, aumentar a compreensão do texto; e (viii) permite que a avaliação dos estudantes seja aferida pela clareza das perguntas que elaboram e pelo interesse que despertam nos colegas, em sala de aula, acerca dos conteúdos de ensino.

É importante destacar que, algumas aulas desta unidade de ensino são dedicadas, respectivamente a: Aula 1 – problematização da importância da pergunta na construção de conhecimentos científicos e sondagem das ideias dos estudantes, acerca disso; Aula 2 – apresentação dos principais aspectos conceituais e filosóficos da visão de ciência como atividade de solução de problemas da epistemologia de Larry Laudan; Aula 3 – apresentação da estratégia didática da elaboração de perguntas e respostas e do parecer – *feedback por pares* – de avaliação das perguntas pelos estudantes; Aula 10 – revisão dos principais aspectos dos textos que compõem a primeira parte da unidade, juntamente com uma avaliação; Aula 20 – avaliação final da unidade de ensino como um todo, o que inclui a aplicação de um segundo opinário (ANEXO 1) – cujos elementos avaliativos foram sinalizados no início desta apresentação – e a entrega de um opinário 2 para ser respondido em casa, dentro de um prazo hábil estipulado, a critério do/da docente, este opinário pode constituir-se também em uma prova somativa.

Observa-se que, para a aula 10, é importante a realização de uma atividade diagnóstica, envolvendo as tarefas de elaboração, respostas e avaliação de perguntas, referentes aos principais aspectos dos sete textos discutidos até esse momento. Com isso, seu objetivo pode cumprir um duplo papel: no primeiro, permitir que o/a professor (a) possa perceber se os estudantes estão, ou não, realizando as atividades de modo satisfatório, tendo a oportunidade de diagnosticar, isso, na metade da unidade de ensino; e no segundo, oferecer condições aos estudantes de perceberem a passagem do contexto investigativo grego para os principais países da Europa, nesse contexto histórico, acompanhada pelo crescimento científico cognitivo espelhado pelas novas preocupações metodológicas e ontológicas inerentes às soluções dos problemas empíricos e problemas conceituais. Por sua vez, esse crescimento poderá ser percebido, também, nos próximos textos, pelo nascimento da

astrofísica, de uma nova cosmologia e uma nova física newtoniana, substitutiva da física aristotélica, que tem como alicerces a teoria da gravitação universal e as novas leis do movimento. Por fim, as aulas (4 a 19) são dedicadas à abordagem dos textos científicos já mencionados. Em conformidade com essa apresentação, torna-se relevante, pormenorizar a ementa desta unidade, seu principal objetivo geral e objetivos específicos de aprendizagem, a metodologia utilizada e, por fim os aspectos da avaliação dos estudantes.

### 15.1 A EMENTA DA UNIDADE DE ENSINO

A ementa desta unidade de ensino comporta dezessete elementos principais, a saber: noções científicas, conceituais, históricas e filosóficas sobre: (i) os fundamentos da epistemologia de Larry Laudan, que vê a ciência como uma atividade de solução de problemas; (ii) o contexto investigativo astronômico babilônico, que marca a fonte dos antigos dados astronômicos herdados pela civilização grega; (iii) os pressupostos metodológicos e ontológicos da tradição de pesquisa grega e europeia inerentes às práticas da astronomia, da cosmologia e da física, da Grécia Antiga até o séc., XVII; (iv) a origem dos problemas empíricos, no contexto da cosmologia de Platão; (v) a teoria astronômica planetária das esferas concêntrica de Eudoxo de Cnido e a origem dos problemas conceituais internos; (vi) a cosmologia de Aristóteles e a origem dos problemas conceituais externos implicados em sua visão de mundo; (vii) os modelos cosmológicos de Heráclides de Ponto, de Aristarco de Samos, a medida da esfericidade da Terra por Eratóstenes de Cirene, e um adendo a Hipátia de Alexandria; (viii) a teoria planetária do epiciclo-deferente de Apolônio de Perga e as contribuições astronômicas de Hiparco de Nicéia; (ix) as teorias planetárias equante-epiciclo-deferente de Cláudio Ptolomeu e a distinção entre a astronomia matemática e a astronomia física, no contexto da tradição de pesquisa grega (instrumentalismo versus realismo); (x) os fatores extras científicos e intracientíficos que permeiam a prática da astronomia, da cosmologia e da física, nos antecedentes medievais europeu – séc. II ao XV d. C; (xi) os fatores internos e externos a ciência implicados no advento da astronomia copernicana; (xii) os velhos e novos problemas empíricos e problemas conceituais fomentados pelo astronomia de Copérnico; (xiii) a defesa do sistema astronômico copernicano, por Giordano Bruno e Galileu Galilei, incluindo suas observações telescópicas, os estudos do movimento dos corpos em queda livre e sobre o plano inclinado, o lançamento de projéteis, e suas explicações para os problemas empíricos fomentados pela astronomia copernicana; (xiv) os trabalhos de Tycho

Brahe, em particular, sobre o aparecimento da supernova (em 1572) e do cometa (em 1577) e suas implicações astronômicas e cosmológicas materializadas em novos problemas empíricos e problemas conceituais da ciência; (xv) as leis (aproximadas) dos movimentos planetários de Johannes Kepler; (xvi) alguns aspectos da filosofia mecanicista e a explicação mecânica da gravidade apresentada por René Descartes; e (xvii) os problemas empíricos e os problemas conceituais, cujas soluções fomentaram a gênese da teoria da gravitação universal newtoniana.

## 15.2 OBJETIVO GERAL DA UNIDADE DE ENSINO

Como objetivo geral, esta unidade de ensino apresentar um amplo panorama dos aspectos científicos, conceituais, históricos, filosóficos, metafísicos e até religiosos, que marcam uma narrativa histórica conceitual da astronomia, cosmologia e da física, dos babilônios à gravitação universal newtoniana, fundamentada na solução dos problemas empíricos e dos problemas conceituais da epistemologia de Larry Laudan. O que inclui discutir também os diversos e relevantes vínculos epistemológicos criados entre os conteúdos dessa história conceitual e os importantes aspectos, características, princípios da natureza da ciência referendados pela literatura do ensino de ciências e do ensino de física.

## 15.3 OS OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM DA UNIDADE DE ENSINO

Ao final desta unidade de ensino, espera-se que os/as estudantes possam alcançar os seguintes objetivos de aprendizagem.

**1. Conhecer:** (i) a fonte dos dados observacionais herdados pela civilização grega, no contexto da astronomia babilônica e de seus objetivos astronômicos, culturais, místicos e religiosos; (ii) os compromissos metodológicos e ontológicos presentes nas cosmologias de Pitágoras de Samos e de seu discípulo Filolau de Crotona, que marcam o nascimento da tradição de pesquisa grega (séc. VI a. C); (iii) a origem dos problemas empíricos e dos problemas conceituais, nos contextos investigativos: da cosmologia de Platão, da teoria planetária de Eudoxo de Cnido, da cosmologia e visão de mundo de Aristóteles, da cosmologias de Heráclides de Ponto e Aristarco de Samos, das teorias planetárias de Apolônio de Perga e Cláudio Ptolomeu, e, por fim, (iv) da origem dos problemas empíricos e dos problemas conceituais, no contexto da tradição de pesquisa europeia, respectivamente:

nas críticas astronômicas, cosmológicas e físicas lançadas contra a doutrina e visão de mundo aristotélica; no sistema astronômico copernicano, nos trabalhos, especialmente, de Giordano Bruno, Galileu Galilei, Tycho Brahe, Johannes Kepler, René Descartes e Isaac Newton.

**2. Entender** a importância dos compromissos metodológicos e ontológicos, que marcam a ciência, a partir: de seus significados nas mudanças de contextos investigativos da astronomia, da cosmologia e da física, da Grécia para a Europa; de suas implicações astronômicas, cosmológicas, físicas, filosóficas, matemáticas, metafísicas e até religiosas, fomentadas pelo advento da astronomia copernicana. Juntamente com sua defesa por Giordano Bruno e por Galileu, incluindo suas observações telescópicas, os estudos do movimento dos corpos em queda livre e sobre o plano inclinado, o lançamento de projéteis e suas explicação para os problemas empíricos; dos trabalhos de Brahe, especialmente, sobre o aparecimento da supernova (em 1572) e do cometa (em 1577) e de suas implicações astronômicas e cosmológicas, como a origem de novos problemas empíricos e problemas conceituais; e, por fim, pelos trabalhos de Johannes Kepler (suas três leis empíricas - aproximadas - do movimento), René Descartes (sua filosofia mecanicista e explicação mecânica da gravidade) e Isaac Newton, especialmente, sua teoria da gravitação universal e um pouco do significado da síntese newtoniana do conhecimento científico, no contexto do séc. XVII.

**3. Aplicar** suas compreensões sobre os conteúdos dos textos, incluindo a percepção dos aspectos, características e princípios da natureza da ciência, que os textos veiculam e transmitem, nas atividades de elaboração de perguntas-respostas e a confecção de parecer sobre as perguntas elaboradas pelos próprios pares (colegas).

**4. Analisar** os aspectos científicos, conceituais, históricos, filosóficos, matemáticos, metafísicos e até religiosos, da solução dos problemas empíricos e dos problemas conceituais, nos contextos investigativos das tradições de pesquisas (grega antiga e europeia renascentista).

**5. Avaliar** as implicações da validade das soluções dos problemas empíricos e dos problemas conceituais, nos contextos investigativos (grego e europeu), que dão origem às teorias astronômicas planetárias e aos modelos cosmológicos, dos gregos antigos até a ciência moderna do século XVI e XVII. Bem como a importância da diferenciação epistemológica entre as correntes de pensamento instrumentalista e realistas, no contexto das tradições de pesquisas grega e europeia.

**6. Construir** reflexões sobre os conteúdos científicos estudados e sobre a natureza da ciência na perspectiva das soluções dos problemas empíricos e dos problemas conceituais e do conceito de tradição de pesquisa da epistemologia de Larry Laudan. Assim como também, construir uma percepção mais abrangente sobre a importância dos problemas empíricos e dos problemas conceituais e de suas soluções, para o desenvolvimento da ciência (astronomia, cosmologia e física), desde os gregos antigos ao século XVII. De modo a despertar, ainda mais, o interesse de conhecer os problemas científicos e as soluções que levam ao desenvolvimento de outras áreas específicas da Física.

#### 15.4 ASPECTOS METODOLÓGICOS DA UNIDADE DE ENSINO

Metodologicamente, esta unidade de ensino se desenvolve a partir de aulas presenciais, com discussões expositivas dialogadas, orientadas por leituras de textos científicos informados por história e filosofia da ciência. Esses textos encabeçam os temas da maior parte das aulas. As atividades desenvolvidas pelos estudantes, a partir da leitura desses textos, residem na elaboração de perguntas e respostas e na confecção de parecer (avaliação) das perguntas, denominado de *feedback por pares*.

Além disso, esta unidade conta também com dois opinários de sondagem: (1) sobre as ideias dos estudantes acerca da importância da pergunta na construção de conhecimentos científicos e em sala de aula; (2) sobre a receptividade dos estudantes a respeito da proposta do curso, da estratégia didática adotada, dos conteúdos dos textos, incluindo suas percepções acerca dos aspectos, características e princípios da natureza da ciência veiculados e transmitidos por esses textos.

#### 15.5 A AVALIAÇÃO DOS/AS ESTUDANTES NA UNIDADE DE ENSINO

Nesta unidade de ensino, os estudantes podem ser avaliados, qualitativamente e por meio de provas, nos quesitos de: (i) participação e envolvimento das leituras e discussões dos textos em sala de aula; (ii) realização das atividades de elaboração de perguntas-respostas e parecer; prova escrita associada aos objetivos específicos que encabeçam esta unidade de ensino e a estratégia didática utilizada pelos estudantes. Por exemplo, o professor pode escolher um conjunto de perguntas elaboradas pelos próprios estudantes, ao longo da unidade de ensino, abrangendo todas as categorias gerais dos objetivos educacionais, ou elaborar, a

partir desses objetivos, o próprio conteúdo da prova escrita - preferencialmente, aplicada na metade e no final do curso; e também (iii) aplicar os opinários de sondagem sobre a receptividade dos estudantes acerca do curso em geral, da proposta didática adotada, do conteúdo e dos aspectos, características e princípios da natureza da ciência, que os textos veiculam e transmitem.

No contexto dessa unidade de ensino, mais uma, é importante vez ressaltar que, juntos ao plano de aulas (APÊNDICE), estão (ANEXOS) todos os recursos necessários para que ela venha a ser implementada em sala de aula. Começando, por exemplo, com os Opinários 1 e 2, respectivamente, utilizados na **Aula 1 – A importância da pergunta no processo de construção de conhecimento científico**, e na avaliação final da unidade de ensino (ANEXO 1). Apresentação em *Power Point* para a **Aula 2 – Noções epistemológicas laudadianas acerca da ciência como uma atividade de solução de problemas empíricos e de problemas conceituais** (ANEXO 2). A apresentação em sobre a estratégia da elaboração de perguntas, respostas e parecer avaliativo, para a **Aula 3 – A Estratégia Didática de Elaboração de Perguntas, Respostas e do Parecer de Avaliação das Perguntas** (ANEXO 3).

Por fim, o conjunto de perguntas sobre os conteúdos os quinze textos (ANEXO 4), elaboradas a partir dos objetivos educacionais de David Bloom, para subsidiar a discussão dos conteúdos em sala de aula, bem como servir de parâmetro para que o professor ou a professora possa planejar sua implementação em sala de aula, como também preparar as avaliações na metade e no final da mesma.

Observado esses aspectos importantes, no próximo e último capítulo, procura-se defender, com bons argumentos, como esta tese sobre a história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, fundamentada na epistemologia contemporânea da solução de problemas de Larry Laudan conseguiu contribuir significativamente com o ensino de ciências/física, especialmente, em relação às três pulsantes necessidades: a resignificação dos conteúdos científicos; o desenvolvimento de proposta de ensino fundamentada pelo aporte epistemológico da história e filosofia da ciência, como alternativa complementar ao campo investigativo da resolução de problemas; e a promoção do pensamento crítico sobre a natureza da ciência, por diferentes perspectivas epistemológicas, mas em especial pela história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, como áreas milenares da ciência.

## 16 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante de alguns desafios substantivos para o ensino de ciências/física, apresentados no capítulo de introdução, esta tese investigou o seguinte problema de pesquisa: *Que contribuições um extenso estudo da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, fundamentado na epistemologia da solução de problemas de Larry Laudan, pode fornecer para o ensino de ciências/física e ao pensamento crítico sobre a natureza da ciência?*

Na busca por uma resposta a esse problema, o objetivo geral desta tese perpassou, então, por: *Investigar possíveis contribuições para o ensino de ciências/física e para o pensamento crítico sobre a natureza da ciência, promovidas por um amplo estudo da história conceitual da astronomia da cosmologia e da física, fundamentado na epistemologia da solução de problemas de Laudan* –, especialmente, acerca da necessidade de ressignificação dos conteúdos científicos dessas três áreas da ciência; da importância do desenvolvimento de estratégias de ensino, como alternativas complementares para o campo investigativo da resolução de problemas; e da promoção do pensamento crítico sobre a temática natureza da ciência no currículo e na sala de aula de ciências/física. Em vista disso, esse objetivo geral foi desdobrado em outros seis objetivos específicos, que serão individualmente apresentados – *não necessariamente na ordem em que foram inicialmente enunciados* – para mostrar como cada um deles foi alcançado e como esse alcance, em conjunto, apresenta uma resposta para o problema de pesquisa investigado.

Contudo, antes de retomar os objetivos específicos, é importante destacar alguns aspectos inerentes à problemática de pesquisa, especialmente, ligados à *abordagem contextualista*, que foram contemplados ao longo desta tese, bem como sustentaram os pressupostos da mesma. E que, certamente, serão ressaltados durante a argumentação em torno desses objetivos.

Sobre esses aspectos, destacaram-se: (i) *a ideia de poder tornar as aulas de ciências/física mais desafiadoras e reflexivas*; (ii) *de fornecer contribuições didáticas alternativas, para o campo investigativo da resolução de problemas*; (iii) *contextualizar o dinâmico processo de construção, comunicação e validação do conhecimento científico*; e (iv) *evidenciar os diversos fatores extra científicos inerentes à ciência como uma atividade intrinsecamente humana, particularmente, acerca das influências culturais, econômicas, filosóficas, políticas, tecnológicas, sociais e até religiosas, que marcaram a prática e o*

*pensamento científico ocidental*, no longo contexto histórico investigado. Juntamente com esses *fatores extra científicos*, estão os *fatores internos*, isto é, *dos conteúdos da ciência*, que sob a lente da solução de problemas laudanianos, foram devidamente contextualizados e ressignificados.

Em conformidade com esses aspectos, também foram tomados como referência – em relação às dificuldades teóricas e metodológicas das pesquisas que fazem uso do aporte epistemológico da história e filosofia da ciência –, a importância de: (v) *contribuir para suprir a carência de recursos didáticos bem fundamentados pela história e filosofia da ciência*; (vi) *preocupar-se com a formação de professores e professoras e futuros/as cientistas de ciências/física, mediante a construção de saberes relativos às áreas da história e filosofia da ciência*; e (vii) *atentar para o alinhamento teórico e metodológico que deve estruturar as pesquisas em ensino de ciências, especialmente, a partir de seus fundamentos epistemológicos, didáticos e educacionais* – que são tão carentes na maior parte das pesquisas (MOREIRA, 2004; TEIXEIRA; GRECA; FREIRE JR, 2012; DAMÁSIO; PEDUZZI, 2017).

Nessa direção, o primeiro objetivo específico perpassou por: **(1) Apresentar os principais conceitos e pressupostos epistemológicos laudanianos, que vê a ciência como uma atividade de solução de problemas, juntamente com suas contribuições para o ensino de ciências/física, no contexto brasileiro.** Esse objetivo foi alcançado com o desenvolvimento do segundo capítulo desta tese.

Nesse segundo capítulo, inicialmente, foram apresentados os principais fundamentos que sustentam os pressupostos da visão epistemológica de Larry Laudan, cujos destaques incluíram sete aspectos. Primeiro, *a ciência é um empreendimento socialmente coletivo, não uma atividade individual e elitista*. Segundo, *as perguntas estão no foco do pensamento científico*. Terceiro, *o progresso cognitivo da ciência está ligado à solução de perguntas importantes*. Quarto, *não é produtivo analisar o dinâmico processo de produção, comunicação e validação do conhecimento científico, especialmente, a aceitação de uma teoria e/ou modelo, por critérios tradicionais, por exemplo, de verdadeiro ou falso, da filosofia positivista lógica*. Quinto, *a ciência progride, exclusivamente, por fazer escolhas racionais, em termos das teorias que resolvem mais problemas, não em função de ser totalmente racional*. Sexto, *as soluções dos problemas conceituais externos, metodológicos e da visão de mundo, são as mais importantes para o crescimento cognitivo da ciência*. Sétimo, *para vislumbrar uma imagem de ciência, substantivamente, diferente da positivista lógica, é fundamental compreender seus problemas, as relações entre esses problemas e a elaboração*

e aceitação dos modelos e das teorias científicas, como também o próprio progresso cognitivo da ciência. A partir desses pressupostos laudanianos, é possível contribuir com um ensino-aprendizagem preocupado com as visões distorcidas sobre a natureza da ciência, que permeiam o imaginário social e as concepções epistemológicas de professores/as e estudantes, em todos os níveis de ensino (GIL PÉREZ, et al., 2001; DINIZ; REZENDE Jr., 2017).

Em seguida, foram elencados os conceitos de *problemas empíricos* e *problemas conceituais*, bem como de suas subclassificações – problemas empíricos anômalos, não resolvidos, resolvidos; problemas conceituais internos e conceituais externos intracientíficos, metodológicos e de visão de mundo – juntamente com alguns importantes episódios da história da ciência, que os exemplificaram. Exemplos que permitiram, dentro do âmbito da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, estabelecer um ponto de partida – isto é, a partir da importância dos dados observacionais babilônicos herdados pelos gregos – e um ponto de chegada, a teoria da gravitação universal newtoniana –, atentando-se para os aspectos historiográficos implicados nesse amplo limite temporal investigado. Além desses conceitos, foi destacado que a origem desses problemas laudanianos, por estar marcada por compromissos metodológicos e ontológicos pertencentes a cada contexto histórico investigativo, encontra-se no foco de interesse da *tradição de pesquisa*. Isto é, um conjunto de afirmações e/ou negações metodológicas e ontológicas, que estabelecem as diretrizes, isto é, as regras metodológicas, objetivos e metas da ciência, visando à solução de problemas através da elaboração de teorias específicas.

No âmbito desta tese, **esse** conceito laudariano permitiu situar, em um primeiro momento dessa investigação, a **tradição de pesquisa grega antiga**, cujas regras metodológicas e os compromissos ontológicos estiveram ligados ao conhecido termo, “salvar as aparências dos fenômenos celestes” (DUHEM, 1958; AITON, 1981; KOESTLER, 1989; KUHN, 1990; ÉVORA, 1993; KOYRÉ, 2006; GINGERICH, 2008). Em outras palavras, esse termo se materializou teórico e metodologicamente, na procura por uma explicação para os fenômenos celestes – classificados como problemas empíricos astronômicos e cosmológicos: o ordenamento dos planetas; o diâmetro aparente da Lua; o brilho aparente dos planetas internos Mercúrio e Vênus; o movimento de retrogradação dos planetas; e as distâncias das órbitas dos planetas –, mediante a elaboração de modelos cosmológicos e de teorias planetárias, que respeitavam o uso do movimento circular uniforme para descrever cinematicamente esses fenômenos, sem se preocupar com suas causas físicas.

Em um segundo momento, isto é, no contexto europeu medieval e renascentista, foi possível situar o surgimento de uma nova **tradição de pesquisa europeia**, cujo rompimento com as regras e os compromissos da tradição grega antiga, ocorreu, por assim dizer, especialmente, com os trabalhos de Johannes Kepler. Este astrônomo procurou compreender as causas físicas do movimento dos planetas, em uma direção tal que, de um lado, culminou no nascimento de uma nova astronomia e/ou astrofísica e; de outro, inspirou seus sucessores, no século XVII, especialmente, Isaac Newton, em seu processo investigativo para a concepção da teoria da gravitação universal.

Não obstante, no que diz respeito às contribuições da visão de ciência de Laudan, para o ensino de ciências e de física, ainda no segundo capítulo, foi possível elencar na literatura, como os/as diversos/as autores/as têm operacionalizado as concepções deste filósofo, desde o início da década de 1990 (BATISTA; PEDUZZI, 2019). Particularmente, esses/as autores/as visaram: *o aperfeiçoamento dos modelos de ensino-aprendizagem e guia da prática docente; a produção de analogias entre alguns aspectos da atividade científica e da atividade estudantil; a compreensão das concepções epistemológicas estudantis; a discussão teórica com outros epistemólogos, a fim de alicerçar as investigações no ensino de ciências; e, por fim, a exploração de episódios da história da ciência*, para com a qual esta tese está visando contribuir, de modo especial, devido ao ínfimo número de trabalhos com esse foco, no contexto brasileiro, fundamentado pela epistemologia de Laudan (OSTERMANN; CAVALCANTI; RICCI; PRADO, 2008; CORDEIRO; PEDUZZI, 2016; BATISTA; PEDUZZI, 2020).

Com a convicção da importância desses conceitos e pressupostos laudanianos para a ressignificação das estratégias de ensino, em relação aos pontos: *(i) a ideia de poder tornar as aulas de ciências/física mais desafiadoras e reflexivas; (ii) poder fornecer contribuições alternativas complementares ao campo investigativo da resolução de problemas; e (vii) atentar para o alinhamento teórico e metodológico que deve estruturar as pesquisas em ensino de ciências, a partir de seus fundamentos epistemológicos, didáticos e educacionais* – é importante destacar como o segundo objetivo específico atentou para esses aspectos: **(2) Situar a importância da pergunta no ensino de ciências/física, em vista da construção de um alinhamento epistemológico, didático e educacional, que fundamente uma proposta de ensino para o campo investigativo da resolução de problemas.**

Em função disso, o conteúdo do terceiro capítulo objetivou proporcionar ao leitor um panorama histórico e geral sobre a importância didática e educacional da pergunta, no ensino

de ciências e de física, em âmbito nacional e estrangeiro, juntamente com o referencial educacional – A Taxonomia dos objetivos educacionais de David Bloom, original e revisada – que auxiliou na fundamentação e orientação da elaboração da unidade de ensino (capítulo anterior). Essa apresentação contemplou o quarto objetivo específico: **(4) Elaborar e propor uma unidade de ensino focada na história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, amparada pela epistemologia da solução de problemas laudanianos, para ser implementada em aulas de graduação de disciplinas abertas à discussão de conteúdos informados pela história conceitual e filosofia da ciência** –, antecipado, aqui, para complementar os argumentos em torno do segundo objetivo.

Não obstante, no início do terceiro capítulo, destacou-se que esse alinhamento epistemológico, didático e educacional encontra-se alicerçado pelo eixo do domínio cognitivo, em detrimento dos dois outros eixos existentes, o afetivo e o psicomotor. A partir disso, considerando os *vértices de um triângulo equilátero metafórico*, foi possível enxergar, respectivamente, no **vértice epistemológico**, a visão de ciência de Laudan, marcada pela análise psicológica, em função da ideia de um progresso científico cognitivo ligado às aspirações intelectuais da ciência – solução de problemas mediante a elaboração de teorias. No **vértice educacional**, os objetivos educacionais da Taxonomia de Bloom, isto é, de ações verbais ligadas ao ato do sujeito cognoscente, em relação à capacidade de, no geral: *conhecer, entender, aplicar, analisar, criar/sintetizar e avaliar* questões do conteúdo instrucional, cuja principal função é servir como parâmetro para orientar a avaliação da aprendizagem, a partir do ideal educativo epistêmico do desenvolvimento cognitivo estudantil e da promoção do pensamento crítico do sujeito. E, por fim, no **vértice didático**, um conjunto de estudos sobre a importância da pergunta, no processo de ensino-aprendizagem, que coaduna com esse ideal educativo epistêmico.

Com a segurança desse alinhamento, ao longo do terceiro capítulo e na apresentação da unidade de ensino (capítulo onze), foi possível destacar de que maneira a função didática da pergunta, como elemento chave do processo de ensino-aprendizagem e objeto principal das estratégias de ensino, *pode tornar as aulas de ciências/física mais desafiadoras e reflexivas*. Nesse sentido, mostrou-se que as estratégias que focam nas perguntas dos/as estudantes e dos/as professores/as, bem como que procuram desenvolver atividades de elaboração, resposta e avaliação dessas perguntas, oferecem condições para a promoção do pensamento crítico em sala de aula.

Nessa direção, essas estratégias podem: (a) *fomentar o monitoramento e a auto avaliação estudantil acerca da compreensão dos conteúdos de ensino*; (b) *fornecer informações de diagnósticos sobre os processos de pensamento, motivação e interesse dos/as estudantes pelos conteúdos*; (c) *conscientizar os/as estudantes sobre suas dificuldades de leitura e interpretação de texto, procedimentos para a resolução de problemas/exercícios a lápis e papel, roteiro de atividades experimentais*; (d) *estimular o protagonismo estudantil na construção dos conhecimentos escolares, para o serviço da vida*; e (e) *desenvolver a criatividade do pensamento e de atitudes, visando despertar o espírito científico investigativo em cada estudante, dentro e fora da sala de aula*.

Diante dessas importantes possibilidades, a unidade de ensino, elaborada para *ser implementada em aulas de graduação de disciplinas abertas à discussão de conteúdos informados pela história conceitual e filosofia da ciência*, pode ser considerada uma proposta fundamental para a formação inicial de professores e professoras de física e de futuros/as cientistas. Incluindo, a possibilidade de ser também implementada em outros cursos afins, isto é, das ciências da natureza ou da própria astronomia, devido o rico conteúdo histórico conceitual vinculado a essas áreas, que, academicamente, tem se institucionalizado de modo independente da física.

Para a formação inicial de professores e professoras de física, **em primeiro lugar**, a unidade de ensino pode proporcionar experiências, em sala de aula, que fomentam significativamente a ideia formativa do sugestivo livro dos educadores Freire e Fagundes (1985) – *Por uma pedagogia da Pergunta*. Pois permite, claramente, por exemplo, em uma disciplina de final de curso – como *Evolução dos Conceitos da Física*, oferecida na oitava e nona fase dos cursos de graduação, respectivamente, bacharelado e licenciatura, da Universidade Federal de Santa Catarina<sup>30</sup> – que os/as estudantes possam experimentar, de maneira crítica e reflexiva, “(...) viver a pergunta, viver a indagação, viver a curiosidade” (FREIRE Paulo; FAGUNDES, 1985, p. 25), mediante a leitura e discussão dos textos didáticos da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, pela importante epistemologia da solução de problemas de Laudan. E com essa instrumentalização, posteriormente, consigam, de algum modo, testemunhar e compartilhar essa vivência com seus/as futuros/as alunos/as. Em outras palavras, na prática, ir criando com eles/elas o hábito,

---

<sup>30</sup>Espaço em que a unidade ensino estava sendo implementada, até o momento da paralisação das atividades acadêmicas dessa instituição ser decretada (17 de março de 2020), devido à pandemia causada pelo vírus da Covid-19.

como virtude, de perguntar, de “espantar-se”, durante o processo educativo que participam como protagonistas (FREIRE Paulo; FAGUNDES, 1985).

**Em segundo lugar**, essa unidade de ensino também se mostra de grande relevância para que os/as futuros/as professores/as de física construam o *saber docente* relativo ao conteúdo da história e filosofia da ciência. Em vista de transmitir uma imagem de ciência, aos/as seus/as estudantes, coerente com as visões epistemológicas contemporâneas *não positivista lógica*. Bem como poder trabalhar com os saberes da natureza da ciência, isto é, *saberes metacientíficos*, que enriquecem e dão significados ao dinâmico, complexo e contínuo funcionamento da ciência e da produção, comunicação e validação dos conhecimentos científicos, ao longo da história.

Do mesmo modo, **em terceiro lugar**, para os/as futuros/as cientistas na área de física (alunos/as do bacharelado dessa mesma disciplina), essa experiência é inegavelmente válida. Isso porque, esses/as estudantes podem desfrutar, durante a sua formação, de uma compreensão dos conteúdos da ciência, que estudam e investigam (na iniciação científica), de um modo diferente e mais rico. Isto é, em um sentido complementar a incansável atividade/tarefa de resolução de problemas/exercícios a lápis e papel, deduções de fórmulas e equações, em todas as disciplinas básicas de física que assistem ao longo do curso. Segundo Pietrocola (2002), a ênfase dada à linguagem matemática é tão forte (funções, equações, gráficos, vetores, tensores, inequações, geometrias, entre outros) nas fases iniciais dos cursos de física (bacharelado e licenciatura), que “apenas pela estruturação curricular é, muitas vezes, difícil saber se se trata de um legítimo curso de Física!” (Ibid., p. 90). Ademais, para boa parte dos/as estudantes ingressantes em tais cursos, a desmotivação é fomentada pela “pouca ênfase no conhecimento que elegeram como formação profissional” (Idem).

Observando essas colocações, para um contexto em que a unidade de ensino seja implementada no início da graduação em física, tem-se disciplinas semelhantes à pontuada, por exemplo, *Evolução das ideias da Física*<sup>31</sup>, ou até mesmo de Física Básica (I ou II), que contempla os conteúdos de mecânica por uma *abordagem contextualista da ciência* (TEIXEIRA, FREIRE JR; EL-HANI, 2009). De acordo com Teixeira, Freire Jr e El-Hani (2009, p. 548), de um modo geral, a *abordagem contextualista*, pela perspectiva da história e filosofia da ciência, “usada no ensino sobre Mecânica Clássica” parece influenciar o amadurecimento dos/as estudantes “acerca dos aspectos da natureza da ciência abordados”.

---

<sup>31</sup>Disciplina oferecida no terceiro semestre da Universidade Estadual de Santa Cruz – Ilhéus-BA – instituição de formação inicial e continuada do autor desta tese.

Em particular, esses autores concluem que, sobre as “concepções empírico-indutivista” e o “mito do método científico universal”, os/as estudantes apresentaram ao final da pesquisa: “maior diversificação nas visões sobre os métodos científicos e sobre o papel do experimento na ciência” (Idem); uma “superação significativa da visão realista ingênua” (Idem); e um “maior entendimento acerca da natureza conjectural da ciência e da influência de fatores sociais na produção científica” (Idem).

Portanto, a partir do conteúdo histórico conceitual trabalhado na unidade de ensino, os/as estudantes de (bacharelado e licenciatura) podem ser estimulados a vivenciar uma experiência diferente da apontada por Pietrocola (2002). E, mais que isso, com esse amadurecimento constatado por (TEIXEIRA, FREIRE JR; EL-HANI, 2009), eles/elas podem executar as atividades da unidade e, com isso, construir reflexões importantes sobre o desenvolvimento conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, em vista de serem beneficiados com um significativo arcabouço conceitual, histórico e filosófico sobre a área que elegeram como profissão. Nesse sentido, podem também despertar uma atitude mais crítica e reflexiva, em relação à importância desses arcabouços, para se desenvolver progressivamente, no curso, frente à execução das atividades/tarefas já mencionadas.

Da mesma forma, para o caso em que a unidade de ensino seja implementada em um curso de astronomia, os/as futuros/as astrônomos/as terão a oportunidade de, também, construir esse arcabouço conceitual, histórico e filosófico sobre sua área profissional. Com isso, vislumbrar uma visão mais contextualizada acerca dos problemas astronômicos, cosmológicos e físicos, que fomentaram o desenvolvimento das teorias planetárias e dos modelos cosmológicos, desde a Grécia Antiga, até a teoria da gravitação universal newtoniana. Além disso, esses/as estudantes podem observar, criticamente, com a lente da solução de problemas, que a astronomia, a cosmologia e a física, mesmo que institucionalmente ofereçam modos de profissionalização particulares – cursos de graduação, pós-graduação e associações científicas independentes – estão historicamente interligadas pelas perguntas que ocuparam o foco do pensamento científico ocidental, ao longo dessa narrativa histórica. Adjacente a isso, é importante destacar as possíveis reflexões sobre a natureza da ciência, que tanto esses/as estudantes quanto os/as de física, no início da graduação, podem ser convidados a realizar durante as discussões dos conteúdos da unidade de ensino.

Em conformidade, na consecução das contribuições desta tese, o terceiro objetivo específico perpassou por: **(3) Explorar a história conceitual da astronomia, da cosmologia**

**e da física mediante a operacionalização dos conceitos e pressupostos epistemológicos da solução de problemas de Laudan.** Por sua vez, ele foi alcançado com os desenvolvimentos dos seis seguintes capítulos, do quarto ao décimo. Nessa direção, observado o que já foi exposto até aqui, cabe ressaltar também: *a importância dos conceitos e pressupostos laudanianos para a ressignificação dos conteúdos científicos da astronomia, da cosmologia e da física; e a promoção do pensamento crítico sobre a natureza da ciência*, amparada pela *relevância epistemológica* de alguns *saberes metacientíficos* apropriadamente vinculados aos contextos científicos investigativos dessas áreas da ciência.

Nesse sentido, as contribuições da tese para com *a ressignificação dos conteúdos científicos* perpassam, nesses capítulos, por mostrar como é possível *contextualizar* os diversos assuntos/temas referendados pelos documentos oficiais da educação brasileira e pela a literatura da área, como imprescindíveis para *a compreensão estudantil da relação Terra-Universo*. Esses assuntos são: o sistema solar, o planeta Terra, o movimento de rotação terrestre, os fenômenos do dia e a da noite, o movimento de translação dos planetas, as estações do ano, os modelos cosmológicos geocêntricos e heliocêntricos, a confecção de calendários, o relógio solar, as fases da Lua, a esfera celeste, as constelações, as distâncias entre os corpos celestes, a gravidade e as galáxias (MEDEIROS Geneci, 2005; BRASIL, 2018; LANGHI; NARDI, 2007; LAMEU; LANGHI, 2018; MICHA, 2018).

De acordo com a Base Nacional Comum Curricular, por exemplo, a compreensão da relação Terra-Universo deve ser a porta de entrada para os/as estudantes desenvolverem competências e habilidades, para “interpretar leis, teorias e modelos, aplicando-os na resolução de problemas individuais, sociais e ambientais” (BRASIL, 2018, p. 548). Além disso, esse documento reafirma que essa *contextualização*, promovida pela *história da ciência*, tem implicação direta na valorização estudantil dos conteúdos científicos e no reconhecimento de suas aplicações práticas “nos projetos de vida, no mundo do trabalho e no enfrentamento de questões de consumo, energia, segurança, ambiente, saúde, entre outras” (Ibid., p. 549).

Diante da importante função desses assuntos/temas, a contribuição desta tese fica ainda mais evidente, pois proporciona a *contextualização histórica conceitual* dos mesmos, especialmente, na formação inicial de professores/as de ciências/física. Ela fornece subsídios didáticos (a unidade de ensino, suas atividades/tarefas e um conjunto de perguntas de referência para a discussão dos textos) que, certamente, poderão auxiliar os/as futuros/as professores/as na preparação da abordagem desses conteúdos em sala de aula. Como também

permite que os/as professores/as possam sanar suas concepções de senso comum sobre os fenômenos celestes abordados. Posto que, segundo as pesquisas, tais concepções são pertinentes e abundantes entre professores e estudantes da educação básica, ensino médio e fundamental (LANGHI; NARDI, 2007; MICHA, 2018).

Desta forma, ao longo dos seis capítulos, os conceitos de problemas empíricos, problemas conceituais internos e externos e de tradição de pesquisa, foram fundamentais para essa contextualização histórica conceitual. Esses conceitos fornecem condições para que os/as futuros/as professores/as de ciências/física possam entender a razão de existir desses conteúdos no currículo escolar; conhecer e analisar o dinâmico processo interno de funcionamento da ciência, a partir da observação e compreensão de como acontecem as **grandes mudanças metodológicas** – especialmente, da abordagem descritiva e cinemática dos problemas científicos, no amplo contexto investigativo grego, desde Pitágoras à Ptolomeu, perpassando o contexto europeu, de Copérnico à Tycho Brahe; para uma abordagem dinâmica e causal, com Kepler, Newton, Hooke –; e **as mudanças ontológicas**, por exemplo, das ideias lógico-verbais aristotélicas, seus conceitos de matéria e movimento, e leis de movimento (circular e retilíneo), bem como sua visão de mundo estruturada e aceita por mais de dois mil anos, até o momento do século XVII; para a concepção de novos conceitos (movimento, repouso, matéria, força, espaço, tempo, velocidade, aceleração), das leis de Kepler, e das leis de Newton, que, no conjunto dos construtos fornecidos pelos trabalhos de Copérnico, Tycho Brahe, Bruno, Galileu, Descartes, Hooke, dentre outros, alicerçaram a ciência moderna, no século XVII, e uma nova visão de mundo cognitivamente distinta da visão herdada dos gregos antigos.

Nesse sentido, esses/as futuro/as professores/as podem, acima de tudo, compreender criticamente o significado da solução de problemas para o desenvolvimento do pensamento científico ocidental. Com isso, construir um arcabouço dessa história conceitual, para ensinar seus/as estudantes a interpretar a função dos conceitos, leis, modelos, teorias e princípios científicos: instrumentos intelectuais da ciência e/ou produtos forjados e operacionalizados pelo pensamento científico, ao longo dos processos históricos investigativos. Processos, esses, que marcam um contínuo e revolucionário empreendimento científico, o qual, dentre outras coisas, visa alcançar o progresso em diferentes perspectivas (cognitivo, interno, externo, material, social, e afins).

Da mesma forma, no que cabe à *promoção do pensamento crítico sobre a natureza da ciência*, ao longo desses seis capítulos, também foi possível construir *vinte e um vínculos*

*epistemológicos* com muitos dos importantes aspectos, características, princípios da natureza da ciência, apresentados na introdução desta tese, que coadunaram com a narrativa histórico-conceitual da solução de problemas. Por sua vez, esses *vínculos epistemológicos* podem contribuir com a promoção do pensamento crítico sobre essa temática, justamente porque é possível mostrar, pela própria história da ciência, a possibilidade de abordar esses *saberes metacientíficos*, em sala de aula – na formação de professores e na educação básica –, a partir da *relevância epistemológica* que possuem para construir uma imagem de ciência mais abrangente. Isto é, como uma atividade humana que incorpora interna e externamente múltiplos aspectos objetivos, subjetivos, controversos, culturais, filosóficos, metafísicos, políticos, econômicos, sociais, religiosos, ambientais, dentre outros, inerentes à pessoa (cientistas, pensadores, investigadores) e às relações humanas.

Nesse sentido, dentre os diversos *saberes metacientíficos*, apresentados na introdução desta tese e outros não diretamente citados, destacaram-se muitos: (i) *A fé da ciência na suscetibilidade do universo físico ao ordenamento humano*; (ii) *A força motriz fundamental na ciência é a curiosidade em relação ao universo físico*; (iii) *A crença da ciência, isto é, do pensamento científico, de que a natureza pode ser matematizada, visto a ênfase dada à linguagem matemática como instrumento intelectual mais preciso de estabelecer relações*; (iv) *O papel da intuição como um elemento racional da construção de conhecimento científico, refletido no senso da beleza matemática, da harmonia dos números, formas e da elegância geométrica*; (v) *As ideias científicas afetam e são afetadas por seu meio histórico e social*; (vi) *O papel das teorias na ciência como uma tentativa de descrever, explicar e prever os fenômenos naturais*; (vii) *O papel da criatividade dos pensadores/investigadores/cientistas na proposição das teorias*; (viii) *A ideia de que não há ciência onde não há teoria, posto que a formulação do saber teórico é uma exigência intelectual da própria ciência*; (ix) *A ideia de que a ciência é parte integrante das tradições culturais e sociais*; (x) *A existência da pluralidade metodológica na ciência, em detrimento de um único método científico universal, refletida na existência de correntes de pensamento divergentes sobre a produção de conhecimento científico*; (xi) *Leis, modelos e teorias científicas são elaborações do intelecto humano. Não são meras sínteses indutivas do observado, do experimentado. Os dados per se, não geram teorias*; (xii) *As disputas teóricas pela hegemonia do conhecimento envolvem tanto elementos de natureza interna quanto externa à ciência, denotando complexidade e sutileza dos mecanismos presentes na aceitação de um novo conhecimento científico e/ou uma nova visão de mundo*; (xiii) *As concepções filosóficas, religiosas, culturais, sociais em*

*que a ciência é desenvolvida influenciam profundamente o trabalho dos investigadores desde tempos remotos; (xiv) As conjecturas teóricas não são definitivas e irrevogáveis, mas um objeto constante de revisão, por isso, o pensamento científico se modifica com o tempo; (xv) Alguns conceitos estão profundamente fundidos nas concepções teóricas, que muitos estudiosos têm dificuldades cognitivas de abandoná-los; (xvi) Os fatores extra científicos, ao lado dos fatores intracientíficos, desempenham um papel fundamental no desenvolvimento da ciência; e, por fim, (xvii) O conhecimento científico depende fortemente, mas não inteiramente, da observação, evidência experimental, argumentos racionais e ceticismo; (xviii) A experimentação não tem apenas o papel de corroborar ou de refutar teorias em sua forma final. Ela é parte integrante e essencial do processo de construção do conhecimento, que envolve o diálogo entre as expectativas e convicções teóricas do investigador e as observações que ele realiza; (xix) A dinâmica da produção de conhecimentos na ciência mostra um processo vivo, criativo, polêmico, questionador, argumentativo. Essa realidade contrasta com a falsa imagem de uma ciência que se apresenta como um corpo árido de fatos e conclusões; (xx) a ciência (o empreendimento científico) é uma construção coletiva; o esquecimento ou mesmo o anonimato de muitos de seus personagens é injustificável; (xxi) Experimentos de pensamento mostram o valor essencial das conjecturas pré-observacionais, dos conhecimentos e das convicções teóricas do sujeito na investigação científica.*

Em conformidade com os vínculos epistemológicos entre saberes e a história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, a promoção do pensamento crítico sobre a natureza da ciência perpassa, então, nesta tese, por afirmar o que se segue. A saber, frente às perguntas abertas – *Por que ensinar? O que ensinar? Como ensinar sobre a natureza da ciência?* – e ao sugestivo título do trabalho da autora Paula Mendonça (2020) – *De que Conhecimento sobre a Natureza da Ciência Estamos Falando?* – é possível reconhecer, pela história da ciência, a importância de todos os saberes metacientíficos apresentados pela literatura para o currículo de ciências, independente da orientação teórica e/ou metodológica que instrumentalizou suas formulações (KIMBALL, 1967; DRIVER et al., 1996; ABD-EL-KHALICK; BELL; LEDERMAN, 1998; MCCOMAS; ALMAZORA; CLOUGH, 1998; MCCOMAS; OLSON, 1998; GIL-PÉREZ et al., 2001; LEDERMAN et al., 2002; IRZIK; NOLA, 2011; PEDUZZI; RAICIK, 2020).

Destarte, isso não significa dizer que *“tudo vale”* para o currículo de ciências. Mas, pelo contrário, se esses saberes forem aceitos como parte da *sabedoria compartilhada* pelas pesquisas no ensino (MOURA, 2014), nenhuma orientação será considerada como superior às

demais (VIDEIRA, 2007). Haja vista que é a existência da pluralidade teórica e/ou metodológica na produção de conhecimento científico, realista, instrumentalista, empirista, construtivista, feminista, multiculturalista, pós-modernista, que enriquece as diferentes interpretações sobre a complexidade da ciência, da atividade científica e, acima de tudo, mantém a pergunta fundamental, *O que é ciência afinal?* (CHALMERS, 1993), que alimenta e enobrece a razão de existir da temática natureza da ciência no currículo, em todos os níveis de ensino.

Em conformidade, ao se pensar, a partir desta tese – *Por que ensinar sobre a natureza da ciência?* –, a resposta é encontrada no próprio *ideal educativo* observado pela *abordagem contextualista* perseguido, aqui. Isto é, à promoção do pensamento crítico de professores e estudantes, acerca dos significados dos conteúdos científicos, das estratégias de ensino e do *modus operandi da ciência* – especialmente, o da solução de problemas – que influencia e é influenciado pelos contextos culturais e sociais, ao longo da história humana. Da mesma forma, ao se pensar na pergunta – *O que ensinar sobre a natureza da ciência?* – a resposta desta tese é dada em face do reconhecimento da importância de todos os *saberes metacientíficos* fornecidos pela literatura, sem discriminação ou preconceito com esta ou aquela orientação teórica e/ou metodológica.

Por fim, para a pergunta – *Como ensinar sobre a natureza da ciência?* – defende-se que todas as alternativas metodológicas são válidas, quando fomentam a promoção do pensamento crítico de professores e estudantes, dentro ou fora da sala de aula. Portanto, desde a transformação das declarações desses *saberes metacientíficos* em perguntas, para que possam ser investigadas (CLOUGH, 2008; MARTINS, 2015); até a classificação dos saberes, como aspectos, características, princípios da natureza da ciência, devido à orientação teórica e/ou metodológica que a sustenta. Contudo, observando a pertinência do trabalho de Peduzzi e Raicik (2020), é importante afirmar que, independente da forma de ensinar esses saberes, a história da ciência pode contribuir significativamente para isso! Nesse sentido, aproveita-se para enfatizar que a lente epistemológica da solução de problemas de Larry Laudan tem muito potencial para auxiliar no ensino da temática natureza da ciência.

Por exemplo, com essa orientação histórico-filosófica foi possível evitar que as ideias-chave, isto é, os *saberes sobre a natureza da ciência* “fossem facilmente distorcidos” (CLOUGH, 2008, p. 31), justamente porque seus *vínculos epistemológicos* com a história da ciência não foram forçados. Pelo contrário, eles coadunaram com a narrativa histórica da astronomia, da cosmologia e da física, ao longo dos capítulos nucleares desta tese.

De mesmo modo, mediante esses vínculos, foi possível perceber que, pela visão crítica da história da ciência, a *relevância epistemológica* acerca do *saber metacientífico* que preconiza que a ciência tem um caráter fundamentalmente experimental, *mas ignora o caráter duradouro do conhecimento científico, bem fundamentado* (CLOUGH, 2008, p. 31), encontra-se apenas no contexto da ciência moderna do século XVII. Em outras palavras, ele não pode ser ensinado e/ou investigado com um saber que reflete uma ideia geral da ciência ocidental, representada, aqui, pela astronomia, cosmologia e física, originada na Grécia Antiga (AABOE, 1958; KOYRÉ, 1982; KUHN, 1990; PEDERSEN, 1993; NIETZSCHE, 2011).

Em contrapartida, é possível afirmar que os *dezessete saberes*, vinculados epistemologicamente, nesta tese, perpassam os contextos históricos investigativos e evoluem ou se modificam com o tempo (IRZIK; NOLA, 2011) e outros – como o caráter experimental da ciência e do conhecimento científico, bem como dos critérios de cientificidade – dependem de cada contexto (LEDERMAN et al., 2002; IRZIK; NOLA, 2011; MATTHEWS, 2012). Por conseguinte, pela história e filosofia da ciência, é sempre possível demonstrar também que a ciência tem história, especialmente, uma conceitual de solução de problemas. Dentre outras coisas, essa história permitiu analisar profundamente o dinâmico e complexo processo de produção, comunicação e validação do conhecimento científico, desde a Grécia Antiga à teoria da gravitação universal newtoniana.

Não obstante, em conformidade com o terceiro e o quarto objetivos específicos, o quinto residiu em: **(5) Estruturar um conjunto de textos didáticos focados na história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, sob a ótica da epistemologia de Laudan, para subsidiar a implementação da unidade de ensino.** Contudo, é importante destacar que esses textos, apesar de não terem sido anexados em conjunto com o plano de aulas da unidade de ensino – uma extensão volumosa desnecessária ao leitor, tendo em vista a repetição dos conteúdos encontrados nos capítulos –, seus títulos, apresentados a seguir, dão acesso a esses conteúdos, justamente por demarcar claramente, na unidade de ensino, os temas das aulas e os distintos contextos investigativos, grego antigo e europeu medieval e renascentista.

Nessa direção, os sete primeiros textos, abordados a partir da Aula 2, na unidade de ensino, são: **Texto I.** *Dos babilônios aos compromissos metodológicos e ontológicos da tradição de pesquisa grega antiga: da origem dos problemas empíricos aos modelos cosmológicos de Pitágoras de Samos e Filolau de Crotona;* **Texto II.** *A cosmologia de Platão e a sistematização dos principais problemas empíricos astronômicos da tradição de pesquisa*

grega antiga; **Texto III.** *A origem dos problemas conceituais internos implicados na teoria planetária das esferas concêntricas de Eudoxo de Cnido*; **Texto IV.** *A origem dos problemas conceituais externos implicados na visão de mundo e na malha conceitual aristotélica*; **Texto V.** *As cosmologias de Heráclides de Ponto e Aristarco de Samos e a medida da esfericidade da Terra por Eratóstenes de Cirene*; **Texto VI.** *A teoria planetária de Apolônio de Perga e as contribuições astronômicas de Hiparco de Nicéia*; **Texto VII.** *As teorias planetárias de Ptolomeu e suas explicações astronômicas dos problemas empíricos.*

Em conformidade, os oito textos seguintes, abordados a partir da Aula 11, são: **Texto VIII.** *Os debates astronômicos, cosmológicos e físicos nos antecedentes medievais ao advento da astronomia copernicana*; **Texto IX.** *As influências dos fatores extra e intracientíficos implicadas no advento da astronomia copernicana*; **Texto X.** *A natureza das perguntas nas críticas ao sistema astronômico copernicano*; **Texto XI.** *As defesas mais proeminentes das ideias copernicanas e suas implicações astronômicas, cosmológicas e físicas*; **Texto XII.** *As contribuições de Galileu para a constituição de uma nova física*; **Texto XIII.** *Johannes Kepler e a constituição de uma nova astronomia*; **Texto XIV.** *A explicação mecânica da gravidade por René Descartes e os problemas empíricos e conceituais na gênese da gravitação universal newtoniana*; e o **Texto XV.** *A teoria da gravitação universal newtoniana e o estabelecimento da nova tradição de pesquisa europeia do século XVII.*

Por fim, para o sexto objetivo específico: **(6) Discorrer sobre as possíveis contribuições para o ensino de ciências/física e para o pensamento crítico sobre a natureza da ciência, promovidas por um estudo da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, fundamentado pela epistemologia da solução de problemas de Larry Laudan** – é possível afirmar que o mesmo foi atingido através do alcance dos outros cinco objetivos, porém é importante destacar que a materialização desse alcance, de modo pleno, nesta tese, perpassa ainda por investigar, em um futuro próximo, as potencialidades de suas contribuições no campo prático da sala de aula.

Contudo, para no campo teórico, no qual esta tese ficou restrita, ao retomar o problema de pesquisa investigado – *Que contribuições um extenso estudo da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, fundamentado na epistemologia da solução de problemas de Larry Laudan, pode fornecer para o ensino de ciências/física e ao pensamento crítico sobre a natureza da ciência?* –, e observar os argumentos apresentados em cada objetivo alcançado, esta tese conclui que: **o estudo da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, fundamentado na epistemologia da solução de**

**problemas de Larry Laudan é um dos caminhos profícuos para uso didático da história e filosofia da ciência.**

Esse estudo enseja importantes contribuições para: a necessária ressignificação *dos conteúdos científicos da astronomia, da cosmologia e da física*; o desenvolvimento de uma estratégia de ensino, como uma alternativa complementar ao campo investigativo da resolução de problemas, que valoriza e coloca no foco da instrução didática, as atividades de elaboração de perguntas, avaliação e respostas, para um despertar crítico, curioso, indagativo, criativo, sobre os assuntos/temas em e sobre a ciência; e tão importante quanto isso, a promoção do pensamento crítico sobre a natureza da ciência, através de uma história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, fundamentada pela relevante epistemologia da solução de problemas de Larry Laudan. E, com isso, ele permite que a comunidade do ensino de ciências/física possa refletir sobre a razão de existir da temática natureza da ciência nos currículos de ciências, em todos os níveis de ensino.

Não obstante, com a responsabilidade e a certeza de que esta tese ainda tem muito a contribuir, no plano prático, é importante assinalar algumas perspectivas e desafios futuros como incentivo às possíveis investigações. **Primeiramente**, destacar a importância da unidade de ensino ser implementada em sala de aula, especialmente, na formação de professores/as de física e de futuros/as cientistas, para que suas potencialidades sejam exploradas, testadas e (espera-se) corroboradas com possíveis adaptações nesses contextos.

**Segundo**, lançar como desafio para a comunidade do ensino de ciências/física, a exploração conceitual de outras áreas da ciência/física, pela lente da solução de problemas de Larry Laudan. Em sua obra, “O Progresso e seus Problemas: rumo a uma teoria do crescimento científico”, Laudan aponta muitos outros episódios da história da física, além da mecânica clássica e celeste investigada aqui. Esses episódios fornecem direcionamentos para possíveis investigações sobre o desenvolvimento conceitual da: teoria da relatividade geral e restrita; do eletromagnetismo, da termodinâmica, da óptica, da mecânica quântica, da astronomia e da cosmologia moderna e contemporânea, dentre outras áreas afins.

Como uma **terceira** perspectiva, é possível assinalar alguns desdobramentos naturais, porém imediatos da tese, bem como outros desafios mais futuros. Dentre os desdobramentos imediatos, destaca-se a produção de artigos, cujos objetivos perpassam por apresentar os resultados desta investigação, especialmente, nas três perspectivas aqui defendidas: a ressignificação e/ou contextualização histórico-conceitual dos conteúdos científicos da astronomia, da cosmologia e da física; a apresentação de uma proposta de

ensino como alternativa complementar ao campo investigativo da resolução de problemas; e aprofundar a discussão sobre a temática natureza da ciência, com uma proposta de trabalho que vincula epistemologicamente alguns saberes metacientíficos, presentes na literatura, como parte integrante da narrativa histórico-conceitual da solução de problemas na ciência. Nesse sentido, como primeira parte desta tarefa, que já se encontra em andamento, serão apresentados trabalhos preliminares (BATISTA; PEDUZZI, 2020) em eventos da área do ensino de ciências e de física, próximos e futuros, em vista de ampliar, ao máximo, a visibilidade e contribuições desta tese para com a sua área de pesquisa e a comunidade da educação científica e tecnológica.

Em conformidade com esses desdobramentos, como desafios futuros, espera-se expandir os horizontes de possibilidades das contribuições da tese em dois direcionamentos específicos. Primeiro, procurar interagir com grupos de pesquisadores/as e/ou professores/as do ensino de ciências/física interessados/as no foco, desdobramentos e interlocuções da tese com suas perspectivas de trabalho. Segundo, explorar o universo e as potencialidades das plataformas digitais, em parceria com instituições de ensino superior e/ou educação básica, mediante a produção de conteúdos, cursos e/ou oficinas on-line, voltados para a história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, visando tanto o compartilhamento de experiências docentes quanto à formação inicial e/ou continuada de professores/as do ensino de ciências e de física.

Ao final desse mergulho profundo na histórica conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, como professor e pesquisador do ensino de Física, posso afirmar que: a história e filosofia da ciência é um aporte seguro para a construção do significado e da promoção do pensamento crítico sobre os assuntos/temas pertinentes e/ou inerente à Ciência/Física abordado no currículo escolar e em sala de aula. Nesse sentido, é importante dizer também que, nunca nos falte a coragem e a perseverança para enfrentar os grandes problemas educacionais (curriculares, pedagógicos e políticos) da nossa área científica e tecnológica.

## REFERÊNCIAS

- AABOE, A. On Babylonian Planetary Theories. **Centaurus**, Tonino, v. 5, n. 3-4, p. 209-277, 1958. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1600-0498.1958.tb00499.x>>. Acesso em: 5 nov. 2019.
- ABD-EL-KHALICK, F.; BELL, R. L.; LEDERMAN, N. G. The Nature of Science and Instructional Practice: Making the Natural. **Science Education**, London, v. 82, n. 4, p. 417-436, 1998. Disponível em: <[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(199807\)82:4<417::AID-SCE1>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199807)82:4<417::AID-SCE1>3.0.CO;2-E)>. Acesso em: 3 nov. 2019.
- ALBUQUERQUE, V. N.; LEITE, C. O Caso Plutão e a Natureza da Ciência. **Revista Latino-Americana De Educação Em Astronomia**. São Paulo, n. 21, p. 31-44, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.37156/RELEA/2016.21.031>>. Acesso: 29 out., 2020.
- AGUIAR, V. S.; SIMONI, J. A. Perguntas elaboradas por alunos sobre textos científicos: análise da aprendizagem por meio da taxonomia de Bloom. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO, 18, DESBQ, Florianópolis, 2016. Disponível em: <<http://www.eneq2016.ufsc.br/anais/resumos/R0476-2.pdf>>. Acesso em: 7 nov. 2019.
- AITON, E. J. Celestial Spheres and circles. **History of Science**, London, v. 19, n. 2, p. 75-114, 1981. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/007327538101900201>>. Acesso em: 6 nov. 2019.
- AMARAL, A. C. Deus e Movimento no Livro XII (A) da Metafísica de Aristóteles: a teologia na encruzilhada da filosofia primeira e da epistemologia. **Revista Didaskalia**, Lisboa, v. 31, n. 2, p. 71-115, 2001. Disponível em: <<https://repositorio.ucp.pt/bitstream/10400.14/18647/1/V03102-071-115.pdf>>. Acesso em: 6 nov. 2019.
- ANDERSON, L. W. et al. **A Taxonomy for Learning, Teaching and Assessing: a revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives**. Nova York: Addison Wesley Longman, 2001.
- ARISTÓTELES. **Física**: libros VII y VIII. Buenos Aires: Biblos, 2003.
- \_\_\_\_\_. **De Caelo**. Tradução Stocks, J. L. New York: Oxford University Press, 1922.
- \_\_\_\_\_. **Metafísica**. Tradução Patricio de Azcárate Corral. Madri: Editores Medina y Navarro, 1875.
- ASIMOV, I. **Saturno**. Tradução Angela do Nascimento Machado. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1981.
- BACHELARD, G. **A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.
- BASTOS-PEREIRA H. A. Astronomia islâmica entre Ptolomeu e Copérnico: Tradição Maraghah. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 4603, 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v33n4/21.pdf>>. Acesso em: 6 nov. 2019.
- BATISTA, C. A. S.; PEDUZZI, L. O. Q. A Origem dos Problemas Empíricos Astronômicos no Longevo Contexto Investigativo da Tradição de Pesquisa Grega. (no prelo) do EPEF: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA, 18, Florianópolis. SBF, 2020.

\_\_\_\_\_. Concepções Epistemológicas de Larry Laudan: uma ampla revisão bibliográfica nos principais periódicos brasileiros do ensino de ciências e ensino de física. **Investigações em Ensino de Ciências**, Florianópolis, v. 24, n. 2, p. 38-55, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.22600/1518-8795.ienci2019v24n2p38>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

BATISTA, C. A.; SIQUEIRA, M. Análise didática de uma atividade lúdica sobre a "instabilidade nuclear". **Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias**, Bogotá, v.14, n.1, p.126-142, 2019. Disponível em:<<http://doi.org/10.14483/23464712.13242>>. Acesso em: 16 out., 2020.

BERNARD, J. **Galileu Galilei: à luz da história e da astronomia**. Petrópolis: Vozes, 1955.

BERNADOWSKI, C. **The effects of Middle School Social Studies Teachers' Questioning Patterns on Learners' Outcomes**. 214 f. Tese (PhD). The School of Education at The University of Pittsburgh. University of Pittsburgh, Pittsburgh, 2006.

BERTRAND, J. **Os Fundadores da Astronomia Moderna: Copérnico, Tycho Brahe, Kepler, Galileu e Newton**. Rio de Janeiro: Contraponto, 2008.

BESSADA, D. A Gênese da Harmonia das Esferas no Antigo Pitagorismo. **Revista Música**, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 85-114, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/rm.v14i1.115248>>. Acesso em: 6 nov. 2019.

BLANPIED, W. A. **Physics: its structure and evolution**. Waltham: Blaisdell Publishing Company, 1969.

BERRY, A. **A short history of astronomy**. New York: Dover Publications, 1971.

BLOOM, B. S. et al. **Taxonomy of educational objectives**. New York: David McKay, 1956.

BLOOM, B. S. Some major problems in educational measurement. **Journal of Educational Research**, London, v. 38, n. 1, p. 139-142, 1944. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00220671.1944.10881321>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

BORGES, L. Sobre a Natureza. In: SOUZA, J. C. (Org.). **Os pré-socráticos: fragmentos, doxografia e comentários**. 2. ed. São Paulo: Abril Cultural, 1978.

BRAHE, T. **Sur des phénomènes plus récents du monde étheré**. Paris: Blanchard, 1984.

BRASIL. Base Nacional Comum Curricular. Educação é a Base. Brasília, MEC/CONSED/UNDIME, 2018. Disponível em: <<http://basenacionalcomum.mec.gov.br/>>. Acesso: 18 jun., 2020.

BREDEKAMP, H. O Ofuscamento pelo Sol. **American Brasil**, São Paulo, v. especial, n. 33, p. 44-53, 2009.

BROUSSEAU, G. **Introdução ao estudo das situações didáticas: conteúdos e métodos de ensino**. Tradução Camila Bogéa. São Paulo: Ática, 2008.

BURTT, E. A. **The metaphysical foundations of modern physical science**. New York: Dover Publications, 2003.

CAJORI, F. Apêndice Histórico e Explicativo. In: NEWTON, I. **Principia: princípios matemáticos de filosofia natural**. Tradução Trieste Ricci. São Paulo: Nova Stella, 1990. p. 267-291.

CAMENIETZKI, C. Z. Tradução, introdução e notas. In: GALILEU, G. **A Mensagem das Estrelas**. Rio de Janeiro: Museu de Astronomia e Ciências; Salamandra, 1987. p. 1-24.

- CANCIAN, A. Dados biográficos de Giordano Bruno. In: BRUNO, G. **A causa, o princípio e o uno**. Tradução Attílio Cancian. São Paulo: Nova Stella, 1988. p. 7-8.
- CAROLINO, L. M. A ceia de Cinzas. (Resenha). **Revista Brasileira de História da Ciência**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 2, p. 398-401, 2012. Disponível em: <[http://www.sbh.org.br/arquivo/download?ID\\_ARQUIVO=970](http://www.sbh.org.br/arquivo/download?ID_ARQUIVO=970)>. Acesso em: 7 nov. 2019.
- CASTIBLANCO, G. El pensamiento crítico en la formación de profesores de ciencias naturales. **Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias**, Francisco José de Caldas, v. 14, n. 1, p. 5-6, 2019. Disponível em: <<http://doi.org/10.14483/23464712.14117>>. Acesso em: 5 nov. 2019.
- CHASTENAY, P. From geocentrism to allocentrism: Teaching the phases of the moon in a digital all-dome planetarium. **Research in Science Education**, London, v. 46, p. 43-77, 2016. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11165-015-9460-3.pdf>>. Acesso em: 6 nov. 2019.
- CHEVALLARD, Yves. **La Transposición Didáctica: Del saber sabio al saber enseñado**. Argentina: La Pensée Sauvage, 1991.
- CHIN, C. Teacher questioning in science classrooms: approaches that stimulate productive thinking. **Journal Research Science Teaching**, London, v. 44, n. 6, p. 815-843, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/tea.20171>>. Acesso em: 7 nov. 2019.
- CHIN, C.; OSBORNE, J. Students' Questions and Discursive Interaction: Their Impact on Argumentation During Collaborative Group Discussions in Science. **Journal of Research in Science Teaching**, London, v. 47, n. 7, p. 883-908, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/tea.20385>>. Acesso em: 7 nov. 2019.
- CHALMERS, A. F. **O que é Ciência Afinal?** Tradução de Raul Fiker. São Paulo, SP: Brasiliense, 1993.
- CHIN, C. Teacher questioning in science classrooms: approaches that stimulate productive thinking. **Journal Research Science Teaching**, London, v. 44, n. 6, p. 815-843, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/tea.20171>>. Acesso em: 7 nov. 2019.
- CHIN, C.; OSBORNE, J. Students' Questions and Discursive Interaction: Their Impact on Argumentation During Collaborative Group Discussions in Science. **Journal of Research in Science Teaching**, London, v. 47, n. 7, p. 883-908, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/tea.20385>>. Acesso em: 7 nov. 2019.
- \_\_\_\_\_. Students' questions: A potential resource for teaching and learning science. **Studies in Science Education**, London, v. 44, n. 1, p. 1-39, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/03057260701828101>>. Acesso em: 7 nov. 2019.
- CLAGETT, M. **The Science of Mechanics in the Middle Ages**. Madison: Oxford University Press, 1961.
- CLOUGH, M. P. Teaching the Nature of Science to Secondary and Post-Secondary Students: Questions Rather Than Tenets. **California Journal of Science Education**, Califórnia, v. 8, n. 2, p. 31-40, 2008. Disponível em: <<http://pantaneito.co.uk/teaching-the-nature-of-science-to-secondary-and-post-secondary-students-questions-rather-than-tenets-michael-clough/>>. Acesso em: 3 nov. 2019.
- COHEN, B.; WESTFALL, R. (Org.). **Newton: textos, antecedentes e comentários**. Tradução Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto, 2002.

COHEN, B. **The Birth of a New Physics**. London: Penguin Books, 1992.

\_\_\_\_\_. **O nascimento de uma nova Física**. Tradução Maria Alice Gomes da Costa. Lisboa: Gradiva, 1988.

\_\_\_\_\_. **La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas**. Tradução Carlos Solís Santos. Madrid: Alianza Editorial, 1983.

COHEN, M. R.; DRABKIN, I. E. **A source book of greek science**. Cambridge: Harvard University, 1966.

COPÉRNICO, N. **Commentariolus: Pequeno comentário de Nicolau Copérnico sobre suas próprias hipóteses acerca dos movimentos celestes**. Introdução, tradução e notas Roberto de Andrade Martins. São Paulo: Nova Stella; Rio de Janeiro: Coppe: MAST, 1990.

\_\_\_\_\_. **As Revoluções dos Orbes Celestes**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1984.

CORDEIRO, M. D.; PEDUZZI, L. O. Q. Valores, Métodos e Evidências: Objetividade e Racionalidade na Descoberta da Fissão Nuclear. **Alexandria**, Florianópolis, v. 9, n. 1, p. 235-262, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5007/1982-5153.2016v9n1p235>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

CROMBIE, A. C. **The History of Science from Augustine to Galileo**. Massachusetts: Harvard University Press, 1979.

COSTA, S. S. C.; MOREIRA, M. A. A resolução de problemas II: propostas de metodologias didáticas. **Investigação em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v.2, n.1, p.5-26, 1997.

Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/649/440>>. Acesso em: 16 set. 2020.

\_\_\_\_\_. A resolução de problemas I: diferenças entre novatos e especialistas. **Investigação em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 1, n.2, p. 176-192, 1996. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/643/434>>. Acesso em: 16 set. 2020.

CSAPÓ, B.; FUNKE, J. (Org.) **The Nature of Problem Solving: using research to inspire 21st century learning**. OECD, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1787/20769679>> Acesso em: 16 set. 2020.

CUSHING, J. T. Kepler's Laws and Universal Gravitation in Newton's Principia. **American Journal of Physics**, v. 50, n. 7, p. 617-628, 1982. Disponível em: <<https://doi.org/10.1119/1.13059>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

DAL MAGRO, T. Critério de decisão entre hipóteses científicas Rivais: Kuhn, Lakatos e Laudan. **Cognitio-Estudos**, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 174-190, 2013. Disponível em: <<https://revistas.pucsp.br/cognitio/article/view/12701/13259>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

DAMÁSIO, F.; PEDUZZI, L. O. Q. História e Filosofia da Ciência na Educação Científica: para quê? **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 19, n. especial, p. 1-19, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1983-21172017190103>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

DESCARTES, R. **Princípios da Filosofia**. Lisboa: Edições 70, 1997.

\_\_\_\_\_. **El mundo o el tratado de la luz**. Madrid: Alianza Editorial, 1991.

DIAS, P. M. C.; SANTOS, W. M. S.; SOUZA, M. T. M. A Gravitação Universal: um texto para o ensino médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 26, n. 3, p. 257-

271, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v26n3/a12v26n3.pdf>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

DILLON, J. T. The effect of questions in education and other enterprises. **Journal of Curriculum Studies**, London, v. 14, n. 2, p. 127-152, 1982. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/0022027820140203>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

DINIZ, N. P.; REZENDE JÚNIOR, M. F. Percepções sobre a Natureza da Ciência e sobre o Cientista: uma revisão nas atas do ENPEC. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 11, Florianópolis. **Anais... ABRAPEC**, 2017. Disponível em: <<http://www.abrapecnet.org.br/enpec/xi-enpec/anais/resumos/R0111-1.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

DOMINGUES, B. H. Copérnico e a Espanha. **Sociedade Brasileira de História da Ciência**, Rio de Janeiro, n. 15, p. 11-28, 1996. Disponível em: <<https://www.sbhc.org.br>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

DREYER, J. L. E. **A history of astronomy from Thales to Kepler**. New York: Dove Publications, 1953.

DRIVER, R. H. et al. **Young people's images of science**. Buckingham: Open University Press, 1996.

DUHEM, P. **Le système du monde**. Paris: Hermann, 1958.

DUPRÉ, S. Raízes Históricas do Telescópio. **Scientific American Brasil**, São Paulo, v. especial, n. 33, p. 26-35, 2009.

EINSTEIN. Apresentação. In: JAMMER, M. **Conceitos de espaço: a história das teorias do espaço na física**. Rio de Janeiro: Contraponto, 2010. p. 15-50.

ESCUADERO, C.; GONZÁLEZ, S.; GARCIA, M. Resolución de Problemas en el aula de Física: un análisis del discurso de su enseñanza y su aprendizaje en nivel medio.

**Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v.4, n.3, p.229-251, 1999. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/611>>. Acesso: 16 set. 2020

ESCUADERO, C.; FLORES, S. G. Resolución de problemas en nivel medio: un cambio cognitivo y social. **Investigação em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v.1, n.2, p.155-175, 1996. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/642/433>>. Acesso: 16 set. 2020.

ÉVORA, F. R. R. **A Revolução Copernicana-Galileana: Astronomia e Cosmologia Pré-Galileana**. Campinas: Ed. da Unicamp, 1993. v. 1.

FARRINGTON, B. **A ciência grega**. São Paulo: Ibrasa, 1961.

FERRAZ, A. P. C M.; BELHOT, R. V. Taxonomia de Bloom: revisão teórica e apresentação das adequações do instrumento para definição de objetivos instrucionais. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 17, n. 2, p. 421-431, 2010. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2010000200015>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

FERREIRA, L. N. A.; QUEIROZ, S. L. Perguntas elaboradas por graduandos em química a partir da leitura de textos de divulgação científica. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 12, n. 1, p. 139-160, 2012. Disponível em:

<<https://periodicos.ufmg.br/index.php/rbpec/article/view/4223>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

- FERRIS, T. **O despertar na via Láctea: uma história da astronomia**. Tradução Waltensir Dutra. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1990.
- FEYERABEND, P. **Contra o método**. Tradução Octanny S. da Mota e Leonidas Hegenber. 2. ed. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1985.
- \_\_\_\_\_. **Contra o método**. Tradução de Octanny S. da Mota e Leonidas Hegenberg. Rio de Janeiro: F. Alves, 1977.
- FITCH, J. G. **Lectures on teaching**. New York: Kellog & Co, 1880.
- FONSECA, R. M. G. S. La mujer, la ciencia y la investigación. Editorial. Revista da Escola de Enfermagem da USP, v.47, n. 4, p.1-3, 2013.
- FORATO, T. C. M.; PIETROCOLA, M.; MARTINS, R. A. Historiografia e Natureza da Ciência na Sala de Aula. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 28, n. 1, p. 27-59, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.5007/2175-7941.2011v28n1p27>>. Acesso em: 3 nov. 2019.
- FRANKLIN, A. Principle of inertia in the middle ages. **American Journal of Physics**, v. 44, n. 6, p. 529-545, 1976. Disponível em: <<https://doi.org/10.1119/1.10392>>. Acesso em: 7 nov. 2019.
- FREIRE Jr, O. Sobre “As raízes sociais e econômicas dos ‘Principia’ de Newton”. **Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência**, Rio de Janeiro, n.9, p.51-64, 1993. Disponível em: <<https://www.sbhc.org.br/>>. Acesso: 16 set. 2020.
- FREIRE, P.; FAGUNDES, A. **Por uma pedagogia da pergunta**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1985.
- GALILEU, G. **Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo ptolomaico e copernicano**. Tradução, introdução e notas Pablo Rubén Mariconda. 3. ed. São Paulo: Associação Filosófica Scientiae Studia; Editora 34, 2011.
- \_\_\_\_\_. **Dois novas ciências**. Tradução Letizio Mariconda e Pablo R. Mariconda. 2. ed. Rio de Janeiro: Museu de Astronomia e Ciências Afins; São Paulo: Nova Stella, 1988.
- \_\_\_\_\_. **A mensagem das estrelas**. Rio de Janeiro: Editora Salamandra. Coleção Clássicos da Ciência (1), MAST (Museu de Astronomia e Ciências Afins), 1987.
- GALL, M. et al. Effects of questioning techniques and recitection on student learning. **American Educational Research Journal**, New York, v. 15, n. 2, p. 175-199, 1987. Disponível em: <<https://doi.org/10.3102/00028312015002175>>. Acesso em: 7 nov. 2019.
- GALL, M. Synthesis of research on teachers' questioning. **Educational Leadership**, Illinois, v. 42, p. 40-47, 1984. Disponível em: <[http://www.ascd.org/ASCD/pdf/journals/ed\\_lead/el\\_198411\\_gall.pdf](http://www.ascd.org/ASCD/pdf/journals/ed_lead/el_198411_gall.pdf)>. Acesso em: 7 nov. 2019.
- \_\_\_\_\_. The use of questions in teaching. **Review of Educational Research**, New York, v. 40, n. 5, p. 707-721, 1970. Disponível em: <<https://doi.org/10.3102/00346543040005707>>. Acesso em: 3 nov. 2019.
- GAUTHIER, C. et al. **Por uma teoria da pedagogia: pesquisas contemporâneas sobre o saber docente**. 3. ed. Ijuí: Ed. da Unijuí, 1998.

GIL PÉREZ, D. et al. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ciedu/v7n2/01.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

GIL PÉREZ, D. et al. «¿Tiene sentido seguir distinguiendo entre aprendizaje de conceptos, resolución de problemas de lápiz y papel y realización de prácticas de laboratorio?». **Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas**, Barcelona, v. 17, n.2, p. 311-20, 1999. Disponível em: <<https://www.raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/21581>>. Acesso: a6 set. 2020.

GINGERICH, O. **O livro que ninguém nunca leu: em busca das revoluções de Nicolau Copérnico**. Tradução Bruna Harstein. Rio de Janeiro: Record, 2008.

\_\_\_\_\_. Crisis versus Aesthetic in the Copernican Revolution. **Vistas in Astronomy**, v. 17, n. 1, p. 85-95, 1975. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0083-6656\(75\)90050-1](https://doi.org/10.1016/0083-6656(75)90050-1)>. Acesso em: 7 nov. 2019.

GOTTSCHALK, C. M. C. O papel do método no ensino: da maiêutica socrática à terapia wittgensteiniana. **Educação Temática Digital**, Campinas, v. 12, n. 1, p. 64-81, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.20396/etd.v12i1.842>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

GILMORE, A. C.; MCKINNEY, C. W. The Effects of Student Questions and Teacher Questions on Concept Acquisition. **Theory & Research in Social Education**. London, v. 14, n. 3, p. 225-244, 1986. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00933104.1986.10505524>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

GRANT, E. Medieval and Seventeenth century conceptions of na infinite void space beyond the cosmo. **Isis**, v. 60, p. 39-60, 1969. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/229021>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

GRAESSER, A.; PERSON, N. Question asking during tutoring. **American Educational Research Journal**, New York, v. 31, n. 1, p. 104-137, 1994. Disponível em: <<https://www.gwern.net/docs/spacedrepetition/1994-graesser.pdf>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Além da Detecção de Modelos Mentais dos Estudantes uma Proposta Representacional Integradora. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v.7,n.1, p. 31-53, 2002. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/568>>. Acesso: 16 set. 2020.

GUIMARÃES, A. P. Os 400 anos do De magnete. **Ciência Hoje**, São Pulo, v. 28, n. 167, p. 74-77, 2000. Disponível em: <[http://cbpfindex.cbpf.br/publication\\_pdfs/artigoDeDivulgacaoCientifica\\_2019-03-29-10-40-13YXJ0aWdvRGVEaXZ1bGdhY2FvQ2llbnRpZmljYQ==.pdf](http://cbpfindex.cbpf.br/publication_pdfs/artigoDeDivulgacaoCientifica_2019-03-29-10-40-13YXJ0aWdvRGVEaXZ1bGdhY2FvQ2llbnRpZmljYQ==.pdf)>. Acesso em: 7 nov. 2019.

GURGEL, I. Reflexões Político-Curriculares sobre a Importância da História das Ciências no Contexto da Crise da Modernidade. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 37, n. 2, p.333-350, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2020v37n2p333>>. Acesso: 16 set. 2020.

GURID, V.; SALINAS, J.; VILLANI, A. Contribuciones de la epistemología de Laudan para la comprensión de concepciones epistemologicas sustentadas por estudiantes secundarios de física. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 11, n. 1, p. 97-117, 2006. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/506/305>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

- HALL, M. B. **Nature and nature's laws: documents of the Scientific Revolution**. London: Macmillan, 1970.
- HANSON, N. R. **Constellations and Conjectures**. Dordrecht: D. Reidel Pub. Company, 1973.
- HARGIE, O. D. W. The Importance of Teacher Questions in the Classroom. In: STUBS, M.; HILLIER, H. (Eds.). **Readings on Language, Schools and Classrooms**. London: Methuen, 1983. p. 185-192.
- HEATH, T. **Aristarchus of Samos: The Ancient**. Mineola, New York: Dover Publications, 2004.
- HEISENBERG, W. **Physics and beyond**. Nova York: Harper & Row, 1971.
- HESSEN, B. M. As raízes sociais e econômicas dos 'principia' de Newton. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 6, n.1, p. 33-55, 1984. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol06a06.pdf>>. Acesso: 16 set. 2020.
- HESSEN, J. **Teoria do conhecimento**. Tradução João Vergílio Gallerani Cuter. São Paulo: Martins Fontes, 2000.
- HUANG, X.; LEDERMAN, N. G.; CAI, C. Improving Chinese Junior High School Students' Ability to Ask Critical Questions. **Journal of Research in Science Teaching**, Illinois, v. 54, n. 8, p. 963-987, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/tea.21390>>. Acesso: 3 nov. 2019.
- HUFFMAN, A. C. **Philolaus of Croton: Pythagorean and Presocratic**. New York: Cambridge University Press, 1993.
- IRZIK, G.; NOLA, R. A family resemblance approach to the nature of Science for Science education. **Science & Education**, London, v. 20, p. 591-607, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11191-010-9293->>. Acesso em: 3 nov. 2019.
- JAMMER, M. **Conceitos de espaço: a história das teorias do espaço na física**. Rio de Janeiro: Contraponto, 2010.
- JAPIASSU, H. **Introdução às ciências humanas**. 3. ed. São Paulo: Letras, 1994.
- JARDIM, W. T.; GUERRA, A. Experimentos Históricos e o Ensino de Física: Agregando reflexões a partir da revisão bibliográfica da área e da história cultural da ciência. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v.22, n.3, p. 244-263, 2017. Disponível em: <<http://www.10.22600/1518-8795.ienci2017v22n3p244>>. Acesso: 15 out., 2020.
- JOSUÉ. O livro de Josué. In: **Bíblia on-line**. [S/A]. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/0B9A1ZUvz04Z>>. Acesso em: 7 nov. 2019.
- JUNIOR, L. A. R.; CUNHA, M. F.; LARANJEIRAS, C. C. Simulação de experimentos históricos no ensino de física: uma abordagem computacional das dimensões históricas e empírica da ciência na sala de aula. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v.34, n.4, p.4602, 2012. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/rbef/v34n4/a23v34n4.pdf>>. Acesso: 16 set. 2020.
- KANT, I. **Crítica à Razão Pura**. 5. ed. Coimbra, Portugal: Fundação Calouste, 2001.
- KEPLER, J. *Mysterium cosmographicum*. In: CASPAR, M.; VON DYCK, W. (Ed.). **Gesammelte Werke**. Munique, C. H. Bech'sche Verlagsbuchhandlung, 1938. v. 1. p. 1-80.

- KIMBALL, M. E. Understanding the nature of science: A comparison of scientists and science teachers. **Journal of Research in Science Teaching**, Detroit, v. 5, n. 2, p. 110-120, 1967. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/tea.3660050204>>. Acesso em: 6 nov. 2019.
- KOCH, A.; ECKSTEIN, S. G. Improvement of reading comprehension of physics texts by students' question formulation. **International Journal of Science Education**, London, v. 13, n. 4, p. 473-485, 1991. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/0950069910130410>>. Acesso em: 3 nov. 2019.
- KOESTLER, A. **O Homem e o Mundo: como a concepção do universo se modificou através dos tempos**. 2. ed. São Paulo: Ibrasa, 1989.
- KOYRÉ, A. **Do mundo fechado ao universo infinito**. 4. ed. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 2006.
- \_\_\_\_\_. O significado da síntese newtoniana. In: COHEN, B.; WESTFALL, R. S. (Org.). **Newton: textos, antecedentes, comentários**. Tradução Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto, 2002. p. 84-100.
- \_\_\_\_\_. **Estudos de história do pensamento científico**. Tradução e revisão técnica Márcio Ramalho. Rio de Janeiro: Ed. Forense Universitária; Brasília: Ed. da UnB, 1982.
- \_\_\_\_\_. **From the Closed World to the Infinite Universe**. Baltimore: Johns Hopkins, 1973.
- \_\_\_\_\_. La révolution astronomique. Paris, Hermann, 1961.
- KRATHWOHL, D. R. A Revision of Bloom's Taxonomy: An Overview. **Theory Into Practice**, London, v. 41, n. 4, p. 212-218, 2002. Disponível em: <<https://www.depauw.edu/files/resources/krathwohl.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2019.
- KUHNEN, R. F. Doxografia. In: SOUZA, J. C. (Org.). **Os pré-socráticos: fragmentos, doxografia e comentários**. 2. ed. São Paulo: Abril Cultural, 1978. p. 139-140.
- KUHN, T. S. **A tensão essencial**. Tradução Marcelo Amaral Penna-Forte. São Paulo: Ed. da Unesp, 2011.
- \_\_\_\_\_. **A Estrutura das Revoluções Científicas**. Tradução: Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira. São Paulo: Perspectiva, 2009.
- \_\_\_\_\_. **A revolução copernicana: a astronomia planetária no desenvolvimento do pensamento ocidental**. Lisboa: Edições 70, 1990.
- LACEY H. **Valores e atividade científica**. São Paulo: Discurso Editorial, 1998.
- LAÉRCIO, D. **Sobre las vidas e opiniones y sentencias de los filósofos mas ilustres**. Tradução Josef Ortiz y Sanz. Madrid: Imprensa Real, 1792.
- LAKATOS, I. **La metodología de los programas de investigación científica**. Madrid: Alianza, 1989.
- LAMEU, L. P.; LANGHI, R. O Sistema Solar no CD: um objeto de aprendizagem de astronomia. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, Limeira, n. 25, p. 71-93, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.37156/RELEA/2018.25.071>>. Acesso: 26 fev. 2020.
- LANGHI, F. S.; NARDI, R. Ensino de Astronomia: erros conceituais mais comuns presentes em livros didáticos de ciências. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v.

24, n. 1, p. 87-11, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.5007/%25x>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

LAUDAN, L. **O Progresso e seus Problemas: rumo a uma teoria do crescimento científico**. Tradução Roberto Leal Ferreira. São Paulo: Ed. da Unesp, 2011.

\_\_\_\_\_. **Science and Values**. Berkeley: University of California Press, 1984.

LERDEMAN, J. S.; LERDEMAN, N. G.; BARTOS, S. A.; BARTELS, S. L.; MEYER, A. A.; SCHWARTZ, R. S. Meaningful Assessment of Learners' Understandings About Scientific Inquiry – The Views About Scientific Inquiry (VASI) Questionnaire. **Journal of Research in Science Teaching**, London, v. 51, n. 1, p. 65-83, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/tea.21125>> . Acesso: 29 out., 2020.

LEDERMAN, N. G. et al. Views of nature of science questionnaire: Toward valid and meaningful assessment of learners' conceptions of nature of science. **Journal of Research in Science Teaching**, Illinois, v. 39, n. 6, p. 497-521, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/tea.10034>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

LEDERMAN, N. G. Students' and teachers' conceptions about the nature of science: A review of the research. **Journal of Research in Science Teaching**, Illinois, v. 29, n. 4, p. 331-359, 1992. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/tea.3660290404>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

LINTON, C. M. **From Eudoxus to Einstein: A History of Mathematical Astronomy**. London: Cambridge University Press, 2004.

LIRA, L. T. O. **A Formulação de perguntas em aulas de ciências: almejando a alfabetização científica dos alunos do ensino fundamental de uma escola pública**. 144 f. 2015. Dissertação (Mestrado em Educação) – Programa de Pós-graduação em Educação. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

LLOYD, G. E.R. **Greek science after Aristoteles**. London: Chatto & Windus, 1973.

LOPES, I. C. Giordano Bruno: entre o geocentrismo e o heliocentrismo. **Revista de Filosofia**, Amargosa, v. 9, n. 1, p. 1-25, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.31977/grifi.v9i1.603>>. Acesso em: 7 de nov. 2019.

LOPES, M. H. O. **A Retrogradação dos Planetas e Suas Explicações: Os Orbes dos Planetas e Seus Movimentos, da Antiguidade a Copérnico**. 245 f. 2001. Dissertação (Mestrado em História da Ciência) – Programa de Pós-Graduação em História da Ciência. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2001.

LÓPEZ, S.; VEIT, E. A.; ARAUJO, I. S. La Formulación de Preguntas en el Aulas de Classe: una evidencia de aprendizaje significativo crítico. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 20, n. 1, p. 117-132, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1516-731320140010007>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

LOURENÇO, M. P. M. Compromisso e inovação teórica no ensino da Astronomia em Portugal no século XVII: o contributo de Cristóvão Bruno. **Revista Portuguesa de Filosofia**, Braga, v. 54, n. 2, p. 247-283, 1998. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/40337277>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

MARTINS, A. F. P. Natureza da Ciência no ensino de ciências: uma proposta baseada em “temas” e “questões”. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 32, n. 3, p.

703-737, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.5007/2175-7941.2015v32n3p703>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

MARTINS, R. A. Galileu e a rotação da Terra. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 11, n. 3, p. 196-211, 1994. Disponível em: <<https://doi.org/10.5007/%25x>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

\_\_\_\_\_. Introdução, tradução e notas. **Commentariolus**: Pequeno comentário de Nicolau Copérnico sobre suas próprias hipóteses acerca dos movimentos celestes. São Paulo: Nova Stella; Rio de Janeiro: Coppe: MAST, 1990.

\_\_\_\_\_. Galileu e o Princípio da Relatividade. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, São Paulo, v. 9, p. 69-86, 1986. Disponível em: <<http://www.ghtc.usp.br/server/pdf/ram-27.pdf>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

MASSONI, N. T. **A epistemologia contemporânea e suas contribuições em diferentes níveis de ensino de física**. 412 f. 2010. Tese (Doutorado em Física) – Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

MATTHEWS, M. R. The Nature of Science and Science Teaching. In: MATTHEWS, M. R. (Org.). **Science Teaching: The Contribution of History and Philosophy of Science**. London: Routledge, 2018. p. 387-411.

\_\_\_\_\_. Changing the focus: from nature of science to features of science. In: KHINE, M. S. (Ed.). **Advances in nature of science research**. Dordrecht: Springer, 2012. p. 3-26.

\_\_\_\_\_. Editorial. **Science & Education**, London, v. 6, n. 4, p. 323-329, 1997.

\_\_\_\_\_. História e filosofia e ensino de ciências: uma tendência atual de reaproximação. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 12, n. 3, p. 164-214, 1995. Disponível em: <<https://doi.org/10.5007/%25x>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

\_\_\_\_\_. História e filosofia e ensino de ciências: uma tendência atual de reaproximação. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 12, n. 3, p. 164-214, 1995. Disponível em: <<https://doi.org/10.5007/%25x>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

MCCOMAS, W. F.; OLSON, J. K. The Nature of Science in International Science Education Standards Documents. (p. 41-52). In: MCCOMAS (Ed.). **The Nature of Science in Science Education: Rationales and Strategies**. Kluwer Academic Publishers: The Netherlands, 1998.

MCCOMAS, W. F.; CLOUGH, M. P.; ALMAZROA, H. The Role and Character of the Nature of Science in Science Education'. **Science & Education**, London, v. 7, n. 6, p. 511-532, 1998. Disponível em: <[https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-306-47215-5\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-306-47215-5_1)>. Acesso em: 3 nov. 2019.

MEDEIROS, A.; MONTEIRO, Jr. A Reconstrução de Experimentos Históricos como uma Ferramenta Heurística no Ensino de Física. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 3, Atibaia. **Atas... ABRAPEC**, 2001. Disponível em: <<http://www.nutes.ufrj.br/abrapec/iiienpec/Atas%20em%20html/o12.htm>>. Acesso: 15 out., 2020.

MEDEIROS, A.; MONTEIRO, M. A. A Invisibilidade dos Pressupostos e das Limitações da Teoria Copernicana nos Livros Didáticos de Física. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v.19, n. 1, p. 28-50, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.5007/%25x>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

MEDEIROS, A.; MONTEIRO, Jr. Compreensões de Estudantes de Física de Alguns Conceitos Fundamentais da Astronomia. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 3, Atibaia. **Anais...** Atibaia: ABRAPEC, 2001. Disponível em: <<http://abrapecnet.org.br/enpec/iii-enpec/o39.htm>>. Acesso em: 18 out. 2018.

MEDEIROS, G. C. M. **Reflexões e contribuições para o ensino de gravitação clássica no nível médio**. 2005. 91 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências Naturais e Matemática) – Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Naturais e Matemática, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.

MEICHTRY, Y. J. The Nature of Science and Scientific Knowledge: Implications for a Preservice Elementary Methods Course. **Science Education**, London, v. 10, n. 8, p. 273-286, 1999. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1008693930840>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

MENDONÇA, P. C. C. De que Conhecimento sobre a Natureza da Ciência Estamos Falando? **Ciência & Educação**, Bauru, v.26, e20003, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1516-731320200003>>. Acesso: 6 out., 2020.

MENEZES, L. **Concepções de práticas de professores de Matemática: contributos para o estudo da pergunta**. 218 f. 1995. Dissertação (Mestrado em Educação) – Programa de Pós-Graduação em Educação, Universidade de Lisboa, Portugal, 1995.

MESQUITA, A. P. **Aristóteles: obras completas**. Lisboa: Imprensa Nacional-Casa da Moeda, 2005.

MEY, E. S. A. Bibliotheca Alexandrina. **Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação**, Campinas, v. 1, n. 2, p. 71-91, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.20396/rdbci.v1i2.2081>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

MICHA, D. N. Fotos da Lua pelo Mundo: um projeto observacional registrado em fotografia sobre como as fases da Lua se comparam quando observadas dos Hemisférios Norte e Sul. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 40, n. 3, p. 1-10, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2017-0383>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

MONTERO, L. Introdução; Origens do conhecimento profissional para o ensino; Conhecimento prático". In: **A construção do conhecimento profissional docente**: Lisboa: Instituto Piaget. (Coleção "Horizontes Pedagógicos"). 2001e, p.143-189.

MOREIRA, M. A.; MASSONI, N. T. **Epistemologias do século XX**. São Paulo: Pedagógica Universitária Ltda., 2011.

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem Significativa: a teoria e textos complementares**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2011.

\_\_\_\_\_. Pesquisa básica em educação em ciências: uma visão pessoal. **Revista Chilena de Educación Científica**, Santiago, v.3, n.1, p.10-17, 2004. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/~moreira/Pesquisa.pdf>>. Acesso: 16 set. 2020.

MORTIMER, E. F. Construtivismo, Mudança Conceitual e Ensino de Ciências: para onde vamos? **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 1, n. 1, p. 20-39, 1996. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/645>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

MOSCHETTI, M. Galileu e as cartas sobre as manchas solares: a experiência telescópica contra a inalterabilidade celeste. **Cadernos de Ciências Humanas**, Especiaria, v. 9, n. 16, p.

313-340, 2006. Disponível em:

<[http://www.uesc.br/revistas/especiarias/ed16/16\\_4\\_galileu\\_e\\_as\\_cartas\\_sobre.pdf](http://www.uesc.br/revistas/especiarias/ed16/16_4_galileu_e_as_cartas_sobre.pdf)>. Acesso em: 7 nov. 2019.

MOURA, B. A. O que é a natureza da Ciência e qual sua relação com a história e a Filosofia da Ciência? **Revista Brasileira de História da Ciência**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 32-46, jan./jun. 2014. Disponível em:

<[https://www.sbhc.org.br/revistahistoria/view?ID\\_REVISTA\\_HISTORIA=51](https://www.sbhc.org.br/revistahistoria/view?ID_REVISTA_HISTORIA=51)>. Acesso em: 3 nov. 2019.

NASCIMENTO, C. A. R. A Carta de Galileu à Grã-Duquesa Cristina de Lorena. **Discurso**, São Paulo, v. 31, p. 323-328, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/issn.2318-8863.disc..2000.38042>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

\_\_\_\_\_. Carta a senhora Cristina de Lorena, grã-duquesa da Toscana. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, Campinas, v. 5, n. 1, p. 91-123, 1983. Disponível em:

<<https://www.cle.unicamp.br/eprints/index.php/cadernos/article/view/1189>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

NEUGEBAUER, O.; SACHS, A. Astronomical Cuneiform Texts, II. **Journal of Cuneiform Studies**, London, v. 22, n. 3-4, p. 92-113, 1968. Disponível em:

<<https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.2307/1359125>>. Acesso em: 6 nov. 2019.

NEUGEBAUER, O. **Astronomy and history selected essays**. New York: Springer-Verlag, 1983.

NEWTON, I. **Principia**: princípios matemáticos de filosofia natural. Tradução Trieste Ricci. São Paulo: Nova Stella, 1990.

NICKLES, T. Historicist Theories of Scientific Rationality. **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**, 2017. Disponível em: <<https://plato.stanford.edu/entries/rationality-historicist/#HistConcRatiBattBigSyst>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

NIETZSCHE, F. **A Filosofia na Época Trágica dos Gregos**. Tradução Gabriel Valladão Silva. São Paulo: L&PM, 2011.

O'CONNOR, J. J.; ROBERTSON, E. F. Thomas Digges.

**University of St Andrews**, Scotland, p. 1-2, 2002. Disponível em: <<https://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Digges.html>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

ORR, M. **Dant and the Early Astronomers**. London: Gall and Inglis, 1914.

OSMAN, M. (2017). Problem solving: Understanding complexity as uncertainty. In: CSAPÓ, B; FUNKE, J. (Org.). **The Nature of Problem Solving: using research to inspire 21st century learning**. 2017. OECD. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1787/20769679>> Acesso em: 16 set. 2020.

OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. H.; RICCI, T. F.; PRADO, S. D. Tradição de pesquisa quântica: uma interpretação na perspectiva da epistemologia de Larry Laudan. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Vigo, v.7, n.2, p.336-386, 2008.

Disponível em: <[http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen7/ART6\\_Vol7\\_N2.pdf](http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen7/ART6_Vol7_N2.pdf)>. Acesso: 7 out., 2020.

OVANDO, M. M.; CUDMANI, L. C. Primeros resultados de una experiencia piloto sobre enseñanza de la física en carreras de ingeniería agronómica. **Investigações em Ensino de**

- Ciências**, Porto Alegre, v. 9, n. 3, p. 223-242, 2004. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/527>>. Acesso em: 3 nov. 2019.
- PAULA, H. F.; CASTRO, M. E. C. Formulação de questões e mediação da leitura. **Investigação em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 429-461, 2010. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/257>>. Acesso em: 7 nov. 2019.
- PEDERSEN, O. **Early Physics and Astronomy: A Historical Introduction**. New York: Cambridge University Press, 1993.
- PEDUZZI, L. O. Q.; RAÍCIK, A. Sobre a Natureza da Ciência: Asserções Comentadas para uma articulação com a História da ciência. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 25, n. 2, p. 19-55, 2020. Disponível em: <<http://www.10.22600/1518-8795.ienci2020v25n2p19>>. Acesso: 17 set. 2020.
- PEDUZZI, L. O. Q. **Força e Movimento: de Thales a Galileu**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2018a. Disponível em: <[http://docs.wixstatic.com/ugd/7d71af\\_fb96e93af2c24cccba6c98af2e8beced.pdf](http://docs.wixstatic.com/ugd/7d71af_fb96e93af2c24cccba6c98af2e8beced.pdf)>. Acesso em: 6 nov. 2019.
- \_\_\_\_\_. **Da física e da cosmologia de Descartes à gravitação newtoniana**. Publicação interna. Florianópolis: Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, 2018b. 149 p. Disponível em: <[www.evolucaodosconceitosdafisica.ufsc.br](http://www.evolucaodosconceitosdafisica.ufsc.br)>. Acesso em: 7 nov. 2019.
- PEDUZZI, L. O.; MARTINS, A. F.; FERREIRA, J. M. H. (Org.). **Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino**. Natal: EDUFRN, 2012.
- PEDUZZI, L. O. Q. **Às concepções espontâneas, a resolução de problemas e a história e filosofia da ciência em um curso de mecânica**. 850f. 1998. Tese (Doutorado em Ensino de Ciências Naturais) – Programa de Pós-Graduação em Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- PEREIRA, G. J. S. A.; MARTINS, A. F. P. A inserção de Disciplinas de Conteúdo Histórico-Filosófico no Currículo dos Cursos de Licenciatura em Física e em Química da UFRN: uma análise comparativa. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 28, n. 1, p. 229-258, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.5007/2175-7941.2011v28n1p229>>. Acesso em: 3 nov. 2019.
- PEREIRA, M. H. R. Introdução e notas. (p. I-LIII). In: PLATÃO. **A República**. Tradução Maria Helena da Rocha Pereira. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1949.
- PERNEIRO, J. C. Galileo e a Defesa da Cosmologia Copernicana: a sua visão do universo. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 26, n. 1, p. 173-198, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.5007/2175-7941.2009v26n1p173>>. Acesso em: 7 nov. 2019.
- PESA, M.; OSTERMANN, F. La ciencia como actividad de resolución de problemas: la epistemología de Larry Laudan y algunos aportes para las investigaciones educativas en ciencias. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 19, n. especial, p. 84-99, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.5007/%25x>>. Acesso em: 3 nov. 2019.
- PIAGET, J. **Epistemologia Genética**. São Paulo: Martins Fontes, 2007.

PIETROCOLA, M. A Matemática como Estruturante do Conhecimento Físico. **Caderno Catarinense do Ensino de Física**, Florianópolis, v.19, n.1, p.89-109, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.5007/%25x>>. Acesso: 16 set. 2020.

PIRES, A. S. T. **Evolução das idéias da física**. São Paulo: Livraria da Física, 2008.

PLATÃO. **Timeu-Críticas**. Introdução, tradução e notas, Rodolfo Lopes. Coimbra: Centro de Estudos Clássicos e Humanísticos, 2011.

\_\_\_\_\_. **A República**. Tradução Maria Helena da Rocha Pereira. 9. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1949.

PLUTARCO. **Sobre a Face Visível no Orbe da Lua**. Tradução Bernardo Mota. Coimbra: Centro de Estudos Clássicos e Humanísticos, 2010.

POINCARÉ, H. **The value of science**. Tradução George Bruce Halsted. New York: Dover Publications, 1958.

POSTMAN, N. **The end of education: redefining the value of school**. New York: Vintage Books/Random House, 1996.

PRAXEDE, G. P. **História da Ciência em um Curso de Licenciatura em Física: a gravitação newtoniana e a gravitação einsteiniana como exemplares**. 404 f. 2011. Tese (Doutorado em Educação Científica e Tecnológica) – Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

PTOLOMEU, C. **Las hipótesis de los planetas**. Tradução Eulalia Pérez Sedeño. Madrid: Alianza Editorial, 1987.

QUADROS, A. L.; SILVA, D. C.; SILVA, F. C. Formulação de questões a partir da leitura de um texto: desempenho dos estudantes de licenciatura em química da modalidade a distância. **Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 13, n. 1, p. 43-56, 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/epec/v13n1/1983-2117-epec-13-01-00043.pdf>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

RENN, J. A revolução de Galileu e a Transformação do Conhecimento. **Scientific American Brasil**, São Paulo, v. especial, n. 33, p. 6-15, 2009.

RUTHERFORD, F. J.; HOLTON, G.; WATSON, F. G. **The project physics course**. New York: Holt, Rinehart & Winston, 1970.

SANTOS, S; INFANTE -MALACHIAS, M. E. Interdisciplinaridade e Resolução de Problemas: algumas questões para quem forma futuros professores de ciências. **Educação & Sociedade**, v.29, n.103, p.557-579, 2008. Disponível em: <http://www.cedes.unicamp.br>. Acesso: 16 set. 2020.

SARAIVA, M. F. **Fundamentos de Astronomia e Astrofísica**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/Aula3-141.pdf>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

SCHEMMEL, M. Novas Visões de mundo. **Scientific American Brasil**, São Paulo, v. especial, n. 33, p. 16-25, 2009.

SCHIRMER, B. S.; SAUERWEIN, S. P. I. Recursos Didáticos e História e Filosofia da Ciência em sala de aula: uma análise em periódicos de ensino nacionais. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 14, n. 3, p. 61-77, 2014.

Disponível em:

<<http://132.248.9.34/hevila/Revistabrasileiradepesquisaemeducacaoemciencias/2014/vol14/n03/3.pdf>>. Acesso: 3 nov. 2019.

SEDEÑO, E. P. Introdução e notas. In: PTOLOMEU, C. **Las hipótesis de los planetas**. Madrid: Alianza Editorial, 1987.

SILVA, C. C. (Org.). **Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino**. São Paulo: Livraria da Física, 2006.

SOUZA, C. A.; DE BASTOS, F. P. Um Ambiente Multimídia e Resolução de Problemas de Física. **Ciência & Educação**, Bauru, v.12, n.3, p. 315-332, 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1516-73132006000300006>>. Acesso: 16 set. 2020.

SOBEL, D. **Um céu mais perfeito: como Copérnico revolucionou o cosmos**. Tradução Ana Cláudia Ferrari. São Paulo: Companhia da Letras, 2015.

SPECHT, C.; RIBEIRO, M. E. M.; RAMOS, M. G. Estudo das perguntas de professores e estudantes em aulas de Química. **THEMA**, Pelotas, v. 14, n. 1, p. 225-242, 2017. Disponível em: <<http://periodicos.ifsul.edu.br/index.php/thema/article/viewFile/395/293>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

STEVENS, R. **The Question as a Measure of Efficiency in Instruction: A critical study of classroom practice**. New York: Teachers College Columbia University, 1912.

TEIXEIRA, E. S.; FREIRE Jr., O.; EL-HANI, C. N. A Influência de uma Abordagem Contextual sobre as concepções acerca da Natureza da Ciência de Estudantes de Física. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 15, n. 3, p. 529-556, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1516-73132009000300006>>. Acesso: 14 out., 2020.

TEIXEIRA, E. S.; GRECA, I. M.; FREIRE, Jr. O. Uma revisão sistemática das pesquisas publicadas no Brasil sobre o uso didático de História e Filosofia da Ciência no ensino de física. In: PEDUZZI, L. O. Q.; MARTINS, A. F.; FERREIRA, J. M. H. (Org). **Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino**. Natal: EDUFRRN, p. 9-40, 2012.

TEIXEIRA, E. S.; PEDUZZI, L. O. Q.; FREIRE Jr, O. Os Caminhos de Newton para a Gravitação Universal: uma revisão do debate historiográfico entre Cohen e Westfall. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 27, n. 2, p. 215-254, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.5007/2175-7941.2010v27n2p215>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

TORRES FILHO, R. R. Demócrito. In: SOUZA, J. C. (Org.). **Os pré-socráticos: fragmentos, doxografia e comentários**. 2. ed. São Paulo: Abril Cultural, 1978. p. 348-355.

TORT, A. C.; NOGAROL, F. Revendo o debate sobre a idade da Terra. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 35, n. 1, p.1603-1609, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172013000100026>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

TOSSATO, C. R. Carta de Tycho a Johannes Kepler em Graz. **Scientiæ Studia**, São Paulo, v. 2, n. 4, p. 575-8, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ss/v2n4/a05v2n4.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

VAN ZEE, E. H. et al. Student and Teacher Questioning during Conversations about Science. **Journal of Research in Science Teaching**, Reston, v. 38, n. 2, p. 159-190, 2001. Disponível em: <[https://doi.org/10.1002/1098-2736\(200102\)38:2<159::AID-TEA1002>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/1098-2736(200102)38:2<159::AID-TEA1002>3.0.CO;2-J)>. Acesso em: 7 nov. 2019.

VASCONCELOS, C; LOPES, B; COSTA, N; MARQUES, L; CARRASQUINHO, S. Estado da arte na resolução de problemas em Educação em Ciência. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, v.6, n.2, p. 235-245, 2007. Disponível em: <[http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen6/ART1\\_Vol6\\_N2.pdf](http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen6/ART1_Vol6_N2.pdf)>. Acesso: 16 set. 2020.

VÁZQUEZ, A. et al. Consensos sobre a Natureza da Ciência: A Ciência e a Tecnologia na Sociedade. **Química Nova na Escola**, São Paulo, n. 27, p. 34-50, 2008. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc27/07-ibero-6.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

VELÁSQUEZ-TORIBIO, A. M.; OLIVEIRA, M. V. Primeiro modelo matemático da cosmologia: as esferas concêntricas de eudoxo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 41, n. 2, e20180096, p. 1-12, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2018-0096>>. Acesso em: 6 nov. 2019.

VIDEIRA, A. A. P. História e historiografia da ciência. **Revista Escritos**, Botafogo, v.1, n.1, p.11-158, 2007. Disponível em: <[http://escritos.rb.gov.br/numero01/FCRB\\_Escritos\\_1\\_6\\_Antonio\\_Augusto\\_Passos\\_Videira.pdf](http://escritos.rb.gov.br/numero01/FCRB_Escritos_1_6_Antonio_Augusto_Passos_Videira.pdf)>. Acesso: 6 set. 2020.

VILLANI, A. et al. Filosofia da ciência, história da ciência e psicanálise: Analogias para o ensino de Física. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 14, n. 1, p. 37-55, 1997. Disponível em: <<https://doi.org/10.5007/%25x>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

VILLANI, A. Conceptual change in science and science education. **Science Education**, London, v. 76, n. 2, p. 223-237, 1992. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF00869953>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

WESTFALL, R. S. **A Vida de Isaac Newton**. Tradução Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.

\_\_\_\_\_. **Force in Newton's Physics**. London: MacDonald; New York: American Elsevier, 1971.

WHITESIDE, D. T. Before the Principia: the maturing of Newton's thoughts on Dynamical Astronomy, 1664-1684. **Journal for the History of Astronomy**, v. 1, p. 5-19, 1970. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/002182867000100103>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

WILLEN, W. W.; CLEGG JÚNIOR, A. A. Effective Questions and Questioning: A Research Review. **Theory & Research in Social Education**, London, v. 4, n. 2, p. 153-161, 1986. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00933104.1986.10505518>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

YATES, F. A. **Giordano Bruno e a tradição hermética**. Tradução Yolanda Steidel de Toledo. São Paulo: Cultrix, 1964.

YAVETZ, I. A New Role for the Hippopede of Eudoxus. **Archive for History of Exact Sciences**, New York, v. 56, n. 1, p. 69-93, 2001. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/41134131>>. Acesso em: 6 nov. 2019

\_\_\_\_\_. On the Homocentric Spheres of Eudoxus. **Archive for History of Exact Sciences**, New York, v. 52, n. 3, p. 221-278, 1998. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/41134047>>. Acesso em: 6 nov. 2019.

ZANETIC, J. Revolução Científica na Evolução da Física. In: SIMPÓSIO SOBRE HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA, São Paulo. **Anais...** São Paulo, n. 23, p. 31-33, 1979.

## APÊNDICE – PLANO DE AULAS DA UNIDADE DE ENSINO

O plano de aulas da unidade de ensino sobre a história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física, fundamentada na solução de problemas, apresentada neste apêndice, contém 20 aulas de 50 minutos cada, planejadas em três momentos didáticos. Como destacado no capítulo 15, todos os recursos que acompanham essas aulas estão em anexo (1, 2, 3 e 4). Destarte, é importante sinalizar que, para uma apropriada implementação deste plano em sala de aula, é imprescindível que se faça uma observação atenta de todos os aspectos abordados no capítulo 15, juntamente com as descrições de cada momento das aulas, da dinâmica e dos comentários que são adicionadas no final de cada aula, quando devidamente pertinentes. De todo modo, vale ressaltar também que, mesmo teoricamente bem fundamentado, este plano de aulas não deve ser interpretado como uma prescrição didática, posto que o mesmo tem a exclusiva intenção de orientar a ação pedagógica. Em outras palavras, o professor ou a professora que se interessar por essa proposta de ensino, pode e deve se sentir a vontade para adaptá-la ao seu contexto de acordo com a sua experiência docente.

Nesse contexto, os temas de cada aula são: **AULA 1** – *A importância da pergunta no processo de construção de conhecimento científico*; **AULA 2** – *Noções epistemológicas laudadianas acerca da ciência como uma atividade de solução de problemas empíricos e de problemas conceituais*;

<b>AULA 1</b>	<b>Tema:</b> <i>A importância da pergunta no processo de construção de conhecimento científico</i>
<b>Primeiro Momento (5 min.)</b>	Problematização acerca da importância da pergunta no processo de construção de conhecimento científico. Inicialmente, essa problematização é realizada mediante a exposição de um vídeo curto sobre a pergunta na ciência e em outros contextos (tempo do vídeo, 10 minutos). Este vídeo é montado a partir de um trecho inicial (abertura) do filme “O Guia do Mochileiro das Galáxias”; um trecho de uma entrevista com o físico norte-americano Richard Feynman (1918 – 1988) – denominada de “Imãs e perguntas corretas”; e uma propaganda sobre as perguntas da ciência, produzida pelo canal de TV <i>Futura</i> – “Vídeo do filme publicitário: Perguntas”. O link do vídeo encontra-se disponível em: < <a href="https://youtu.be/V6RfZNnsMuw">https://youtu.be/V6RfZNnsMuw</a> >.
<b>Segundo Momento (10 min.)</b>	Discussão da importância da pergunta na ciência veiculada pelo vídeo, enfatizando, especialmente, seu significado como principal instrumento intelectual de investigação científica e produção de conhecimento. Neste momento, é importante indagar o que os estudantes captaram sobre esse significado e permitir que eles expressem suas ideias espontaneamente, interagindo entre si e com o professor (a).
<b>Terceiro Momento (30 min.)</b>	Sondagem das ideias dos estudantes sobre a pergunta, mediante o registro escrito de um <b>Opinário 1</b> (ANEXO 1): 1. Que reflexão sobre a pergunta os trechos dos vídeos despertaram em você? 2. Que tipo de análise crítica pode ser realizada sobre a afirmação, “ <i>as perguntas constituem o principal instrumento intelectual disponível para a ciência</i> ”? 3. Que considerações críticas são possíveis tecer sobre a importância da elaboração de perguntas e respostas no âmbito de sala de aula? Discorra, também, sobre os prós e contras desse recurso; 4. Que aspectos você considera relevante ou necessário em uma pergunta? O que é preciso para elaborá-la (e.g., procedimentos metodológicos, imaginação, dúvidas, curiosidades, etc.)?
<b>Tempo Total</b>	<b>50 minutos</b>

## DINÂMICA DA AULA 1

O objetivo da aula é problematizar a importância da pergunta no processo de construção de conhecimento científico. No **primeiro momento**, e antes de rodar o vídeo, é importante fazer uma breve explanação sobre o contexto de seus trechos (uma descrição é colocada ao final). No **segundo momento**, cria-se um ambiente de interação entre estudantes e com o (a) professor (a), mediante questionamentos sobre o conteúdo do vídeo. Especialmente, indaga-se sobre o significado da mensagem que cada trecho transmite acerca da importância da pergunta na ciência e para a produção de conhecimento científico. No **terceiro e momento**, para registrar essas impressões, os estudantes são convidados a responder as questões do **opinário 1**. Destaca-se que esse momento de problematização vai continuar na segunda e terceira aulas. Para tanto, inicia-se a segunda aula retomando-se o item 2 e, na terceira, os itens 3 e 4.

## COMENTÁRIOS IMPORTANTES DA AULA 1

Considerando que a problematização sobre qualquer assunto/conteúdo/tema, em sala de aula, é sempre um grande desafio pedagógico, esse planejamento tem apenas uma única e exclusiva intenção: fornecer um singelo parâmetro para pensar esta aula, a partir de seu objetivo principal. Por isso, a forma didática e/ou pedagógica para gerir a classe e o conteúdo da aula, fica condicionada a experiência docente e a realidade da turma em cada contexto de ensino. Nesse sentido, é válido observar que tanto a organização da aula quanto sua dinâmica não representa uma prescrição direta de como esta aula e as demais devem ser, obrigatoriamente, conduzidas. Isso significa dizer também que esse planejamento está atento e respeitoso à autonomia do professor ou professora, que por ele se orientar.

### BREVE DESCRIÇÃO DO CONTEXTO DOS TRECHOS DO VÍDEO DA AULA 1

O contexto do primeiro trecho (2.7 minutos) remete a sinopse inicial do filme “O Guia do Mochileiro das Galáxias”. Nesta sinopse, a humanidade, que está sedenta por uma única resposta para todas as questões (da Ciência, da vida humana e do Universo), se dirige a um supercomputador para obter tal resposta. Mas, para a surpresa da humanidade, a resposta fornecida (42) necessita indispensavelmente de uma pergunta, cuja forma e suposição são desconhecidas. No segundo trecho (7 minutos), encontra-se uma entrevista com o físico norte-americano Richard Feynman (1918 – 1988), denominada de “Ímãs e perguntas corretas”, na qual um jornalista pergunta a Feynman: *Por que dois ímãs colocados próximos um do outro se atraem?* Diante dessa pergunta, ao invés de respondê-la, Feynman analisa a complexidade da pergunta, destacando sua forma – o objeto da pergunta em questão, neste caso, a atração entre dois ímãs – e sua suposição – o que a pergunta exige como resposta, isto é, a causa da atração entre os ímãs. Com isso, ele procura mostrar que apesar da pergunta ser interessante, uma resposta convincente para o entrevistador – explicar cientificamente, mas com profundidade conceitual, o que causa a atração dos ímãs – dependerá do que ele acredita e toma para si como verdade, bem como da sua própria formação estudantil. Por exemplo, se o entrevistador fosse um estudante de física, Feynman poderia adentrar em aspectos conceituais da Física, que envolve assuntos da estrutura e da natureza eletromagnética da matéria. Mas

como não é o caso, depois de analisar a pergunta do entrevistador, Feynman fala, apenas, que a atração entre ímãs com polos opostos é devido à existência de uma força magnética. Por fim, no terceiro trecho do vídeo (27 segundos), que remete ao “Vídeo do filme publicitário: Perguntas”, produzido pelo canal de TV *Futura*, o qual, após a passagem de imagens intercaladas com indagações, do tipo, “*até hoje os cientistas querem saber como a vida começou*”; “*se comer ovo faz bem ou faz mal*”, etc., finaliza-se com uma mensagem que diz o seguinte: “*quem move o mundo não são as respostas, mas sim as perguntas*”.

<b>AULA 2</b>	<b>Tema:</b> <i>Noções epistemológicas laudadianas acerca da ciência como uma atividade de solução de problemas empíricos e de problemas conceituais</i>
<b>Primeiro Momento (10 min.)</b>	Apresentação das respostas dos estudantes para o item 2 do opinário, a saber – <i>Faça uma análise crítica da seguinte afirmação: “as perguntas constituem o principal instrumento intelectual disponível para a ciência”</i> . Neste momento, é importante criar um ambiente descontraído, para que os estudantes expressem voluntariamente as suas respostas.
<b>Segundo Momento (35 min.)</b>	Apresentação dialogada (em <i>PowerPoint</i> – ANEXO 2) dos principais fundamentos epistemológicos da visão de ciência de Larry Laudan, como uma atividade de solução de problemas: motivações, objetivo, pressupostos conceituais, foco analítico e fonte de dados; sua taxonomia de problemas científicos, classificados em problemas empíricos e problemas conceituais e suas subclassificações – problemas empíricos resolvidos, não resolvidos e anômalos e problemas conceituais internos e externos (dificuldades intracientíficas, normativas e de visão de mundo); os exemplos da história da física que substantivam esses problemas; e, por fim, seu conceito de tradição de pesquisa.
<b>Terceiro Momento (5 min.)</b>	Finalização da aula com a indicação da leitura do <b>Texto I</b> – <i>Dos babilônios aos compromissos metodológicos e ontológicos da tradição de pesquisa grega antiga: da origem dos problemas empíricos aos modelos cosmológicos de Pitágoras de Samos e Filolau de Crotona</i> . Os estudantes são informados que essa leitura é obrigatória e que ela vai auxiliar na compreensão sobre como operacionalizar a estratégia de elaboração de perguntas, respostas e do parecer, apresentados na aula seguinte.
<b>Tempo Total</b>	<b>50 minutos</b>

## DINÂMICA DA AULA 2

Considerando o item 2 do opinário – *Faça uma análise crítica da seguinte afirmação: “as perguntas constituem o principal instrumento intelectual disponível para a ciência”*, no **primeiro momento** da aula, pede-se que os estudantes exponham suas respostas, de forma voluntária, criando um ambiente de discussão direcionado para o tema da aula – a ciência como uma atividade de solução de problemas. Nesse momento, é importante despertar a curiosidade dos estudantes, afirmando que, nessa perspectiva, eles terão a oportunidade de conhecer a taxonomia dos problemas científicos de Larry Laudan, a qual permite classificar as **perguntas mais importantes da ciência**, no domínio da astronomia, da cosmologia e da física, desde a Grécia Antiga (século VI antes de Cristo) até a revolução científica do século XVII. Perguntas essas que fomentaram, especialmente, o nascimento da nova física, responsável por suplantando a física aristotélica e sua visão de mundo, e suscitaram o advento da mecânica celeste newtoniana e sua teoria da gravitação universal. No **segundo momento**, volta-se a atenção para a apresentação e exposição dialogada dos principais aspectos gerais da epistemologia de Larry Laudan, procurando enfatizar o contexto de sua obra, suas

motivações, seus pressupostos teóricos, objetivos, foco analítico e a sua classificação de problemas empíricos e problemas conceituais – definições e exemplos. Para cada exemplo de problema, existe um episódio da história da astronomia, da cosmologia e da física que o fundamenta. Por exemplo, no domínio da astronomia, pode-se adiantar para os estudantes que a pergunta mais importante da ciência, no contexto investigativo grego, a qual exemplifica um tipo de *problema empírico não resolvido*, foi formulada por Platão, no séc. IV a. C, a saber: *Quais são os movimentos circulares uniformes e ordenados que possam ser tomados como hipóteses para explicar os movimentos aparentes dos planetas?* Para o caso da física, no contexto do século XIX e XX, o fenômeno do Movimento Browniano é outro exemplo de um *problema empírico resolvido* teoricamente por Einstein – com a teoria cinética-molecular dos gases – contribuindo, assim, para materializar a crença na existência do átomo.

Nos problemas conceituais internos, têm-se as críticas conceituais lançadas pelo professor de Michael Faraday, Dr. Robert Hare, em 1874, sobre seus estudos de eletricidade e magnetismo. Bem como para os problemas conceituais externos (no domínio da cosmologia). No componente de visão de mundo, têm-se os conflitos entre a doutrina aristotélica e a visão de mundo geocêntrica – incorporada pela religião judaico-cristã e pela prática da astronomia, da cosmologia e da física, no período medieval, antes, durante e depois de Copérnico – e as implicações lógicas, filosóficas, físicas, metafísicas, da visão heliocêntrica defendida pelo sistema astronômico copernicano, juntamente com a importante defesa do movimento da Terra. Ressalta-se que, o exemplo da física encontra-se (na apresentação em *PowerPoint* (ANEXO 2), no final desta unidade de ensino – os demais exemplos os estudantes vão encontrar na leitura dos textos). É preciso assinalar também que, as ideias de Laudan se aplicam em exemplos históricos de outras áreas científicas, como a Biologia, a Geologia e a Química, não se restringindo somente às três áreas aqui abordadas. No **terceiro momento**, finaliza-se a aula com a indicação da leitura do **Texto I**. Os estudantes são orientados a fazer uma leitura do texto, identificando suas principais ideias, os contextos de investigação da astronomia babilônica e da astronomia e cosmologia grega antiga, especialmente, os aspectos que caracterizam esses contextos, bem como os conceitos e pressupostos científicos, filosóficos e metafísicos que aparecem na cosmologia de Pitágoras e de Filolau de Crotona. Destaca-se que essa leitura vai auxiliar na compreensão dos estudantes tanto da estratégia de ensino, proposta na próxima aula, quanto na operacionalização da mesma, mediante a elaboração de perguntas, respostas e do parecer (avaliação das perguntas).

<b>AULA 3</b>	<b>Tema:</b> <i>A Estratégia Didática de Elaboração de Perguntas, Respostas e do Parecer de Avaliação das Perguntas</i>
<b>Primeiro Momento (10 min.)</b>	<p>Está aula tem como objetivos: apresentar a estratégia de elaboração de perguntas, respostas e do parecer de avaliação das perguntas. Em face disso, nesse primeiro momento, procura-se discutir com os estudantes suas resposta para os itens 3 e 4 do opinário, da mesma forma que se procedeu na aula anterior, com o item 2. Os itens 3 e 4 são: 3. <i>Teça considerações críticas sobre a importância da elaboração de perguntas e respostas no âmbito da sala de aula. Discorra, também, sobre os prós e contras desse recurso;</i> 4. <i>Que aspectos você considera relevante ou necessário em uma pergunta? O que é preciso para elaborá-la (e.g., procedimentos metodológicos, imaginação, dúvidas, curiosidades, etc.)?</i> De acordo com as respostas dos estudantes, especialmente, para o item 4, procura-se direcioná-los, afirmando que o tema e o conteúdo da aula visam justamente auxiliar nessa tarefa.</p>
<b>Segundo Momento (30 min.)</b>	<p>Dedicado a apresentação (em <i>PowerPoint</i> – ANEXO 3) da estratégia didática da elaboração de perguntas e respostas e do parecer de avaliação - feedback por pares. É importante entregar formalmente, aos estudantes, tanto a lista com esses objetivos gerais e específicos, quanto à própria orientação do parecer e seus critérios avaliativos. Essa estratégia reside nas seguintes orientações: <b>(i)</b> retomada dos objetivos educacionais representados pelas seis categorias gerais de ações verbais (conhecer, entender, aplicar, analisar, criar/sintetizar, avaliar) e suas subcategorias: <b>conhecer:</b> apontar, citar, definir, descrever, distinguir, enumerar, enunciar, especificar, estabelecer, exemplificar, expressar, identificar, relatar, selecionar, etc.; <b>entender:</b> explicar, ilustrar, representar, diferenciar, distinguir, exprimir, interpretar, localizar etc.; <b>aplicar:</b> esboçar, estruturar, extrapolar, generalizar, interpretar, organizar, ordenar, comparar, etc.; <b>analisar:</b> criticar, correlacionar, relacionar, debater, etc.; <b>criar/sintetizar:</b> comunicar, construir, documentar, escrever, esquematizar, formular, produzir, propor, sistematizar, etc.; e <b>avaliar:</b> argumentar, contrastar, escolher, julgar, valorizar, validar. <b>(ii)</b> mediante esses objetivos educacionais gerais e específicos e a leitura do texto de referência da aula, os estudantes são instruídos a elaborar três perguntas, cujas formas e suposições comportem uma ação verbal específica de uma das seis categorias gerais; <b>(iii)</b> A partir da orientação (ii), os parâmetros para cada pergunta residem em elaborar: 1. Uma pergunta cuja resposta encontra-se no texto; 2. Uma pergunta cuja resposta encontra-se margeando o texto; e 3. Uma pergunta cuja resposta encontra-se para além do texto. Além disso, orienta-se aos estudantes destacarem em cada pergunta, a parte do texto, parágrafo, ou página, que permite pensar ou encontrar a resposta de cada uma delas; <b>(iv)</b> Por fim, sobre o parecer de avaliação das perguntas, os alunos são orientados a avaliar as perguntas de seus colegas, a partir dos seguintes critérios: 1. Grau de dificuldade para entender a pergunta - formulação, clareza e objetividade; 2. Grau de dificuldade para encontrar a resposta; 3. Grau de curiosidade que a pergunta desperta sobre o assunto do texto que ela remete; e, por fim, 4. Emissão de um comentário geral sobre as perguntas elaboradas.</p>
<b>Terceiro Momento (10 min.)</b>	<p>Considerando, hipoteticamente, que os estudantes tenham conseguido elaborar perguntas, semelhantes aos exemplos apresentados, neste momento, finaliza-se a aula com a entrega de mais um bloco de três perguntas a cada estudante e a indicação da leitura do <b>Texto II – A cosmologia de Platão e a sistematização dos principais problemas empíricos astronômicos da tradição de pesquisa grega antiga.</b></p>
<b>Tempo Total</b>	<b>50 minutos</b>

### DINÂMICA DA AULA 3

Esta aula se inicial (**primeiro momento**) com a retomada dos itens 3 e 4 do **opinário 1**, pedindo que os estudantes expressem voluntariamente suas opiniões. Chamando à atenção

da turma para – o item 4. *Que aspectos você considera relevante ou necessário em uma pergunta? O que é preciso para elaborá-la (e.g., procedimentos metodológicos, imaginação, dúvidas, curiosidades, etc.)?* – procura-se direcioná-los para o tema e conteúdo da aula, afirmando que eles terão a oportunidade de conhecer a estratégia didática de elaboração de perguntas e respostas do parecer avaliativo das perguntas, que será adotada durante toda a unidade de ensino.

No **segundo momento** da aula, apresenta-se um quadro (*em PowerPoint* – ANEXO 3) dos objetivos educacionais gerais da taxonomia de Bloom, com as ações verbais específicas de cada uma delas. Nesse momento, é informado aos estudantes que essas ações verbais específicas serão disponibilizadas para eles, juntamente com as orientações da estratégia de elaboração de perguntas e respostas e do parecer de avaliação das perguntas (como descritos no quadro do segundo momento de aula acima).

No **terceiro momento**, para que os estudantes compreendam a operacionalização da atividade, são apresentados exemplos para cada categoria (conhecer, entender, aplicar, analisar, criar/sintetizar, avaliar) – descrito no quadro do terceiro momento acima. No ato da apresentação de cada um desses exemplos, é solicitado que os estudantes respondam tais perguntas de modo oral, a partir de suas compreensões do texto indicado para subsidiar esse momento da aula. Com base nas respostas dos estudantes, procura-se retomar os quatro critérios de avaliação das perguntas – *feedback* por pares – para construir com os eles, um parecer sobre esses exemplos. O objetivo é que eles compreendam a operacionalização da atividade que irão executar sozinhos, durante as demais aulas da unidade. Finaliza-se a aula indicando a leitura e a elaboração de perguntas do **Texto II**.

<b>AULA 4</b>	<b>Tema:</b> <i>A cosmologia de Platão e a sistematização dos principais problemas empíricos astronômicos no contexto da tradição de pesquisa grega antiga</i>
<b>Primeiro Momento (10 min.)</b>	<p>Comentário geral sobre as perguntas elaboradas pelos estudantes, seguido de uma breve apresentação das perguntas selecionadas previamente pelo professor. É relevante observar que, considerando o contexto real de sala de aula, a quantidade de exemplos apresentados no início da aula pode variar consideravelmente, para mais ou para menos. Posto que ela vá depender muito do êxito da assimilação dos estudantes da atividade de elaboração de perguntas e de seus critérios (assunto da Aula 3).</p> <p><b>Ação verbal conhecer:</b> Quais foram os três importantes conhecimentos sobre os fenômenos celestes transmitidos do modelo cosmológico de Filolau para o pensamento cosmológico platônico, que podem ser citados, descritos, identificados, enumerados, especificados e/ou exemplificados no texto? [<b>Resposta contida no texto</b>].</p> <p><b>Ação verbal entender:</b> Que interpretação é possível exprimir, a partir da frase, “Platão adotou os princípios filosóficos e metafísicos pitagóricos da ordenação do cosmos, sem se preocupar com a realidade objetiva dos dados observacionais”? [<b>Resposta margeando o texto</b>].</p> <p><b>Ação verbal aplicar:</b> Que elementos conceituais, filosóficos, metafísicos e religiosos esboçam, estruturam, organizam e/ou ordenam o modelo cosmológico de Platão? [<b>Resposta contida no texto</b>].</p> <p><b>Ação verbal analisar:</b> Que tipo de análise crítica sobre a natureza da ciência é possível fazer, a partir da existência das duas correntes de pensamento epistemológicas (instrumentalista e realista) no contexto da tradição de pesquisa grega? [<b>Resposta para além do texto</b>].</p> <p><b>Ação verbal criar/sintetizar:</b> Sintetize os principais compromissos ontológicos e metodológicos da tradição de pesquisa grega, no contexto da cosmologia de Platão. [<b>Resposta contida no texto</b>].</p> <p><b>Ação verbal avaliar:</b> Que argumentos podem ser apresentados acerca do papel da geometria na astronomia, na cosmologia e na física, nos tempos atuais, considerando o valor que Platão dava a geometria, ao ter escrito na porta de sua Academia, a frase: “Que ninguém ultrapasse a minha porta sem conhecer a geometria”? [<b>Resposta para além do texto</b>].</p>
<b>Segundo Momento (35 min.)</b>	Discussão integral do texto. Neste momento, é importante que os estudantes: comentem suas impressões gerais sobre o texto; apresentem possíveis dificuldades de leitura, bem como os aspectos do conteúdo que chamaram mais atenção, etc. Em conformidade com essa explanação, aproveita-se para direcionar os estudantes para a discussão mais específica do conteúdo, retomando cada uma das perguntas já apresentadas. A ideia é respondê-las com os estudantes e cobrir todos os aspectos relevantes que vão surgindo durante a discussão.
<b>Terceiro Momento (5 min.)</b>	Entrega de três perguntas a cada estudante, que serão avaliadas mediante os critérios do parecer do <i>feedback</i> por pares: 1. Grau de dificuldade de entender a pergunta – formulação, clareza e objetividade; 2. Grau de dificuldade de encontrar a resposta; 3. Grau de curiosidade que a pergunta desperta sobre o assunto do texto que ela remete; 4. Emissão de um comentário geral; e indicação da leitura do <b>Texto III</b> – <i>A origem dos problemas conceituais internos implicados na teoria planetária das esferas concêntricas de Eudoxo de Cnido</i> .
<b>Tempo Total</b>	<b>50 minutos</b>

## DINÂMICA DA AULA 4

Esta aula é iniciada, **primeiro momento**, com um comentário geral sobre as perguntas que os estudantes elaboraram, observando dois pontos: a mobilização das ações verbais específicas de cada categoria dos objetivos educacionais; e a atenção para elaboração das perguntas, mediante os três critérios da atividade – respostas no, margeando e para além do texto – especificando, também, a(s) página (s) e/ou o(s) fragmento (s) que permitem acessar e/ou pensar nas respostas. Em seguida, **segundo momento** da aula, são apresentadas as perguntas que foram avaliadas previamente pelo professor ou pela professora. Nesse momento, aproveita-se para pedir que os estudantes façam comentários sobre o texto, apresentando suas impressões gerais, dificuldades de leitura, aspectos interessantes do conteúdo, dentre outras observações. Para tornar esse momento mais dinâmico possível, bem como direcionar a discussão integral do texto, procura-se criar uma interlocução entre os comentários dos estudantes, retomando as perguntas já apresentadas. Feito isso, finaliza-se a aula, **terceiro momento**, com a indicação da leitura do **Texto III** e a entrega de um bloco de três perguntas, que serem avaliadas e respondidas, pelos estudantes, com os critérios do *feedback* por pares.

## COMENTÁRIOS IMPORTANTES SOBRE A AULA 4

Tendo em vista o fato de ser a primeira vez que os estudantes irão elaborar as perguntas com o critério da atividade, é possível que em um primeiro momento, o professor ou a professora não consiga selecionar a quantidade de perguntas que satisfaça cada uma das categorias de ações verbais. Por isso, o conjunto de perguntas para esse texto e os demais (ANEXO 4), elaborado hipoteticamente para auxiliar no planejamento desta aula, tem um propósito especial. Por um lado, ele ajuda no monitoramento das perguntas elaboradas pelos estudantes, por outro, auxiliar o professor ou a professora a conduzir a discussão do texto em sala de aula. Além de pode também corroborar com o planejamento na avaliação dos alunos na metade e no final da unidade de ensino. Por exemplo, ao completar nove aulas, na décima, pode-se fazer uma avaliação diagnóstica, com o objetivo de sondar se os estudantes estão efetivamente alcançando os objetivos listados na ementa do curso.

AULA 5	<b>Tema:</b> <i>A origem dos problemas conceituais internos implicados na teoria planetária das esferas concêntricas de Eudoxo de Cnido</i>
<b>Primeiro Momento (15 min.)</b>	<p>Comentário geral sobre a atividade de avaliação das perguntas, mediante <i>feedback</i> por pares, realizada pelos estudantes. Neste momento, aproveita-se para sondar com os estudantes, se conseguiram aplicar todos os critérios da atividade e se tiveram dificuldades. A partir disso, procura-se sanar possíveis dúvidas e ajudá-los, visando à realização dessa atividade, no texto desta e nos das próximas aulas. Feito isso, são apresentados alguns exemplos das perguntas elaboradas, para a discussão integral do texto. Durante essa exposição, e considerando que os estudantes estão fazendo isso pela segunda vez, procura-se verificar se ainda persistem com dificuldades em aplicar os critérios da atividade. Em caso de ampla compreensão dos estudantes, é possível esperar, hipoteticamente, um aumento no número de exemplos para cada categoria das ações verbais (o que é desejável).</p> <p><b>Ação verbal conhecer:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Em que parte do texto é possível localizar os problemas conceituais internos gerados pela teoria das esferas concêntricas de Eudoxo? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Como são definidos os cinco critérios epistêmicos de avaliação das teorias científicas? [<b>Resposta contida no texto</b>]; Que aspectos, características e/ou princípios da natureza da ciência podem ser exemplificados a partir do texto? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Que tipo de relação é possível estabelecer entre a descoberta da natureza esférica da Terra e a teoria planetária de Eudoxo de Cnido? [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal entender:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que explicações foram dadas pela teoria de Eudoxo para as soluções do movimento da Lua, do Sol e dos cinco planetas? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Que discussão é possível fazer a partir da passagem de texto, a seguir? “[...] a teoria das esferas concêntricas de Eudoxo não explicava, nem previa nenhum tipo de resultado independente. Por isso ela não podia ser testada, uma vez que os parâmetros intrínsecos do modelo podiam ser modificados, sempre que as observações não se encaixavam nas previsões”. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>3. Que diferenças epistêmicas estão presentes nas funções de uma teoria científica (explicativa, descritiva, preditiva)? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Que ressalva deve ser feita antes de se utilizar os critérios epistêmicos para avaliar as credenciais científicas da teoria planetária de Eudoxo? [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal aplicar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que tipo de interpretação pode ser feita na passagem de texto, a seguir? “[...] a convicção humana profundamente enraizada de que a simplicidade e a beleza são critérios de verdade manteve viva a esperança de que as esferas homocêntricas, embora com algumas modificações, possam representar corretamente o plano do criador”. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2. Que comparações podem ser estabelecidas entre as explicações dadas por Aristóteles, Simplicio, e as explicações da teoria de Eudoxo? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Que principais contribuições de Eudoxo, para a ciência, podem ser selecionadas no texto, além da sua teoria planetária? [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal analisar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Quais problemas conceituais internos enfrentados pela teoria planetária de Eudoxo podem ser sistematizados no texto? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Que tipo de crítica pode ser feita em relação à descoberta do ano tropical de 365 dias e 6 horas, por Eudoxo, e a falta de consistência de sua teoria com esta observação? [<b>Resposta para além do texto</b>];</li> <li>3. Que tipo de debate científico a importância das observações telescópicas de Galileu suscita, frente ao problema do brilho aparente dos planetas internos e externos? [<b>Resposta para além do texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal criar/sintetizar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sintetize a partir dos escritos de Aristóteles e de Simplicio acerca da teoria de Eudoxo, uma resposta para as perguntas: Quais são os movimentos circulares uniformes</li> </ol>

	<p>ordenados que possam ser tomados como hipóteses, para explicar os movimentos aparentes dos planetas? Como se consegue reduzir o complexo e variável movimento planetário a uma simples ordem? <b>[Resposta contida no texto];</b></p> <p>2. Que mensagem pode ser comunicada pela teoria de Eudoxo, levando em consideração os critérios epistêmicos e a importância dessa teoria para o desenvolvimento da tradição de pesquisa grega? <b>[Resposta contida no texto];</b></p> <p>3. Escreva sobre o significado de uma hipótese <i>ad hoc</i> e sua implicação sobre algum aspecto, característica e/ou princípio da natureza da ciência encontrado no texto. <b>[Resposta contida no texto].</b></p> <p><b>Ação verbal avaliar:</b></p> <p>1. Que argumentos sobre a natureza da ciência são possíveis construir, a partir da passagem do texto, a seguir?  “[...] As contribuições de Eudoxo revestem-se de máxima importância para o desenvolvimento científico, pois marcam o deslocamento dos estudos astronômicos pautados em especulações filosóficas, para a construção da primeira teoria astronômica planetária, elaborada para resolver os problemas empíricos da tradição de pesquisa grega, na perspectiva instrumentalista matemática” <b>[Resposta margeando o texto];</b></p> <p>2. Que julgamento científico pode ser realizado sobre a validade dos cinco critérios epistêmicos dentro e fora do contexto da teoria planetária de Eudoxo? <b>[Resposta para além do texto];</b></p> <p>3. Que valor científico pode ser atribuído à teoria de Eudoxo e as suas explicações dos problemas empíricos astronômicos? <b>[Resposta para além do texto].</b></p>
<p><b>Segundo Momento (30 min.)</b></p>	<p>Discussão do texto, de modo geral e específico. Neste momento, é importante solicitar, inicialmente, que os estudantes façam comentários sobre o texto, apontando suas impressões gerais; possíveis dificuldades de compreensão durante a leitura; aspectos do conteúdo que chamaram mais atenção, etc. Em conformidade com essa explanação, aproveita-se para direcionar os estudantes para a discussão mais específica do conteúdo, retomando cada uma das perguntas apresentadas no primeiro momento da aula. A ideia é respondê-las em conjunto com os estudantes e cobrir todos os aspectos relevantes que vão surgindo durante a discussão.</p>
<p><b>Terceiro Momento (5 min.)</b></p>	<p>Considerando, hipoteticamente, que os estudantes tenham conseguido elaborar perguntas, semelhantes aos exemplos apresentados, neste momento, finaliza-se a aula com a entrega de mais um bloco de três perguntas a cada estudante e a indicação da leitura do <b>Texto IV – A origem dos problemas conceituais externos implicados na visão de mundo e na malha conceitual aristotélica.</b></p>
<p><b>Tempo Total</b></p>	<p><b>50 minutos</b></p>

## DINÂMICA DA AULA 5

Esta aula se inicia, **primeiro momento**, com o professor ou a professora sondando os estudantes sobre a execução da atividade de avaliação das perguntas – *feedback* por pares – do texto anterior. Neste momento, é importante verificar se eles/elas tiveram dificuldades em executar os critérios de avaliação ou não. Feito isso, procura-se, assim como na aula anterior, apresentar alguns exemplos de perguntas elaboradas. Destaca-se que, à medida que os/as estudantes forem realizando essa atividade, ao longo das aulas, é bem provável que aumente o número de exemplos para cada categoria das ações verbais.

No **segundo momento** da aula, procura-se intercalar os comentários gerais sobre o texto, colocando as perguntas selecionadas para desenvolver uma discussão integral específica do conteúdo do texto. É de fundamental relevância que, durante essa discussão, os/as estudantes consigam compreender e discutir os fundamentos científicos, filosóficos, metafísicos, metodológicos e ontológicos da tradição de pesquisa grega que alicerçam a teoria de Eudoxo, na perspectiva da investigação matemática instrumentalista platônica. Bem como, mais importante ainda, destacar como surgem os problemas conceituais internos em uma teoria; de que maneira esses problemas podem ser ilustrados na história da ciência da astronomia, da cosmologia e da física, tomando como aporte os cinco critérios epistêmicos (*precisão, consistência, abrangência, simplicidade e fecundidade*) instituídos pela epistemologia de Thomas Kuhn, para avaliar a aceitação de uma teoria pela comunidade científica. Ao mesmo tempo, que é fundamental estabelecer um parâmetro de validade deste julgamento, em cada contexto histórico, visto que os valores epistêmicos e/ou critérios de cientificidade, na ciência, mudam com o tempo. Com isso, finaliza-se esta aula, **terceiro momento**, com a entrega de mais um bloco de três perguntas a cada estudante e a indicação da leitura do **Texto IV**.

## COMENTÁRIOS IMPORTANTES DA AULA 5

Sobre o aumento do número de perguntas e sua função na discussão do texto, espera-se que à medida que os/as estudantes vão se familiarizando com as atividades, consigam melhorar a qualidade e o número de perguntas. Por isso, além de auxiliar o/a professor/a na discussão, é possível vislumbrar outras perguntas pertinentes, que possivelmente não foram contempladas pela atividade.

<p><b>AULA 6</b></p>	<p><b>Tema:</b> <i>A origem dos problemas conceituais externos implicados na visão de mundo e na malha conceitual aristotélica</i></p>
<p><b>Primeiro Momento (10 min.)</b></p>	<p>Dedicado a recolher as avaliações das perguntas do texto anterior, certificando-se que os estudantes tenham compreendido e sanado todas as dúvidas referentes a essa atividade e a apresentar os exemplos de algumas perguntas do texto desta aula, selecionadas previamente. Considerando o êxito dos/as estudantes, espera-se contar com exemplos de perguntas, cada vez mais elaboradas, que contemplem os assuntos apresentados nas perguntas hipotéticas, a seguir.</p> <p><b>Ação verbal conhecer:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que características podem ser apontadas e/ou apresentadas no texto, acerca das cosmologias de Aristóteles, Platão, Filolau e Pitágoras? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Que argumentos podem ser apresentados no texto, como exemplos da defesa da mobilidade da Terra? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Que principais aspectos e implicações acerca dos mundos supralunar e sublunar podem ser descritos pela cosmologia de Aristóteles? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>4. Que principais conceitos, fundamentos e pressupostos definem a visão de mundo de Aristóteles? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>5. Como se define o conceito de universo finito e pleno de Aristóteles? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>6. Como pode ser exemplificada a assimilação por Aristóteles dos conceitos metafísicos de simplicidade, harmonia e beleza? [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal entender:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que marco epistemológico, no contexto da tradição de pesquisa grega antiga, pode ser representado a partir da passagem do texto, a seguir? “[...] Aristóteles procurava uma ideia na sua realização concreta nos fenômenos da natureza, e todos os resultados da experiência e da observação, portanto, chamavam sua atenção” [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2. Que diferenças epistemológicas essenciais podem ser ilustradas frente às preocupações filosóficas de Aristóteles e de Platão, em relação ao problema do conhecimento (ideias) e mundo da experiência sensível, mediada pelos órgãos dos sentidos? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Que explicação pode ser dada acerca das implicações lógicas da aplicabilidade do primeiro motor de Aristóteles, em sua cosmologia? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>4. Que discussão crítica pode ser feita acerca do significado metafísico das palavras Amor e Ódio, para os gregos e de sua incorporação teológica? [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>5. Explique o significado ontológico encontrado nos conceitos de vazio, matéria e espaço, na cosmologia aristotélica. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>6. Explique a função do movimento natural na cosmologia de Aristóteles. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal aplicar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. De que maneira o modelo cosmológico de Aristóteles está ordenado/estruturado? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Que tipos de interpretações encontram-se associadas ao conceito de primeiro motor na cosmologia de Aristóteles? [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>3. Que tipo de comparação pode ser feita entre as prerrogativas de Aristóteles, Platão e dos pitagóricos, sobre o problema do conhecimento (ideias)? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>4. Que tipo de extrapolação pode ser feita mediante a implicação máxima do problema conceitual externo do componente visão de mundo, para o desenvolvimento da astronomia, da cosmologia e da física? [<b>Resposta para além do texto</b>];</li> <li>5. Que tipo de relação pode ser estabelecida entre o conceito de universo finito e pleno com o problema conceitual externo da visão de mundo? [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol>

	<p><b>Ação verbal analisar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que tipo de crítica de cunho lógico é possível lançar contra o conceito de primeiro motor aristotélico? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Que correlação religiosa e cultural está implicada com o conceito de primeiro motor aristotélico? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Que principais elementos do texto podem ser sistematizados, a partir da relação direta entre o problema conceitual externo do componente visão de mundo, com os conceitos, fundamentos e implicações culturais, filosóficas, metafísicas e religiosas? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>4. Que análise crítica pode ser feita, ao se julgar a tentativa dos filósofos gregos em suplantarem o <i>materialismo</i> e a implicação teológica e metafísica da visão de mundo aristotélica, ligada à unicidade do universo? [<b>Resposta margeando o texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal criar/sintetizar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que síntese pode ser feita, a partir das explicações dadas por Aristóteles para os problemas empíricos mais importantes da astronomia? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Comunique, porque as explicações de Aristóteles para os problemas empíricos não conseguiram sanar os problemas conceituais internos associados aos critérios epistêmicos? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Que narrativa pode ser construída acerca das principais implicações da visão de mundo e da malha conceitual aristotélica, no contexto da tradição de pesquisa grega? [<b>Resposta margeando o texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal avaliar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. A partir do fragmento de texto, a seguir, responda: que argumentos podem ser aplicados quanto à importância epistemológica da observação na ciência? “[...] Aristóteles acreditava que todos os seres humanos têm, por natureza, o desejo de conhecer. O prazer que as percepções de nossos sentidos nos causam é uma prova dessa verdade. Ele afirmava que: Nós gostamos deles por conta própria, independentemente da sua utilidade, especialmente os da visão”. [<b>Resposta para além do texto</b>]</li> <li>2. Que tipo de julgamento é oportuno fazer acerca da validade científica da lógica de Aristóteles, amparada na percepção sensível e senso comum? [<b>Resposta margeando o texto</b>]</li> <li>3. Mediante a passagem de texto, a seguir, responda: que tipo de argumento pode ser utilizado para contrastar as preocupações epistemológicas de Aristóteles com as de Platão? “[...] Aristóteles deslocou o mundo platônico das ideias para a realidade empírica. Em suas obras mais importantes (<i>Física, Metafísica, De Caelo e Meteorologia</i>), Aristóteles defendeu que: As ideias não constituem mais um mundo pairando no vazio, não se encontra acima das coisas nelas, são as formas essenciais das coisas. Elas representam o núcleo essencial e racional das coisas, que as propriedades empíricas envolvem como uma membrana”. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>4. Que argumentos podem ser lançados acerca das implicações filosóficas da realidade do vazio, da pluralidade dos mundos defendidas pelos atomistas, e o seu combate, especialmente, pelos seguidores de Aristóteles e Platão? [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>5. De que maneira é possível avaliar a integração do problema conceitual externo do componente visão de mundo, à cosmologia de Aristóteles e sua malha conceitual? [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol>
<p><b>Segundo Momento (35 min.)</b></p>	<p>Discussão do texto, de modo geral e específico. Considerando o aumento do volume de perguntas para cada categoria das ações verbais, é importante, durante esse momento, destacar com os estudantes as perguntas que os levam a compreender o conteúdo do texto em sua dimensão mais fundamental. A saber, que é mostrar como a visão de mundo aristotélica integrada em sua cosmologia e malha conceitual, materializam-se no mais importante problema conceitual externo da história da astronomia, da cosmologia e da física. Para isso, é de fundamental relevância que, durante as discussões, os estudantes respondam (individual e coletivamente) perguntas que abarcam tanto os conteúdos de cunho conceitual, quanto de implicações para além do texto. Destaca-se que esse</p>

	direcionamento pode ser planejado, antecipadamente, pelo professor ou professora, ao analisar melhor um conjunto de perguntas antes da aula.
<b>Terceiro Momento (5 min.)</b>	Momento de entregar aos alunos mais um bloco de três questões referentes ao texto desta aula, e indicação da leitura de elaboração de perguntas, para a próxima aula, do <b>Texto V – As cosmologias de Heráclides de Ponto e Aristarco de Samos e a medida da esfericidade da Terra por Eratóstenes de Cirene.</b>
<b>Tempo Total</b>	<b>50 minutos</b>

## DINÂMICA DA AULA 6

Esta aula, **primeiro momento**, se inicia recolhendo a atividade de avaliação das perguntas do texto anterior. Neste momento, aproveita-se para se certificar de que não resta mais nenhuma dúvida dos alunos acerca da aplicação dos critérios das atividades, tanto na elaboração quanto na avaliação das perguntas dos textos. Feito isso, dedica-se a apresentar os exemplos de perguntas elaboradas pelos estudantes, que serão tomadas para discutir o texto, de modo geral e específico. Para dinamizar esse momento, é importante destacar as perguntas que serão retomadas no segundo momento da aula, e que abarcam tanto o conteúdo conceitual, quanto as implicações que margeiam e estão para além do texto. No **segundo momento** da aula, dedica-se, de modo geral, a discutir com os estudantes: as ideias da cosmologia de Aristóteles; seus principais conceitos, fundamentos e pressupostos filosóficos; os aspectos que as ideias aristotélicas têm, e não têm, em comum com as ideias platônicas e pitagóricas; e suas implicações quando incorporadas pela teologia cristã e pela cultura renascentista europeia. De modo mais específico, procura-se destacar as perguntas do texto que levam os estudantes a compreender e avaliar como os conceitos de: universo finito e pleno, primeiro motor, lei do movimento natural (circular e retilíneo), mundos supralunar e sublunar, unicidade do universo, a imobilidade e centralidade da Terra no universo, e os fundamentos aristotélicos, estão implicados no problema conceitual externo mais importante da história da astronomia, da cosmologia e da física. Dado o volume de questões apresentadas, por um lado, destaca-se que isso denota a amplitude da discussão esperada na aula e, por outro lado, que o professor ou professora possa usufruir disso para se orientar e, até mesmo, planejar melhor a dinâmica em sala de aula. Por fim, **terceiro momento**, essa aula termina com a entrega de mais um bloco de perguntas referentes a este texto, e a indicação do **Texto V**. pode-se adiantar para os/as estudantes que as discussões sobre: a centralidade da Terra, o problema empírico das distâncias dos planetas, a esfericidade da Terra, raio medido pelo africano Eratóstenes de Cirene (276 – 194 a. C), estavam no foco do pensamento científico da tradição de pesquisa grega antiga.

AULA 7	<p><b>Tema:</b> <i>As cosmologias de Heráclides de Ponto e Aristarco de Samos e a medida esféricidade da Terra por Eratóstenes de Cirene</i></p>
<p><b>Primeiro Momento (10 min.)</b></p>	<p>Dedicado ao recolhimento do parecer avaliativos com as respostas às perguntas do texto anterior e a apresentação de exemplos das novas perguntas elaboradas pelos estudantes, referentes ao texto da aula. Frente à ampla discussão do conteúdo da aula anterior, é interessante neste momento pontuar alguns aspectos da visão de mundo aristotélica, especialmente, a questão da imobilidade da Terra e sua centralidade no universo, como elementos de contraponto com as ideias de Heráclides de Ponto e Aristarco de Samos, as quais apontam, respectivamente, para um modelo híbrido de universo (com Heráclides) e heliocêntrico (com Aristarco).</p> <p><b>Ação verbal conhecer:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que importante ideia sobre a Terra pode ser apontada, como aporte astronômico e cosmológico, por Heráclides de Ponto como premissa inicial de sua visão cosmológica? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Cite quais foram os principais objetivos dos trabalhos cosmológicos de Heráclides de Ponto e de Aristarco de Samos. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Que tipos de movimentos Heráclides e Aristarco atribuíram a Terra? [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal entender:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Considerando que Heráclides de Ponto adotou a visão de mundo geocêntrica predominante no pensamento astronômico e cosmológico grego, discuta sobre as principais diferenças entre seu modelo cosmológico e os modelos de Pitágoras, Filolau, Platão e Aristóteles. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2. Explique porque o modelo de epiciclo idealizado por Heráclides de Ponto foi tão importante para o desenvolvimento das teorias planetárias posteriores e consequentemente para a astronomia matemática grega. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>3. Discuta sobre algum aspecto da natureza do conhecimento científico observado no trabalho de Aristarco de Samos. [<b>Resposta margeando o texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal aplicar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Esboce a ordenação do modelo cosmológico de Heráclides de Ponto, especificando a posição da Terra, do Sol e dos planetas. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Que tipo de generalização pode ser feita a partir da ideia de liberdade de pensamento científico de Aristarco, no contexto atual, considerando as diversas ideias contemporâneas sobre o universo? [<b>Resposta margeando o texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal analisar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Correlacione a passagem no texto, a seguir, com o conflito entre a visão de mundo de Aristarco e a visão de mundo predominante na Grécia de seu tempo, “[...] não há ideia, por mais antiga e absurda, que não seja susceptível de melhorar o nosso conhecimento”. [<b>Resposta para além do texto</b>];</li> <li>2. Considerando que Aristarco foi acusado de <i>impiedade</i>, que tipo de crítica pode ser feita a afirmação de Plutarco, a seguir? “[...] os Gregos deviam fazer isso contra Aristarco de Samos, sob o pretexto de que ele movera o coração do mundo ao tentar salvar os fenômenos, supondo que o céu permanece imóvel e que a Terra se move ao longo de uma órbita oblíqua, ao mesmo tempo em que gira em redor do seu eixo”. [<b>Resposta para além do texto</b>];</li> <li>3. Que correlações podem ser feitas entre a mudança significativa no tratamento matemático dos problemas empíricos astronômicos, frente ao tratamento filosófico especulativo antes de Aristarco de Samos, a Cidade e a Biblioteca de Alexandria? [<b>Resposta para além do texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal criar/sintetizar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sintetize as principais ideias da cosmologia de Heráclides de Ponto e de Aristarco de Samos. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> </ol>

	<p>2. Esquematize as principais objeções de ordem físicas contra as ideias de Aristarco de Samos. [<b>Resposta contida no texto</b>];</p> <p>3. Produza uma síntese sobre os procedimentos de Eratóstenes para calcular a esfericidade da Terra. [<b>Resposta contida no texto</b>].</p> <p><b>Ação verbal avaliar:</b></p> <p>1. Argumente sobre a seguinte passagem no texto: “[...] a ciência avança quando utilizamos hipóteses que contradizem teorias solidamente confirmadas”. [<b>Resposta para além do texto</b>];</p> <p>2. Avalie as principais implicações das contribuições de Aristarco para o desenvolvimento da tradição de pesquisa grega via astronomia matemática. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</p> <p>3. Frente às medidas de Aristarco, julgue criticamente a função do erro na ciência? [<b>Resposta margeando o texto</b>];</p> <p>4. Considerando o adendo feito sobre Hipátia de Alexandria, argumente sobre o valor do reconhecimento ao trabalho científico das mulheres na ciência nos dias atuais. [<b>Resposta para além do texto</b>].</p>
<b>Segundo Momento (35 min.)</b>	<p>Discussão integral do texto - neste momento, procura-se discutir o texto com o número máximo possível de perguntas. Especificamente, é interessante enfatizar: as defesas do movimento da Terra por Heráclides e Aristarco, em contra senso com a visão predominante; o protagonismo feminino na ciência, representado por Hipátia de Alexandria; a medida da esfericidade da Terra realizada por Eratóstenes de Cirene e; o início efetivo de uma mudança de abordagem metodológica no tratamento dos problemas empíricos astronômicos na astronomia e cosmologia, isto é, da pura especulação filosófica, para uma abordagem matemática que, embora descritiva, representou um grande avanço do pensamento científico grego.</p>
<b>Terceiro Momento (5 min.)</b>	<p>Momento da entrega das questões aos estudantes, referentes ao texto desta aula, bem como da indicação da leitura do próximo <b>Texto VI – A teoria planetária de Apolônio de Perga e as contribuições astronômicas de Hiparco de Nicéia</b>.</p>
<b>Tempo Total</b>	<b>50 minutos</b>

## DINÂMICA DA AULA 7

Esta aula é iniciada (**primeiro momento**) com a exposição de exemplos de algumas perguntas elaboradas pelos estudantes, referentes ao texto da aula. Nesse contexto inicial, é interessante pontuar alguns aspectos sobre a visão de mundo aristotélica, especialmente, sobre a imobilidade da Terra e sua centralidade no universo, a fim de construir contrapontos com as ideias de Heráclides e de Aristarco. No **segundo momento** da aula, procura-se discutir integralmente o texto, tomando como referência os destaques do conteúdo exposto acima, de modo a enfatizar bastante o momento de mudança metodológica no tratamento dos problemas empíricos astronômicos. Por fim, no terceiro **momento da aula** é realizada a entrega das perguntas do texto aos estudantes, e indicação da leitura do **Texto VI**.

<b>AULA 8</b>	<b>Tema:</b> <i>A teoria planetária epiciclo-deferente de Apolônio de Perga e as contribuições astronômicas de Hiparco de Nicéia</i>
<b>Primeiro Momento (10 min.)</b>	<p>Dedicado ao recolhimento dos pareceres avaliativos com respostas às perguntas do texto anterior e a apresentação de exemplos das novas perguntas elaboradas pelos estudantes, referentes ao texto da aula. Neste contexto inicial, antes de expor às novas perguntas, é importante resgatar os principais aspectos conceituais do modelo epiciclo de Heráclides, que foi tomado como aporte teórico fundamental na teoria epiciclo-deferente da teoria de Apolônio, bem como destacar a importância do trabalho da medida da esfericidade da Terra por Eratóstenes, como um marco da mudança de abordagem metodológica para a solução dos problemas empíricos astronômicos. Feito isso, inicia-se a exposição de alguns exemplos de perguntas do texto da aula - destaca-se que, devido à pequena extensão do texto, tem-se um número reduzido de exemplos, para cada categoria de ação verbal, porém pertinentes.</p> <p><b>Ação verbal conhecer:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aponte no texto qual foi o principal problema empírico enfrentado por Apolônio de Perga. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Descreva a teoria planetária epiciclo-deferente de Apolônio. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Localize no texto a explicação de Apolônio para o problema empírico de retrogradação dos planetas. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>4. Cite as principais contribuições astronômicas de Hiparco de Nicéia. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>5. Defina o fenômeno de precessão dos equinócios. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal entender:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Discuta sobre a importância do aperfeiçoamento realizado por Ptolomeu à teoria epiciclo-deferente de Apolônio, para o desenvolvimento da astronomia. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2. Explique como Apolônio atacou o problema empírico do movimento retrógrado dos planetas externos. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Discuta sobre o problema nos dados astronômicos babilônios. [<b>Resposta no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal aplicar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Relacione a importância da teoria epiciclo-deferente de Apolônio com o desenvolvimento da tradição de pesquisa grega, via astronomia matemática. [<b>Resposta margeando o texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal analisar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sistematize as explicações de Apolônio para o movimento de retrogradação dos planetas externos, o movimento da Lua e o teorema dos pontos estacionários. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Debata sobre o papel das observações de Hiparco no desenvolvimento da astronomia grega. [<b>Resposta margeando o texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal criar/sintetizar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Escreva uma síntese sobre a importância dos trabalhos de Apolônio e Hiparco para a mudança de abordagem no tratamento dos problemas empíricos astronômicos, iniciada por Aristarco de Samos. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal avaliar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Frente ao problema conceitual interno de inconsistência que pesava contra a teoria de Apolônio, argumente sobre a seguinte passagem do texto: “[...] uma teoria deve conformar com a precisão à experiência: em seu domínio, às consequências dedutíveis da teoria devem estar em clara concordância com os resultados da experimentação e da observação existente”. [<b>Resposta margeando o texto</b>].</li> </ol>

<b>Segundo Momento (35 min.)</b>	Discussão integral do texto. Observando que esse texto, em particular, é menor do que os demais, torna-se interessante focar a atenção dos estudantes nos aspectos conceituais das teorias planetárias de Apolônio e nas contribuições astronômicas de Hiparco, procurando enfatizar como esses aspectos contribuíram para a continuação do avanço do crescimento científico grego, especialmente, da tradição de pesquisa, via astronomia matemática. Além disso, conforme observado no momento inicial, é fundamental discutir profundamente como esses trabalhos marcam a mudança de abordagem no tratamento dos problemas empíricos astronômicos. A relação dessa mudança com a fundação da Biblioteca de Alexandria e sua implicação para o desenvolvimento da ciência.
<b>Terceiro Momento (5 min.)</b>	Momento de entrega de mais um bloco de três questões, referentes ao texto desta aula, para serem avaliadas e respondidas pelos estudantes; bem como a indicação da leitura do próximo <b>Texto VII – As teorias planetárias de Ptolomeu e suas explicações astronômicas dos problemas empíricos.</b>
<b>Tempo Total</b>	<b>50 minutos</b>

### DINÂMICA DA AULA 8

Esta aula é iniciada, **primeiro momento**, com a exposição de exemplos de algumas perguntas elaboradas pelos estudantes, referentes ao texto da aula. Nesse contexto inicial, é interessante também pontuar alguns aspectos sobre a visão de mundo aristotélica e sobre a imobilidade da Terra e sua centralidade no universo, a fim de que seja possível fazer contrapontos com as ideias de Heráclides e de Aristarco. No **segundo momento** da aula, procura-se discutir integralmente o texto, tomando como referência os destaques do conteúdo exposto acima, de modo a enfatizar bastante o momento da mudança metodológica no tratamento dos problemas empíricos astronômicos, bem como seu significado para o avanço do crescimento científico grego, via astronomia matemática. No terceiro **momento da aula**, encerra-se a aula com a entrega das perguntas aos estudantes e a indicação da leitura do próximo **Texto VII**.

<p><b>AULA 9</b></p>	<p><b>Tema:</b> <i>As teorias planetárias de Ptolomeu e suas explicações aos problemas empíricos astronômicos</i></p>
<p><b>Primeiro Momento (10 min.)</b></p>	<p>Dedicado ao recolhimento dos pareceres avaliativos com respostas às perguntas do texto anterior e a apresentação de exemplos das novas perguntas elaboradas pelos estudantes, referentes ao texto da aula. Neste momento, é importante iniciar a aula procurando estabelecer uma conexão entre os trabalhos de Apolônio, Hiparco e Ptolomeu, dentro de um mesmo contexto epistemológico, como representação do significativo avanço científico grego, em termos da solução dos problemas empíricos astronômicos, via descrição cinemática, em detrimento da simples especulação filosófica praticada anteriormente.</p> <p><b>Ação verbal conhecer:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Especifique a principal diferença entre o conteúdo do Almagesto de Ptolomeu e os demais trabalhos astronômicos gregos. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Enuncie as cinco características epistêmicas da ideia de simplicidade no contexto epistemológico grego. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Aponte as principais considerações celestes adotadas por Ptolomeu. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>4. Descreva como o conhecimento científico era dividido na época de Ptolomeu. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>5. Exemplifique como Ptolomeu resolveu cada um dos problemas empíricos astronômicos. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal entender:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Explique por que dizer que o sistema copernicano foi aceito por ser mais simples que a astronomia de Ptolomeu é uma falácia didática. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Explique o significado do termo “salvar os fenômenos”, para astrônomos como Ptolomeu. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Discuta sobre a distinção entre a astronomia matemática e a astronomia física. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal aplicar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Interprete a seguinte passagem do texto: “[...] Hanson viu Ptolomeu como o expoente máximo do instrumentalismo”. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2. Compare a teoria do epiciclo-deferente de Apolônio com a teoria do excêntrico de Ptolomeu. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal analisar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que debate sobre a natureza da ciência, se possível, pode ser desenvolvido em torno da implicação do estado cognitivo das teorias científicas? [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2. Debata sobre as críticas de Copérnico a Ptolomeu, quanto ao uso do artifício geométrico equante. [<b>Resposta margeando o texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal criar/sintetizar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que mensagem sobre a natureza da ciência pode ser comunicada a partir da existência das correntes instrumentalistas e realista dentro da tradição de pesquisa grega? [<b>Resposta para além do texto</b>];</li> <li>2. Esquematize as explicações de Ptolomeu aos problemas empíricos astronômicos. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Produza uma síntese sobre as teorias planetárias de Ptolomeu e suas explicações para os problemas empíricos astronômicos. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal avaliar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Argumente sobre como a existência das duas correntes epistemológicas de pensamento instrumentalista e realista, na tradição de pesquisa grega antiga, implica na não linearidade e do crescimento científico cumulativo da ciência. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Avalie criticamente como a passagem, a seguir, corrige a visão empírico-indutivista ingênua da produção do conhecimento científico: “[...] leis e teorias científicas são</li> </ol>

	<p>elaborações/criações do intelecto humano. Não são meras sínteses indutivas do observado, do experimentado. Os dados, <i>per se</i>, não geram teorias”. [Resposta margeando o texto];</p> <p>3.Faça um contraste epistemológico entre os modos dos instrumentalistas e dos realistas praticarem a mesma astronomia. [Resposta contida no texto].</p>
<b>Segundo Momento (35 min.)</b>	<p>Discussão integral do texto. Neste momento, é importante travar essa discussão procurando enfatizar, mediante as perguntas apresentadas no primeiro momento da aula, os seguintes aspectos: o objetivo astronômico de Ptolomeu, os aspectos complexos do Almagesto; o valor epistêmico da simplicidade para expressar ideias científicas; as explicações cinemáticas engenhosas de Ptolomeu aos problemas empíricos astronômicos; os valores epistêmicos de consistência e coerência interna de suas teorias; as distinções entre as duas correntes epistemológicas de pensamento: instrumentalista – fundamentada na explicação descritiva dos fenômenos do mundo físico, sem se preocupar com a realidade física dos artificios geométricos que sustentam as teorias –; e a corrente realista – alicerçada na explicação causal dos mesmos fenômenos, porém preocupada com a realidade física dos entes matemáticos que sustentam às mesmas teorias científicas; que a existência dessas duas correntes de pensamento, no contexto da tradição de pesquisa grega, permite uma visão mais crítica sobre o crescimento científico não linearizado, nem cumulativo da ciência; por fim, sobre os aspectos, características e princípios da natureza da ciência que permeiam esse mesmo contexto histórico.</p>
<b>Terceiro Momento (5 min.)</b>	<p>Momento de entrega das perguntas aos estudantes, referente ao texto desta aula, a serem avaliadas e respondidas, bem como indicação da aula de revisão seguinte, cuja ideia principal é resgatar os aspectos conceituais, históricos, filosóficos, metafísicos, inerentes à prática da astronomia e da cosmologia, no contexto da tradição de pesquisa grega. A partir disso, é sinalizado que será entregue, nesta aula de revisão, um conjunto de perguntas pertinentes aos sete textos discutidos até o momento, como forma de avaliar formativamente, tanto a compreensão dos assuntos dos textos por parte dos estudantes, quanto o próprio andamento da proposta de ensino e de suas atividades.</p>
<b>Tempo Total</b>	<b>50 minutos</b>

## DINÂMICA DA AULA 9

No **primeiro momento** desta aula, procura-se recolher os pareceres avaliativos com as respostas referentes às perguntas do texto anterior, bem como apresentar os exemplos das novas perguntas elaboradas pelos estudantes. Neste momento inicial, aproveita-se também para estabelecer algumas conexões entre os trabalhos de Apolônio, Hiparco e Ptolomeu, a fim de traçar um desfecho significativo sobre o avanço científico grego, em termos da solução dos problemas empíricos astronômicos, via descrição cinemática, em detrimento da simples especulação filosófica.

No **segundo momento**, aprofunda-se na discussão integral do texto, buscando destacar os aspectos principais apontados acima. A principal ideia é deixar bem demarcado os compromissos metodológicos e ontológicos que marcam a prática da astronomia e da cosmologia, nesse contexto histórico, visto que no contexto europeu, antes, durante e depois de Copérnico, os debates científicos travados em torno desses aspectos, elevará a ciência a outro patamar: construção de novos compromissos metodológicos e ontológicos, que implodem os

pressupostos conceituais, filosóficos, metafísicos e até religiosos, tradicionais, em detrimento da construção de uma nova visão de mundo e um novo modo de se fazer ciência.

Por fim, no **terceiro momento**, entregam-se as perguntas aos estudantes, bem como é indicado que na aula seguinte será realizada uma revisão dos principais aspectos conceituais, históricos, filosóficos, metafísicos, inerentes à prática da astronomia e da cosmologia, no contexto da tradição de pesquisa grega. E, como desfecho dessa primeira parte da unidade de ensino, será realizada uma avaliação formativa diagnóstica, cujo objetivo é sondar tanto a compreensão dos/das estudantes sobre os conteúdos dos textos, quanto do próprio andamento da proposta de ensino e de suas atividades.

<b>AULA 10</b>	<b>Tema:</b> <i>Revisão dos principais aspectos conceituais, filosóficos, metafísicos dos conteúdos dos textos: dos babilônios a astronomia ptolomaica.</i>
<b>Primeiro Momento (5 min.)</b>	Dedicado à apresentação dos objetivos gerais e específicos da aula, os quais respectivamente perpassam por: (i) fazer um desfecho dos aspectos conceituais, históricos, filosóficos e metafísicos, da tradição de pesquisa grega, desde os babilônios até astronomia ptolomaica; (ii) enfatizar os compromissos metodológicos e ontológicos que marcam as práticas da astronomia e da cosmologia, nesse período; (iii) caracterizar as visões de mundo que permeiam o pensamento astronômico e cosmológico grego, desde Pitágoras a Ptolomeu, destacando as ideias do próprio Pitágoras, do seu discípulo Filolau, de Platão, de Aristóteles, de Heráclides e, por fim, de Aristarco, a fim de demonstrar o caráter plural da produção de conhecimento, mesmo existindo a ideia predominante da visão de mundo geocêntrica; (iv) pontuar a existência das correntes de pensamento instrumentalista e realista como manifestação da pluralidade epistemológica na ciência, como regra e não exceção; (v) destacar a importância do compromisso metodológico com o conceito de movimento circular uniforme, como aporte para a solução cinemática dos problemas empíricos astronômicos e, nesse contexto, o papel dos problemas conceituais externos - especialmente do componente da visão de mundo - e dos problemas conceituais internos, corroborados pelos valores epistêmicos kuhnianos, no desenvolvimento das teorias planetárias e dos modelos cosmológicos gregos; por fim (vi), debater os aspectos, características e princípios da natureza da ciência, que puderam ser observados a partir dos textos e de suas discussões.
<b>Segundo Momento (35 min.)</b>	Dedicado a uma apresentação expositiva dialogada – preferencialmente preparada pelo professor (a), em <i>PowerPoint</i> , ou da forma que melhor achar conveniente. É importante destacar que essa liberdade no planejamento da avaliação formativa tem a finalidade de deixar o/a professor (a) mais à vontade e, com isso, possa construir uma aula de revisão que englobe não somente sua própria leitura dos textos, mas também o modo como está conduzindo as discussões em sala de aula. Desta forma, os objetivos listados acima têm como exclusiva função, apontar o que é fundamental discutir nesta aula, em vista dos objetivos de aprendizagem destacados na ementa da unidade.
<b>Terceiro Momento (5 min.)</b>	Entrega aos estudantes de um conjunto de perguntas, cuja quantidade fica a critério do/a professor (a), no momento de seleção prévia das perguntas que acompanham cada texto. Ressalta-se apenas que, tais perguntas devem estar em conformidade com os objetivos desta aula, bem como com os objetivos gerais desta unidade de ensino. Nesse sentido, pontua-se a importância de construir uma avaliação formativa - prova escrita - que os alunos possam levar para casa, a fim de que tenham um tempo maior para pensar nas perguntas e respondê-las com calma.
<b>Tempo Total</b>	<b>50 minutos</b>

### DINÂMICA DA AULA 10

O **primeiro momento** desta aula é dedicado à apresentação dos objetivos gerais e específicos, que irão permitir, por um lado, a construção de um desfecho da primeira parte da unidade de ensino; por outro, uma avaliação formativa da compreensão dos estudantes dos conteúdos estudados no contexto da astronomia e da cosmologia grega, desde os babilônios até a astronomia ptolomaica. No **segundo momento**, procura-se discutir esses objetivos, mediante uma apresentação expositiva dialogada produzida pelo (a) professor (a). Neste momento, é

importante traçar com os estudantes uma linha de raciocínio nas discussões, que ressalta todos os aspectos destacados nos objetivos, como também a função primordial da ideia de ciência como atividade de solução de problemas empíricos e problemas conceituais, no contexto da tradição de pesquisa grega. No **terceiro momento**, além da entrega da prova escrita, cuja devolução por parte dos/as estudantes pode ser feita na aula introdutória da segunda parte da unidade – ou em um tempo determinado, caso seja necessário – é interessante sinalizar que a aula seguinte será destinada a abordagem de alguns aspectos introdutórios da segunda parte da unidade de ensino, justamente, para que os/as estudantes consigam, ao final, compreender as principais mudanças gerais e específicas inerentes aos contextos das tradições de pesquisas na Grécia Antiga e na Europa, como um todo, após o advento da astronomia copernicana.

Especialmente, nesta aula introdutória, deve-se enfatizar de que maneira os/as estudantes poderão perceber essa mudanças, desde o contexto medieval ao advento da astronomia copernicana, mediante os debates críticos que cercam a astronomia, a cosmologia e a física, perpassando pelo trabalho de Copérnico, os problemas empíricos, problemas conceituais e as implicações filosóficas, metafísicas e até religiosas que o mesmo fomentou, antes, durante e depois da morte de Copérnico. A partir disso, observar a pertinência dos trabalhos de Giordano Bruno, Galileu Galilei, Johannes Kepler, René Descartes, Isaac Newton, dentre outros, na constituição de uma nova astronomia, uma nova cosmologia e uma nova física, que juntas auxiliam tanto no estabelecimento de uma nova tradição de pesquisa europeia – a partir da apropriação e das transformações dos compromissos metodológicos e ontológicos herdados da prática da astronomia, da cosmologia e da física desde a Grécia Antiga – quanto na construção de uma nova visão de mundo, cognitivamente distinta da visão de mundo grega. E, por fim, avaliar o desenvolvimento da ciência, observando o crescimento científico cognitivo mediado pela solução dos problemas empíricos e dos problemas conceituais, a partir da concepção de novos conceitos, leis, modelos, teorias, princípios filosóficos e metafísicos inerentes ao novo contexto histórico investigativo europeu.

<b>AULA 11</b>	<b>Tema:</b> <i>Aspectos introdutórios da segunda parte da unidade de ensino</i>
<b>Primeiro Momento (5 min.)</b>	Dedicado a uma breve explanação do objetivo da aula: apresentar aos estudantes os principais aspectos gerais dos oito textos que integram a segunda parte da unidade de ensino, visando dar continuidade à compreensão da visão de ciência como uma atividade de solução de problemas empíricos e problemas conceituais, nos domínios da astronomia, da cosmologia e da física. Bem como despertar a curiosidade e a expectativa dos estudantes para com a leitura dos textos seguintes, no sentido de fomentar uma maior reflexão por parte deles/delas sobre os conteúdos que serão discutidos em sala de aula. <b>Observação importante:</b> Caso o espaço de tempo entre esta aula e a entrega da prova escrita da aula 10 sejam coincidentes, torna-se pertinente iniciar a aula recolhendo essa prova e, brevemente, sondar se os/as estudantes encontraram dificuldades para realizá-la em casa e no tempo estabelecido.
<b>Segundo Momento (35 min.)</b>	Discussão e comentários gerais sobre os conteúdos que os títulos dos oito textos sugerem: <b>Texto VIII</b> – <i>Os debates astronômicos, cosmológicos e físicos nos antecedentes medievais ao advento da astronomia copernicana</i> ; <b>Texto IX</b> – <i>As influências dos fatores extra e intracientíficos implicadas no advento da astronomia copernicana</i> ; <b>Texto X</b> – <i>A natureza das perguntas nas críticas ao sistema astronômico copernicano</i> ; <b>Texto XI</b> – As defesas mais proeminentes das ideias copernicanas e suas implicações astronômicas, cosmológicas e físicas; <b>Texto XII</b> – As contribuições de Galileu para a constituição de uma nova física; <b>Texto XIII</b> – Johannes Kepler e a constituição de uma nova astronomia; <b>Texto XIV</b> – A explicação mecânica da gravidade por René Descartes e os problemas empíricos e conceituais na gênese da gravitação universal newtoniana; e o <b>Texto V</b> – A teoria da gravitação universal newtoniana e o estabelecimento da nova tradição de pesquisa europeia do século XVII.
<b>Terceiro Momento (5 min.)</b>	Indicação da leitura do Texto VIII, juntamente com a proposta da continuidade das atividades de elaboração, avaliação e respostas às perguntas do texto, em conformidade com os procedimentos já aprendidos. <b>Observação:</b> para evitar repetição, a partir desta aula em diante, sempre que aparecer a palavra atividades em qualquer parte do plano de aula, ela estará se referindo ao conjunto (elaboração, avaliação e resposta às perguntas dos textos).
<b>Tempo Total</b>	<b>50 minutos</b>

## DINÂMICA DA AULA 11

No **primeiro momento** desta aula, tem-se a explanação do seu principal objetivo aos estudantes, que apresentar os aspectos gerais dos oito textos que integram a segunda parte da unidade de ensino. Tendo em mente a continuidade da compreensão crítica acerca da visão histórico-filosófica de ciência como uma atividade de solução de problemas. Como observado anteriormente, caso o tempo da entrega da prova escrita coincidir com o dia desta aula, torna-se pertinente recolher a prova neste momento e pedir um *feedback* sobre a realização da mesma.

Com essa observação, no **segundo momento**, passa-se a apresentar os principais aspectos dos textos, destacando, muito brevemente, o seguinte: **Texto VIII**, os contextos e fatores históricos, políticos, econômicos, religiosos e sociais que marcaram a Europa entre os treze séculos que separam os trabalhos astronômicos de Ptolomeu e Copérnico, enfatizando suas implicações na prática da astronomia, da cosmologia e da física nesse período; **Texto IX**,

sinalizar sobre as influências da corrente de pensamento neoplatônica que, juntamente com a existência de alguns problemas empíricos, conceituais e técnicos – das tabelas Alfonsinas – tornaram-se os fatores extras e intracientíficos que motivaram Copérnico a propor sua reforma astronômica; **Texto X**, pontuar a pertinência das críticas lançadas contra o sistema astronômico copernicano, à luz dos problemas empíricos e conceituais que fomentaram o desenvolvimento de uma nova astronomia, uma nova cosmologia e uma nova física e, por conseguinte, o estabelecimento da nova tradição de pesquisa europeia, desde Copérnico a Newton; **Texto XI**, localizar historicamente as defesas da astronomia copernicana por Giordano Bruno e por Galileu Galilei, incluindo as observações telescópicas de Galileu, como um ponto de partida importante para o pensamento científico europeu iniciar seu rompimento com a visão de mundo herdada da Grécia Antiga, representada pelas ideias astronômicas, cosmológicas e físicas aristotélicas; **Texto XII**, situar o impacto científico das contribuições de Galileu, com a fundação dos alicerces da constituição de uma nova física – lei da queda dos corpos; ressignificação ontológica do conceito de movimento e de repouso; descrição geométrica da composição dos movimentos retilíneos (uniforme e uniformemente acelerado) –; **Texto XIII**, falar do significado científico do trabalho de Kepler, como evidência concreta da mudança metodológica e ontológica na prática, astronômica, cosmológica e física, que impacta epistemologicamente tanto no nascimento de uma nova astronomia, quanto em mais alguns alicerces para o estabelecimento da nova tradição de pesquisa europeia; **Texto XIV**, descrever brevemente sobre a importância da filosofia mecanicista de René Descartes, sua concepção da lei da inércia e sua explicação mecânica da gravidade, como aportes que evidenciam mais alguns indícios do crescimento cognitivo do pensamento científico europeu, no século XVI e XVII; por fim, **Texto XV**, pontuar a solução dos problemas empíricos e conceituais astronômicos, cosmológicos e físicos por Newton, como o ápice da constituição da nova física, da nova astronomia e da nova cosmologia, incluindo uma nova visão de mundo e o estabelecimento da nova tradição de pesquisa europeia no século XVII, cognitivamente distinta da tradição de pesquisa grega antiga, nesses domínios disciplinares. Findadas essas breves explanações, no **terceiro momento** da aula, indica-se a leitura do **Texto VIII** – *Os debates astronômicos, cosmológicos e físicos nos antecedentes medievais ao advento da astronomia copernicana* – orientando os estudantes a elaborar as perguntas mediante suas reflexões e, se possível, pensar também nos breves comentários relativos a esse texto.

AULA 12	<b>Tema:</b> <i>Os debates astronômicos, cosmológicos e físicos nos antecedentes medievais ao advento da astronomia copernicana</i>
Primeiro Momento (5 min.)	<p>Apresentação de algumas perguntas elaboradas pelos estudantes, considerando a hipótese de estarem alinhadas com a discussão da aula anterior.</p> <p><b>Ação verbal conhecer:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aponte os aspectos de cunhos sociais, culturais, políticos, econômicos e religiosos que estavam implicados na prática astronômica, cosmológica e física nos antecedentes medievais ao advento da astronomia copernicana. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Cite as principais contribuições astronômicas dos árabes durante a invasão muçulmana na Península Ibérica. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Especifique quais foram as preocupações de Peurbach com a astronomia de seu tempo, e como isso implicou, de alguma forma, na atitude posterior de Copérnico, quanto a uma nova interpretação da prática astronômica de seu tempo. [<b>Resposta margeando o texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal entender:</b>  <b>Explique sobre o problema conceitual de incompatibilidade lógica entre a visão cosmológica aristotélica e a astronomia ptolomaica.</b> [<b>Resposta contida no texto</b>];</p> <p><b>Discuta sobre a importância do trabalho de Nicolau de Cusa, frente ao problema da visão de mundo geocêntrica aristotélica.</b> [<b>Resposta no texto</b>].</p> <p><b>Ação verbal aplicar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Interprete o significado do problema conceitual externo ligado ao componente da visão de mundo, frente aos debates científicos nos antecedentes medievais ao advento da astronomia copernicana e ao próprio desenvolvimento da ciência. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2. Compare conceitualmente as ideias sobre: (a) a força motriz aristotélica, (b) a força motriz incorpórea de Philoponus e (c) a força motriz (<i>viz motiva</i>) de Buridan. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal analisar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Debata sobre o significado ontológico do conceito de força para Aristóteles, Philoponus e Buridan. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2. Que crítica pode ser feita acerca da ideia de que a Europa tenha dormido uma longa noite de mil anos? [<b>Resposta para além do texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal criar/sintetizar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sintetize os principais argumentos sobre a possibilidade do movimento da Terra e sua implicação para o desenvolvimento da astronomia, da cosmologia e da física no contexto europeu. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Produza uma síntese sobre as principais críticas à dinâmica de forças de Aristóteles. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal avaliar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Argumente sobre como a discussão a respeito do movimento da Terra nos antecedentes medievais contribuiu, posteriormente, para o advento da astronomia copernicana. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2. Avalie o impacto científico sobre a discussão cosmológica acerca da pluralidade do universo e a não centralidade da Terra no contexto medieval, para o crescimento científico, após o advento da astronomia copernicana. [<b>Resposta para além do texto</b>].</li> </ol>

<b>Segundo Momento (35 min.)</b>	Discussão integral do texto. Neste momento, é importante iniciar a discussão solicitando que os estudantes apresentem suas breves impressões sobre a leitura do texto e, a partir disso, ir colocando cada uma das perguntas apresentadas no primeiro momento da aula, procurando destacar: <b>(i)</b> a implicação dos contextos políticos, econômicos e religiosos europeu sobre a prática da astronomia e da cosmologia; <b>(ii)</b> a influência árabe nas traduções dos textos astronômicos gregos e os problemas técnicos nessas traduções; <b>(iii)</b> a criação das primeiras universidades europeias; <b>(iv)</b> a preocupação de astrônomos europeus em traduzir os textos astronômicos gregos de fontes originais; <b>(v)</b> as críticas à dinâmica de forças de Aristóteles; <b>(vi)</b> a importância das discussões sobre a possibilidade do movimento da Terra; e <b>(viii)</b> as discussões cosmológicas acerca da pluralidade do universo e a não centralidade da Terra.
<b>Terceiro Momento (5 min.)</b>	Finalização da aula com a entrega das perguntas para serem respondidas e avaliadas pelos estudantes, seguindo a orientação do <i>feedback</i> por pares, bem como a indicação da leitura do <b>Texto IX – As influências extras e intracientíficas implicadas no advento da astronomia copernicana.</b>
<b>Tempo Total</b>	<b>50 minutos</b>

## DINÂMICA DA AULA 12

No **primeiro momento** desta aula, procura-se apresentar as perguntas elaboradas pelos estudantes, considerando a hipótese de terem conseguido evoluir no processo das atividades. No **segundo momento**, inicialmente, procura-se dar um breve tempo para que os/as estudantes possam apresentar suas impressões gerais sobre a leitura o texto. A partir disso, é interessante ir colocando as perguntas que levam ao aprofundamento da discussão, observando os oito principais aspectos pontuados de **(i-viii)**. Durante esse aprofundamento, é muito importante ficar claro para os/as estudantes como o contexto histórico da Europa impactou significativamente a prática da astronomia, da cosmologia e da física, no sentido de atrasar, por tantos séculos, não somente o desenvolvimento dessas áreas da ciência, como também o próprio crescimento cognitivo da visão de mundo europeia. No **terceiro momento**, finaliza-se a aula com a orientação das atividades e a indicação da leitura do **Texto IX**.

## COMENTÁRIOS IMPORTANTES DA AULA 12

Destaca-se que, tanto em relação a esse texto como aos demais, será priorizado um número menor de perguntas em cada ação verbal, acreditando na evolução dos/das estudantes quanto à realização das atividades. A essa altura, espera-se que eles/elas tenham alcançado a maturidade desejada acerca do pensamento crítico e criativo para refletirem sobre os textos e construir uma ideia ampla em torno do desenvolvimento da ciência na perspectiva histórico-filosófica da solução de problemas, e a natureza da ciência vinculada a essa abordagem.

AULA 13	<b>Tema:</b> <i>As influências extras e intracientíficas implicadas no advento da astronomia copernicana</i>
Primeiro Momento (5 min.)	<p>Recolhimento das atividades e apresentação das perguntas para discussão integral do texto desta aula.</p> <p><b>Ação verbal conhecer:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Apresente os principais aspectos das influências da escola de pensamento neoplatônico e do culto ao Sol sobre o advento da astronomia copernicana. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Enuncie as exigências de Copérnico para propor sua reforma astronômica. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Localize os principais aspectos da astronomia copernicana que impedem de afirmar que ela era mais simples que a astronomia de Ptolomeu. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal entender:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Discuta sobre a importância epistemológica da matemática como estruturante do pensamento científico, na seguinte passagem do texto: “[...] Essa concepção de que a natureza pode ser matematizada tornou-se parte estrutural da filosofia neoplatônica. Com isso, na Idade Média, ela forneceu uma das principais contribuições para o desenvolvimento da ciência, isto é, a extensão das matemáticas a toda a ciência física, ao menos em princípio”. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2. Que principal distinção epistemológica pode ser observada entre a prática da astronomia da tradição de pesquisa grega e da tradição de pesquisa europeia que está nascendo com Copérnico? [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal aplicar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Esboce os principais aspectos do sistema astronômico copernicano. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Interprete a seguinte passagem do texto: “[...] se nos guiarmos pelo que o próprio Copérnico nos diz a respeito da forma como ele chegou a seu sistema, certamente não chegaremos à sua astronomia, mas sim a uma astronomia no gênero da que Tycho Brahe desenvolveu, a qual, aliás, deveria logicamente se colocar entre Ptolomeu e Copérnico, e não depois deste último”. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal analisar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que tipo de crítica sobre a visão de ciência lógica e infalível é possível extrair do episódio da astronomia copernicana, ao considerar a seguinte passagem de texto: “[...] nos mostra que a história do pensamento científico não é inteiramente lógica. Assim, para compreender a evolução, é mister levar em conta fatores extra lógicos. Dessa forma, uma das razões - provavelmente a mais profunda - da grande reforma astronômica operada por Copérnico não era absolutamente científica”. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2. Sistematize as principais críticas de Copérnico à astronomia de Ptolomeu. [<b>Resposta contida no texto</b>]</li> </ol> <p><b>Ação verbal criar/sintetizar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Esquematize as principais soluções apresentadas por Copérnico aos problemas empíricos astronômicos. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Diante do equívoco acerca do valor epistemológico empregado ao critério de simplicidade na astronomia copernicana, encontrado em alguns livros didáticos de física, proponha uma redação que possa dirimi-lo. [<b>Resposta margeando o texto</b>]</li> </ol> <p><b>Ação verbal avaliar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que tipo de contraste epistemológico encontra-se entre a proposta astronômica de Copérnico e a proposta de Ptolomeu? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Julgue natureza da produção de conhecimento científico, considerando a seguinte passagem de texto: “[...] a inovação proporcionada pelo sistema astronômico copernicano não nasceu da observação de novos fatos, nem da falta de explicação de fatos antigos, mas de uma nova interpretação de fatos bastante conhecidos pelos astrônomos do século XV. Copérnico “foi um supremo exemplo de um homem que</li> </ol>

	revolucionou a ciência ao olhar fatos velhos de um novo modo, basicamente neoplatônico””. [Resposta para além do texto]
<b>Segundo Momento (35 min.)</b>	Comentários gerais e discussão integral do texto. Assim como se procedeu na aula anterior, neste momento, é dado um breve espaço de tempo para que os estudantes possam explanar suas impressões gerais sobre o texto. Em seguida, aprofunda-se a discussão atentando para os seguintes aspectos: (i) as influências da escola de pensamento neoplatônico e de culto ao Sol sobre o advento da astronomia copernicana; (ii) os principais problemas conceituais e técnicos que fomentaram a proposta de Copérnico; (iii) as exigências de Copérnico para contornar alguns problemas – como a não observação do fenômeno da paralaxe e, conseqüentemente, provar a realidade do movimento da Terra –; (iv) os principais aspectos astronômicos, cosmológicos e físicos do sistema astronômico copernicano; (v) as explicações de Copérnico para os principais problemas empíricos astronômicos; (vi) alguns aspectos relativos a natureza da ciência, que o advento da astronomia copernicana permite observar; e (vii) as principais implicações astronômicas, cosmológicas, físicas, filosóficas, metafísicas e até religiosas fomentadas pela astronomia copernicana.
<b>Terceiro Momento (5 min.)</b>	Encerramento da aula, entrega das perguntas para a realização das atividades e indicação da leitura do <b>Texto X – A natureza das perguntas nas críticas ao sistema astronômico copernicano.</b>
<b>Tempo Total</b>	<b>50 minutos</b>

### DINÂMICA DA AULA 13

**Primeiro momento**, recolhimento das atividades da aula anterior e apresentação das perguntas que orientarão a discussão do texto. **Segundo momento**, concessão de um breve tempo para os estudantes apresentarem suas impressões gerais sobre o texto. Em seguida, aprofundamento da discussão com as perguntas já apresentadas, atentando para os sete aspectos principais pontuados de (i-vii). Com esse aprofundamento, espera-se que estudantes compreendam a importância da astronomia copernicana como um episódio da história da astronomia, da cosmologia e da física, que deu início ao processo de profundas transformações dessas áreas da ciência. Juntamente, com isso, percebam também o impacto de suas implicações culturais, filosóficas, metafísicas e religiosas sobre o pensamento europeu, sem deixar de observar os acontecimentos externos à ciência, como o movimento cultural renascentista e os religiosos da Reforma e Contra-Reforma protestantes, que fazem parte do contexto histórico do seu advento. **Terceiro momento**, encerramento da aula com a entrega das atividades e indicação da leitura do **Texto X – A natureza das perguntas nas críticas ao sistema astronômico copernicano.**

<b>AULA 14</b>	<b>Tema:</b> <i>A natureza das perguntas nas críticas ao sistema astronômico copernicano</i>
<b>Primeiro Momento (5 min.)</b>	<p>Recolhimento das atividades e apresentação das perguntas para discussão integral do texto desta aula.</p> <p><b>Ação verbal conhecer:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Apresente as perguntas fomentadas pelo advento da astronomia copernicana, durante e depois da morte de Copérnico. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Exemplifique o papel epistemológico das críticas lançadas por Tycho Brahe ao sistema astronômico copernicano. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>3. Expresse o significado do aparecimento da estrela nova em 1572 e do cometa em 1577, em face do início do rompimento com a visão de mundo aristotélica. [<b>Resposta para além do texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal entender:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Discuta sobre as implicações astronômicas dos dados observacionais de Tycho Brahe, considerando sua importância para a constituição de uma nova astronomia. [<b>Resposta para além do texto</b>];</li> <li>2. Que principais distinções cosmológicas encontram-se no modelo híbrido de Tycho Brahe, em relação aos modelos de Aristóteles, Heráclides e Copérnico? [<b>Resposta margeando o texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal aplicar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Esboce as principais ideias astronômicas e cosmológicas do modelo híbrido de universo de Tycho Brahe. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Interprete as ilustrações sobre o aparecimento da estrela nova e do cometa, no contexto do século XVI, fazendo um contraponto com as expectativas da sociedade atual para com alguma “descoberta” da ciência moderna e contemporânea. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>3. Que tipo de relação pode ser estabelecida entre o uso da metáfora na ciência e em outras áreas, como a religiosa, representada pelo “milagre de Josué”? [<b>Resposta para além do texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal analisar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que tipo de visão crítica pode ser observada sobre a produção de conhecimento científico, ao analisar a queixa de Tycho Brahe acerca da disputa com seu contemporâneo Nicolai Reymers Baer, sobre a autoria do modelo híbrido de universo? [<b>Resposta para além do texto</b>];</li> <li>2. Debata sobre a importância dos estudos de Brahe sobre o cometa de 1577, no contexto da seguinte passagem do texto: “[...] em tempos anteriores, na Antiguidade e na Idade Média, por exemplo, os cometas eram classificados como fenômenos sublunares e pertenciam ao campo da meteorologia. Isso significa que os astrônomos, cuja atenção se concentrava exclusivamente em problemas relativos às regiões celestiais, não sentiam necessidade de apresentar teorias sobre os cometas nem demarcar seu curso”. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>3. Sistematize os principais aspectos metodológicos e ontológicos no contexto astronômico, cosmológico e físico de Tycho Brahe, que permitem observar a indicação da direção do pensamento científico europeu rumo ao estabelecimento de uma nova tradição de pesquisa. [<b>Resposta margeando o texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal criar/sintetizar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Comente criticamente sobre a aceitação da astronomia de Copérnico em alguns países europeus, como a Espanha. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Que mensagem positiva pode ser comunicada para o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia, na transição da interpretação dos cometas do domínio da meteorologia para a astronomia? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Escreva sobre os fundamentos das principais críticas, de cunho religioso, lançadas contra a astronomia copernicana. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol>

	<p><b>Ação verbal avaliar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Argumente sobre a seguinte passagem do texto, levando em consideração o fundamento epistemológico que ela transmite quanto à natureza da ciência, no contexto europeu: “[...] o confronto entre teoria e evidência empírica se mostrou um ponto fundamental da prática científica”. <b>[Resposta margeando o texto]</b>;</li> <li>2. Que tipo de julgamento epistemológico pode ser feito, no contexto renascentista europeu, quanto à necessidade de creditar à prática científica e, por conseguinte, à astronomia e as ideias copernicanas, o mesmo status de “verdade”, atribuído somente à filosofia e à teologia? <b>[Resposta margeando o texto]</b>;</li> <li>3. Que tipo de valor epistemológico as implicações astronômicas, cosmológicas, físicas e religiosas, promovidas pelas críticas à astronomia copernicana e pelos problemas empíricos e conceituais, fornecem para a libertação do pensamento europeu da visão de mundo grega? <b>[Resposta margeando o texto]</b>.</li> </ol>
<b>Segundo Momento (35 min.)</b>	<p>Inicialmente, abertura de um breve espaço de tempo para que os estudantes possam explanar suas impressões gerais sobre o texto. Em seguida, aprofunda-se a discussão atentando para os seguintes aspectos: <b>(i)</b> a natureza das perguntas fomentadas pela astronomia copernicana, durante a vida e após a morte de Copérnico, especialmente, com o trabalho de Brahe sobre o aparecimento da estrela e do cometa; <b>(ii)</b> as respostas de Copérnico às perguntas de natureza empírica fomentadas pelo seu sistema astronômico, incluindo seu conceito de gravidade; <b>(iii)</b> a importância dos trabalhos de Brahe sobre o aparecimento da estrela e do cometa, respectivamente, em 1572 e 1577, para o próprio desenvolvimento das ideias e das implicações da astronomia copernicana, incluindo a contestação de Brahe sobre a existência real das esferas cristalinas de Aristóteles; <b>(iv)</b> a importância fundamental dos novos dados astronômicos produzidos por Brahe, para a constituição de uma nova astronomia, posteriormente, com Kepler; <b>(v)</b> as críticas à astronomia copernicana de natureza religiosas; <b>(vi)</b> a utilização da astronomia copernicana na Espanha, por uma perspectiva puramente matemática; <b>(vii)</b> as influências religiosas como fatores determinantes no processo de aceitação das implicações astronômicas, cosmológicas, físicas, filosóficas e metafísicas da astronomia copernicana, no contexto europeu do século XVI; e <b>(ix)</b> destaque para alguns aspectos, características e princípios da natureza da ciência e da produção do conhecimento científico implicados ou transmitidos pelo texto.</p>
<b>Terceiro Momento (5 min.)</b>	<p>Encerramento da aula com a indicação da leitura do <b>Texto XI – As defesas mais proeminentes das ideias copernicanas e suas implicações astronômicas, cosmológicas e físicas</b> – e orientação para realização das atividades.</p>
<b>Tempo Total</b>	<b>50 minutos</b>

## DINÂMICA DA AULA 14

No **primeiro momento** da aula 14, procura-se recolher as atividades da aula anterior e apresentar as perguntas para aprofundar a discussão integral do texto da aula. Em seguida, **segundo momento**, abertura inicial de um breve espaço de tempo para que os estudantes possam apresentar suas impressões gerais sobre a leitura do texto, seguida de aprofundamento da discussão retomando as perguntas apresentadas e atentando para os aspectos pontuados de **(i-ix)**. Nesse momento, é importante que os estudantes compreendam a dimensão das críticas lançadas contra a astronomia copernicana e as suas implicações astronômicas, cosmológicas, físicas, filosóficas, metafísicas e religiosas, como elementos que marcam o momento histórico

das mudanças da visão de mundo europeia, em relação à visão de mundo grega, a partir dessas perspectivas. Coadunando com isso, é fundamental que eles/elas percebam também que cada uma dessas perspectivas aponta, especificamente, para uma transformação em particular, a qual resultará na constituição de uma nova astronomia, uma nova cosmologia, uma nova física. E, por conseguinte, no estabelecimento de uma nova tradição de pesquisa europeia, cuja visão de mundo é cognitivamente distinta da visão de mundo grega, representada pela doutrina e/ou malha conceitual aristotélica. Feito isso, no **terceiro momento**, encerra-se a aula com a indicação da leitura do **Texto XI** – *As defesas mais proeminentes das ideias copernicanas e suas implicações astronômicas, cosmológicas e físicas* – e a orientação da realização das atividades a serem recolhidas na aula seguinte.

<b>AULA 15</b>	<b>Tema:</b> <i>As defesas mais proeminentes das ideias copernicanas e suas implicações astronômicas, cosmológicas e físicas</i>
<b>Primeiro Momento (5 min.)</b>	<p>Recolhimento das atividades e apresentação das perguntas para discussão integral do texto desta aula.</p> <p><b>Ação verbal conhecer:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Cite os principais argumentos de Bruno a favor das ideias de Copérnico, frente aos eruditos escolásticos. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2.Descreva sucintamente cada uma das observações telescópicas de Galileu. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3.Exemplifique como as observações telescópicas de Galileu auxiliaram, em parte, na defesa da astronomia copernicana. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal entender:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Diferencie os argumentos de Galileu dos argumentos dos jesuítas aristotélicos frente à ideia da imutabilidade do mundo supralunar. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2.Explique quais são as principais diferenças entre as defesas da astronomia copernicana por Bruno e Galileu. [<b>Resposta contida no texto</b>]</li> </ol> <p><b>Ação verbal aplicar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Interprete a passagem de texto, a seguir, observando o principal objetivo de Giordano Bruno em defender as ideias copernicanas: “[...] superior por ter-se libertado de alguns falsos pressupostos, para não dizer da cegueira, da filosofia comum e vulgar. No entanto, ele não se afastou muito dela, porque, ao ser mais estudioso da Matemática que da natureza, não pôde penetrar e aprofundar a ponto de arrancar as raízes de princípios vãos e inconvenientes e, com isso, resolver perfeitamente todas as dificuldades contrárias, libertando-se a si mesmo e aos outros de tantas investigações vãs, a fim de contemplar as coisas constantes e certas”. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2.Relacione a defesa da astronomia de Copérnico por Bruno e Galileu com o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia. [<b>Resposta margeando o texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal analisar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Que tipo de crítica a astronomia copernicana foi submetida nos contextos das defesas de Bruno e Galileu? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2.Que tipo de correlação pode ser feita entre o desenvolvimento do pensamento científico e a seguinte passagem do texto? “[...] Para Bruno, Copérnico liberou o espírito humano e deu liberdade ao saber, visto que a inteligência humana sufocava-se no ar abafado de uma prisão estreita, onde só de modo tênue, e, por assim dizer, através de frestas ela podia contemplar as estrelas distantes”. [<b>Resposta para além do texto</b>];</li> <li>3.Sistematize os principais aspectos da defesa da astronomia copernicana por Giordano Bruno e Galileu Galilei. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal criar/sintetizar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Que mensagem Giordano Bruno procurou comunicar em suas passagens pela Inglaterra e Itália? [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2.Construa uma opinião em defesa da astronomia copernicana, frente aos argumentos dos aristotélicos e os conflitos cognitivos que Copérnico fomentou contra a visão de mundo geocêntrica europeia herdada dos gregos. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>3.Escreva sobre o percurso científico de Galileu e a importância de sua formação artística nesse contexto. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>4.Esquemmatize os principais argumentos de Galileu em favor da astronomia copernicana. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal avaliar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Avalie a importância epistemológica das obras de Galileu na constituição de uma nova física e, conseqüentemente, no estabelecimento da tradição de pesquisa europeia. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2.Argumente sobre a seguinte passagem do texto: “[...] O filósofo italiano Giordano</li> </ol>

	<p>Bruno (1548 - 1600) é considerado um mártir da liberdade de pensamento.”  <b>[Resposta margeando o texto];</b>  3. Que tipo de valorização epistemológica Galileu creditou a astronomia copernicana, frente às opiniões dos aristotélicos acerca do conflito com passagens da Bíblia?  <b>[Resposta margeando o texto].</b></p>
<b>Segundo Momento (35 min.)</b>	<p>Abertura inicial de um breve espaço de tempo para que os estudantes possam expressar suas impressões gerais sobre a leitura do texto, seguida de aprofundamento da discussão observando os seguintes aspectos principais: (i) os objetivos e os principais argumentos de Giordano Bruno ao defender a astronomia copernicana; (ii) os fatores religiosos responsáveis pela condenação de Giordano Bruno à morte; (iii) a importância dos argumentos de Bruno para fomentar a constituição de uma nova cosmologia e uma nova visão de mundo europeia; (iv) a importância das observações telescópicas de Galileu para o rompimento com muitas das ideias aristotélicas, como a imutabilidade do mundo supralunar, dentre outras; (v) a importância da formação artística de Galileu, como elemento importante para o reconhecimento de seus trabalhos e sua progressão profissional em sua carreira científica; (vi) os problemas de ordem técnica dos telescópios que dificultaram a plena aceitação das observações de Galileu de 1609 a 1612; e (vii) a importância epistemológica da ressignificação ontológica do conceito de movimento e de repouso para a constituição de uma nova física; (viii) os argumentos de Galileu em defesa do sistema astronômico copernicano.</p>
<b>Terceiro Momento (5 min.)</b>	<p>Encerramento da aula com a indicação da leitura do <b>Texto XII – As contribuições de Galileu para a constituição de uma nova física</b> – e orientação da realização das atividades.</p>
<b>Tempo Total</b>	<b>50 minutos</b>

## DINÂMICA DA AULA 15

No **Primeiro momento** da aula 15, recolhem-se as atividades da aula anterior e apresentam-se as perguntas para o aprofundamento da discussão integral do texto. No **segundo momento**, dar-se um breve de tempo para os/as estudantes expressem suas impressões sobre a leitura do texto, seguido pela retomada das perguntas para a discussão, observando os aspectos pontuados de (i-viii). Nesse momento, é importante que os/as estudantes observem criticamente os impactos dos argumentos de Giordano Bruno e de Galileu, para a constituição de uma nova astronomia, uma nova cosmologia e uma nova física e, por conseguinte, o estabelecimento de uma nova tradição de pesquisa e visão de mundo europeia. Nesse contexto, é possível observar também que essas transformações foram fomentadas direta e indiretamente por acontecimentos culturais, econômicos, políticos, sociais e tecnológicos, representados, por exemplo: pelos movimentos renascentistas (artístico, científico e cultural); expansão marítima exploratória europeia em outros continentes e consequente aumento de riqueza e ascensão econômica da burguesia europeia; e o impacto científico da própria invenção do telescópio. Observados esses aspectos externos, no **terceiro momento**, encerra-se a aula indicando a leitura do **Texto XII**, atentando para a realização das atividades a serem recolhidas no início da aula seguinte.

<b>AULA 16</b>	<b>Tema:</b> <i>As contribuições de Galileu para a constituição de uma nova física</i>
<b>Primeiro Momento (5 min.)</b>	<p>Recolhimento das atividades e apresentação das perguntas para discussão integral do texto desta aula.</p> <p><b>Ação verbal conhecer:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Apresente as soluções de Galileu para os problemas empíricos e conceituais fomentados pela astronomia copernicana. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Descreva as experiências de Galileu. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Expresse o significado da lei da queda dos corpos para a constituição da nova física, considerando a matematização do movimento realizada por Galileu, mediante a relação (<math>d \propto t^2</math>). [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>4. Relate sobre as principais contribuições de outros pensadores ao trabalho de Galileu. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal entender:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que distinções metodológicas e ontológicas são encontradas no trabalho de Galileu, que permitem situar a tradição de pesquisa europeia como cognitivamente distinta da grega? [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2. Discuta sobre a relevância das explicações de Galileu para a constituição da nova física, frente aos problemas empíricos e conceituais fomentados pela astronomia copernicana. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>3. Diferencie os aspectos metodológicos e ontológicos encontrados no trabalho de Galileu na física, com os encontrados nas ideias de Aristóteles e seus seguidores. [<b>Resposta no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal aplicar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Interprete a passagem do texto, a seguir, considerando suas implicações sobre a natureza da ciência, no contexto do século XVII: “[...] Diferente da física de Aristóteles, Galileu está demonstrando que é preciso não somente fazer conjecturas acerca do movimento, na queda dos corpos, como submetê-las indispensavelmente ao escrutínio da própria natureza. E é justamente essa atitude que vai configurar o novo espírito científico no contexto da tradição de pesquisa europeia”. [<b>Resposta para além do texto</b>];</li> <li>2. Compare as explicações apresentadas por Galileu e Mersenne para a pergunta: <i>Por que não somos atirados fora da Terra por sua rotação?</i> [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal analisar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Correlacione a hipótese de Galileu de que a “natureza sempre se manifesta na sua forma mais simples”, com a importância simbólica do valor epistêmico da simplicidade na construção de conhecimentos científicos. [<b>Resposta para além do texto</b>];</li> <li>2. Sistematize as principais contribuições metodológicas e ontológicas de Galileu para o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal criar/sintetizar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que mensagem sobre a natureza da ciência moderna dos séculos XVI e XVII ((,)) pode ser comunicada mediante a passagem do texto: “Galileu teve uma atitude mais perspicaz, em relação à atitude dos filósofos da natureza medievais. Estes atacavam o problema do movimento de maneira meramente hipotética, bem como não empreendiam qualquer tentativa de relacionar suas hipóteses com os movimentos reais do mundo físico”. [<b>Resposta para além do texto</b>];</li> <li>2. Construa uma síntese sobre as principais contribuições de Galileu para a constituição da nova física, no século XVII. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Esquematize as principais objeções dos aristotélicos que acompanham os problemas empíricos e conceituais enfrentados por Galileu. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal avaliar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Argumente sobre os motivos conceituais que impediram Galileu de elaborar a lei da inércia. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Estabeleça um contraste conceitual entre a lei da inércia elaborada por René Descartes,</li> </ol>

	<p>com a ideia do movimento neutro de Galileu. Para Descartes, “[...] A primeira lei da natureza: cada coisa permanece no seu estado se nada o alterar; assim, aquilo que uma vez foi posto em movimento continuará sempre a se mover; a segunda lei da natureza: todo corpo que se move tende a continuar o seu movimento em linha reta. [<b>Resposta contida no texto</b>];</p> <p>3. Argumente sobre a validade histórica contextual das explicações de Galileu, frente aos problemas empíricos e problemas conceituais fomentados pela astronomia de Copérnico, e os estabelecimentos de uma nova física e uma nova tradição de pesquisa europeia cognitivamente distinta da tradição de pesquisa grega. [<b>Resposta para além do texto</b>].</p>
<b>Segundo Momento (35 min.)</b>	<p>Abertura inicial de um breve espaço de tempo para que os estudantes possam apresentar suas impressões gerais sobre o texto, seguido do aprofundamento da discussão do texto, mediante a retomada das perguntas apresentadas e atentando para os seguintes aspectos principais: (i) a importância dos aportes teóricos produzidos por outros pensadores e utilizados por Galileu em seus trabalhos científicos, como elementos que reforçam a coletividade da produção de conhecimentos; (ii) a relevância epistemológica das hipóteses e das experiências de Galileu sobre o movimento dos corpos, para a constituição de uma nova física, substitutiva à física aristotélica; (iii) a validade das explicações de Galileu para os principais problemas empíricos e conceituais fomentados pela astronomia copernicana; (iv) os significados metodológico e ontológico do trabalho de Galileu para a constituição da nova tradição de pesquisa europeia; (v) observação de novos aspectos, características e princípios da natureza da ciência no contexto europeu do século XVI e XVII; e (vi) as razões conceituais que impediram Galileu de formular a lei da inércia e solucionar os problemas fomentados pela astronomia copernicana.</p>
<b>Terceiro Momento (5 min.)</b>	<p>Encerramento da aula com a indicação da leitura do <b>Texto XIII – Johannes Kepler e a constituição de uma nova astronomia</b> – e a orientação da realização das atividades a serem recolhidas na aula seguinte.</p>
<b>Tempo Total</b>	<b>50 minutos</b>

## DINÂMICA DA AULA 16

No **primeiro momento** da aula 16, procura-se recolher as atividades da aula anterior. Em seguida, inicia-se a apresentação das perguntas que irão auxiliar no aprofundamento da discussão integral do texto. No **segundo momento**, abre-se um breve espaço de tempo para os/as estudantes expressarem suas ideias sobre do texto. A partir disso, é dado início ao aprofundamento da discussão, retomando as perguntas já apresentadas, dando destaque aos principais aspectos pontuados (i-vi). É interessante reforçar a importância do caráter coletivo da produção de conhecimento nos aportes teóricos dos pensadores antes de Galileu; a validade das explicações de Galileu aos problemas empíricos e conceituais fomentados pela astronomia copernicana; os aspectos, características da natureza da ciência, no contexto europeu dos séculos XVI e XVII; a importância das hipóteses e experiências de Galileu para lançar os fundamentos da nova física; e a relevância metodológica e ontológica encontrada nas obras de Galileu para o estabelecimento de uma nova tradição de pesquisa. No **terceiro momento**, encerra-se a aula indicando o **Texto XIII** e orientando a atividade da aula seguinte.

<b>AULA 17</b>	<b>Tema:</b> <i>Johannes Kepler e a constituição de uma nova astronomia</i>
<b>Primeiro Momento (5 min.)</b>	<p>Recolhimento das atividades e apresentação das perguntas para discussão integral do texto desta aula.</p> <p><b>Ação verbal conhecer:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Cite os principais aspectos da imposição de Kepler aos limites filosóficos de suas conjecturas acerca do ordenamento do universo. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2.Especifique quais foram as principais críticas metodológicas que Tycho Brahe proferiu contra o trabalho de Kepler. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3.Exemplifique os caminhos metodológicos trilhados por Kepler para solucionar o problema empírico da órbita de Marte. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>4.Descreva conceitualmente as três leis de Kepler na constituição da nova astronomia. [<b>Resposta contida no texto</b>]</li> </ol> <p><b>Ação verbal entender:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Discuta sobre a passagem do texto, a seguir, considerando os papéis da matemática na estruturação dos conhecimentos da nova astronomia de Kepler, em comparação com a astronomia de Platão à Copérnico: “Ao ter colocado os limites para a metafísica kepleriana, Brahe forneceu a Kepler um arrefecimento da possibilidade de fazer astronomia supondo apenas a estrutura matemática subjacente aos fenômenos celestes”. [<b>Resposta para além do texto</b>];</li> <li>2.Que distinções podem ser feitas comparando a nova astronomia de Kepler com a astronomia de Copérnico e de Ptolomeu? [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>3.Diferencie os principais aspectos metodológicos e ontológicos presentes na prática da astronomia por Kepler, em comparação com a prática da astronomia de Ptolomeu e Copérnico. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>4.Que tipo de aceitação as três leis de Kepler, inicialmente, obtiveram frente ao julgamento dos astrônomos de seu tempo? [<b>Resposta margeando o texto</b>]</li> </ol> <p><b>Ação verbal aplicar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Estruture os passos astronômicos de Kepler em direção à suas explicações sobre a causa do movimento dos planetas. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2.Interprete a passagem do texto, a seguir, considerando possíveis motivos que levaram Kepler a abandonar sua ideia: “Kepler buscou uma relação de dependência da força atrativa do Sol com a distância dos planetas, supondo que a intensidade dessa força pudesse variar com o inverso do quadrado da distância média do planeta ao Sol”. “Uma ideia brilhante, mas que foi abandonada, devido às consequências que ele não acreditava serem possíveis”: “uma força do tipo <math>(1/r^2)</math> deveria se estender em todas as direções através do espaço, como ocorre com a luz, e não restringir sua ação ao plano das órbitas planetárias, como acreditava”. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>3.De que maneira os principais aspectos do trabalho de Gilbert estão relacionados com as explicações de Kepler para a causa do movimento dos planetas? [<b>Resposta margeando o texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal analisar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Que tipo de críticas foram feitas ao trabalho de Kepler por seus pares? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2.Debata sobre a passagem do texto, a seguir, considerado, em sua concepção, que imagem sobre a natureza da ciência ela transmite: “Suas [de Kepler] exposições físicas possuem uma mensagem especial para os cientistas que sentiram a necessidade de indagar os primeiros princípios da explicação mecânica da natureza. É válido destacar que, embora seu estudo transmita essa mensagem, alguns comentários de seus pares, físicos e astrônomos alemães, materializaram-se na aversão da comunidade científica, à época, para com a aceitação de suas leis empíricas do movimento planetário”. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>3.Sistematize as perguntas investigadas por Kepler para explicar a causa do movimento dos planetas, juntamente com suas respostas. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal criar/sintetizar:</b></p>

	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que mensagem filosófica sobre a ciência do século XVII pode ser comunicada a partir da passagem do texto: “Suas exposições astrofísicas possuem uma mensagem especial para os cientistas que sentiram a necessidade de indagar os primeiros princípios da explicação mecânica da natureza”. [<b>Resposta para além do texto</b>];</li> <li>2. Produza uma síntese sobre os principais aspectos do trabalho de Kepler, que auxiliaram no estabelecimento de uma nova astronomia. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Esquematize as relações entre os aspectos metodológicos e ontológicos do trabalho de Kepler com a constituição de uma nova astronomia e o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia. [<b>Resposta margeando o texto</b>]</li> </ol> <p><b>Ação verbal avaliar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Argumente sobre as implicações das leis de Kepler para a constituição da nova astronomia e, conseqüentemente, para o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Contraste os argumentos dos astrônomos, cosmólogos e físicos lançados contra a nova astronomia de Kepler, com o seu julgamento a respeito da relevância científica do trabalho de Kepler, frente ao crescimento cognitivo da ciência. [<b>Resposta para além do texto</b>];</li> <li>3. Em face da ideia empírico-indutivista ingênua, pela qual o conhecimento científico é fruto direto da observação dos fatos, julgue o aspecto de Kepler ter generalizado a trajetória da órbita de Marte para os outros planetas, sem analisar seus dados, levando em consideração também às críticas de seus pares contemporâneos. [<b>Resposta para além do texto</b>].</li> </ol>
<p><b>Segundo Momento</b> <b>(35 min.)</b></p>	<p>Abertura inicial de um breve espaço de tempo para que os estudantes possam apresentar suas impressões gerais sobre a leitura do texto, seguido de aprofundamento da discussão, retomando as perguntas e observando alguns aspectos principais: (i) a participação de Kepler no movimento neoplatônico, como um fator de adesão ao sistema astronômico copernicano – refletido em seu primeiro trabalho <i>Mistério cosmográfico</i> fundamentado nos sólidos platônicos; (ii) a imposição do próprio Kepler aos limites filosóficos e metafísicos de suas hipóteses sobre a estrutura do universo; (iii) a importância das críticas de Tycho Brahe ao primeiro trabalho de Kepler, como elemento fundamental para a mudança de atitude metodológica de Kepler quanto à prática de seus estudos astronômicos; (iv) destaque a universalização do conceito de força que Kepler aplicou de maneira qualitativa e quantitativa em seus estudos sobre a causa do movimento dos planetas; (v) a relevância da natureza ontológica das novas perguntas – problemas empíricos e conceituais – que fomentaram o trabalho astronômico de Kepler; (vi) o caminho metodológico trilhado por Kepler para elaborar suas três leis empíricas (aproximadas) sobre o movimento dos planetas; (vii) o trunfo científico de Kepler ao solucionar o problema empírico da órbita do planeta Marte e iniciar o processo de instauração de uma nova astronomia; (viii) o significado do trabalho de Gilbert para o desenvolvimento da ciência do século XVI e XVII, especialmente, abarcado nas ideias de uma explicação mecânica da gravidade; e (ix) situar o trabalho de Kepler como um marco histórico divisor entre a prática astronômica descritiva grega e uma nova prática astronômica dinâmica e causal.</p>
<p><b>Terceiro Momento</b> <b>(5 min.)</b></p>	<p>Encerramento da aula com a indicação da leitura do <b>Texto XIV – A explicação mecânica da gravidade por René Descartes e os problemas empíricos e conceituais na gênese da gravitação universal newtoniana</b> – e orientação da realização das atividades a serem recolhidas na aula seguinte.</p>
<p><b>Tempo Total</b></p>	<p><b>50 minutos</b></p>

## DINÂMICA DA AULA 17

No **primeiro momento** da aula 17, procura-se recolher as atividades da aula anterior e, em seguida, apresentar as perguntas que irão auxiliar o aprofundamento da discussão do texto. No **segundo momento**, inicialmente, abre-se um breve espaço de tempo para que os estudantes possam expressar suas impressões gerais sobre a leitura do texto e, a partir disso, são retomadas as perguntas, considerando os principais aspectos pontuados (**i-x**). Nesse momento, juntamente com esses aspectos, é importante que fique claro para os estudantes toda a complexidade do trabalho de Kepler, quanto as suas tentativas de procura da causa do movimento dos planetas, tendo para isso que abandonar toda a metodologia e ontologia da prática da astronomia até então dominante e secular. Em face disso, perceber a importância dos estudos astronômicos de Kepler para a instauração de uma nova astronomia genuinamente europeia, cujos alicerces metodológicos e ontológicos são cognitivamente distintos da astronomia herdada dos gregos. Além disso, observar também como esse conjunto de aspectos foi fundamental para o estabelecimento de uma nova tradição de pesquisa europeia, aqui, representada pelas áreas da astronomia, da cosmologia e da física. Com isso, poder compreender que a importância do trabalho de Kepler para o desenvolvimento da ciência moderna dos séculos XVI e XVII, diferente do que muitas vezes se apresenta nos livros didáticos de física – simples enunciação de suas três leis –, é muito superior a isso. Dada a atenção para esse conjunto de aspectos do texto, no **terceiro momento**, encerra-se a aula com a indicação da leitura do próximo **Texto XIV** – e a orientação das atividades a serem recolhidas na aula seguinte.

<b>AULA 18</b>	<b>Tema: Texto XIV – A explicação mecânica da gravidade por René Descartes e os problemas empíricos e conceituais na gênese da gravitação universal newtoniana</b>
<b>Primeiro Momento (5 min.)</b>	<p>Recolhimento das atividades e apresentação das perguntas para discussão integral do texto desta aula.</p> <p><b>Ação verbal conhecer:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aponte as principais características da filosofia mecanicista de Descartes. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Descreva as principais características da nova visão cosmológica de Descartes. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Cite quais foram os principais problemas empíricos e problemas conceituais implicados na gênese da teoria da gravitação universal newtoniana. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>4. Especifique como Descartes concebia o papel da matemática na construção de conhecimentos científicos. [<b>Resposta margeando o texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal entender:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que principais distinções podem ser feitas entre a visão cosmológica de Descartes e a visão aristotélica? [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2. Que tipo de representatividade a nova cosmologia cartesiana possui no estabelecimento da tradição de pesquisa europeia? [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>3. Explique a ideia da matéria e do movimento na visão de mundo cartesiana. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal aplicar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Interprete a seguinte passagem do texto: “[...] a filosofia da natureza de Descartes preconizava uma visão de mundo mecanicista, pela qual todos os fenômenos naturais deveriam ser explicados pelas leis da matéria em movimento, diferentemente das ideias aristotélicas”. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2. Esboce o movimento dos planetas no modelo cosmológico de Descartes. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Compare a explicação da gravidade apresentada por Descartes e por Newton. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>4. Relacione a lei da inércia concebida por Descartes com as ideias de Galileu acerca do mesmo tema. [<b>Resposta margeando o texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal analisar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que correlações podem ser feitas entre as ideias cosmológicas de Descartes e o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia? [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2. Sistematize os principais aspectos da visão de mundo cartesiana. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Debata sobre a importância da extensão da matéria na visão de mundo de Descartes. [<b>Resposta margeando o texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal criar/sintetizar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que mensagem sobre a natureza da ciência a filosofia mecanicista de Descartes comunica em relação à nova forma de produção de conhecimento científico? [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2. Esquematize os principais problemas empíricos e problemas conceituais que estavam presentes no contexto da nova astronomia, cosmologia e física nascente nos séculos XVI e XVII. [<b>Resposta contida no texto</b>]</li> </ol> <p><b>Ação verbal avaliar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Argumente sobre a importância da solução dos problemas empíricos e conceituais, no contexto da astronomia, da cosmologia e da física do século XVII, frente ao estabelecimento da tradição de pesquisa europeia. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2. Que contrastes do disperso “quebra-cabeça” científico foram encontrados por Newton no século XVII? [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> </ol>

	3. Avalie as principais implicações da filosofia mecanicista cartesiana na prática científica do século XVII. [ <b>Resposta para além do texto</b> ].
<b>Segundo Momento (35 min.)</b>	Abertura inicial de um breve espaço de tempo para que os estudantes possam apresentar suas impressões gerais da leitura do texto, seguido da retomada das perguntas que irão auxiliar no aprofundamento da discussão, atentando para alguns aspectos principais: (i) a importância da visão de mundo mecanicista cartesiana para o rompimento da visão de mundo aristotélica; (ii) a condição especial da matemática como elemento fundamental para a compreensão das leis da natureza e do universo; (iii) a explicação mecânica da gravidade por Descartes, como expressão de uma visão de mundo europeia cognitivamente distinta da visão de mundo grega; (iv) os problemas empíricos e conceituais que impulsionaram a gênese da teoria da gravitação universal newtoniana; e (v) os aspectos, características e princípios da natureza da ciência dos séculos XVI e XVII subjacentes a esse contexto histórico.
<b>Terceiro Momento (5 min.)</b>	Encerramento da aula com a indicação da leitura do <b>Texto XV – A teoria da gravitação universal newtoniana e o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia do século XVII</b> – e orientação da realização das atividades a serem recolhidas na aula seguinte.
<b>Tempo Total</b>	<b>50 minutos</b>

## DINÂMICA DA AULA 18

No **primeiro momento** da aula 18, procura-se recolher as atividades e apresentar as perguntas que irão auxiliar no aprofundamento da discussão integral do texto da aula. No **segundo momento**, inicialmente, abre-se um breve espaço de tempo para que os estudantes possam expressar suas impressões gerais sobre a leitura do texto e, a partir disso, retomam-se as perguntas para aprofundar a discussão, atentando para os aspectos pontuados (i-v). Nesse momento, como esse texto é bem mais curto e objetivo, quando comparado aos demais até aqui estudados, torna-se importante discuti-lo, procurando transmitir sua ideia principal, que é a contextualização do cenário científico interno nos domínios da astronomia, da cosmologia e da física, que será encontrado por Newton no século XVII. Além disso, mostrar a pertinência desse cenário como um dos aspectos do significado da síntese newtoniana, posto que, para chegar à sua concepção da teoria da gravitação universal, Newton precisou solucionar os problemas empíricos e conceituais encontrados no denominado “despeço quebra-cabeça” de seu tempo, de um modo inteiramente diferente do apresentado pela filosofia mecanicista de Descartes. Observado esse conjunto de aspectos, no **terceiro momento**, encerra-se a aula com a indicação da leitura do **Texto XV** – e a orientação da realização das atividades que serão recolhidas na aula seguinte.

AULA 19	<b>Tema:</b> <i>A teoria da gravitação universal newtoniana e o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia do século XVII</i>
<b>Primeiro Momento (5 min.)</b>	<p>Recolhimento das atividades e apresentação das perguntas para discussão integral do texto desta aula.</p> <p><b>Ação verbal conhecer:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aponte por qual ideia central é possível seguir os passos intelectuais newtonianos em direção à teoria da gravitação universal. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Cite qual foi o principal objetivo de Newton ao tomar as ideias de Kepler e de Galileu para explicar o movimento da órbita da Lua em torno da Terra. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Defina a teoria da gravitação universal newtoniana. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>4. Enuncie as perguntas de natureza empírica e conceitual que Newton teve que resolver para chegar à teoria da gravitação universal. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>5. Expresse o significado da solução do problema conceitual interno de incompatibilidade lógica entre a terceira lei de Kepler e a gravitação universal newtoniana, para o crescimento cognitivo da astronomia, da cosmologia e da física. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>6. Localize a hipótese mais importante na gênese da gravitação universal newtoniana [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal entender:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Discuta sobre a importância conceitual da hipótese de Hooke para a gênese da gravitação universal newtoniana. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>2. Que distinções ontológicas existem entre os diversos conceitos de força encontrados por Newton em seu tempo? [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>3. Diferencie o significado ontológico do conceito de peso na concepção newtoniana, em relação às concepções de Aristóteles, Copérnico e Galileu. [<b>Resposta margeando o texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal aplicar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que tipo de generalização Newton fez para com a ação da força da gravidade? [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>2. Interprete o significado da visão de mundo newtoniana no contexto da tradição de pesquisa europeia. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</li> <li>3. Relacione os principais aspectos metodológicos e ontológicos inerente aos passos intelectuais newtonianos em direção à teoria da gravitação universal, com o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia representada pela astronomia, cosmologia e física no contexto do século XVII. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal analisar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Posicione-se criticamente frente aos aspectos éticos e morais que cercam a controvérsia entre Hooke e Newton inerente à hipótese da lei de força (<math>1/r^2</math>). [<b>Resposta para além do texto</b>];</li> <li>2. Correlacione os principais aspectos que levaram Newton a abandonar seus estudos da mecânica celeste por mais de vinte anos, contrastando-as com as falácias que giram em torno do <i>annus mirabilis</i>. [<b>Resposta contida no texto</b>];</li> <li>3. Debata sobre a importância da contribuição de outros personagens da história da astronomia, da cosmologia e da física, no contexto da construção newtoniana da teoria da gravitação universal, bem como do caráter coletivo da produção do conhecimento científico. [<b>Resposta para além do texto</b>];</li> <li>4. Sistematize os principais passos intelectuais dados por Newton em direção a sua teoria da gravitação universal. [<b>Resposta contida no texto</b>].</li> </ol> <p><b>Ação verbal criar/sintetizar:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que tipo de mensagem sobre a natureza da produção do conhecimento científico pode ser comunicada frente à controvérsia envolvendo Hooke e Newton e a concepção intelectual da lei da força (<math>1/r^2</math>)? [<b>Resposta para além do texto</b>];</li> </ol>

	<p>2. Produza uma síntese acerca das principais ideias newtonianas que permitem estabelecer finalmente a tradição de pesquisa europeia inerente à prática da nova astronomia, cosmologia e física. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</p> <p>3. Esquematize as soluções dos problemas empíricos e conceituais apresentadas por Newton mediante sua teoria da gravitação universal. [<b>Resposta contida no texto</b>].</p> <p><b>Ação verbal avaliar:</b></p> <p>1. Argumente sobre a importância das leis de Kepler para a concepção de Newton da sua teoria da gravitação universal. [<b>Resposta margeando o texto</b>];</p> <p>2. Que contrastes do disperso “quebra-cabeça” científico intelectual foram encontrados por Newton no século XVII? [<b>Resposta margeando o texto</b>];</p> <p>3. Avalie a pertinência do trabalho de Newton e sua relação com o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia astronômica, cosmológica e física, no século XVII. [<b>Resposta para além do texto</b>].</p>
<b>Segundo Momento (35 min.)</b>	<p>Abertura inicial de um breve espaço de tempo para que os estudantes possam apresentar suas impressões gerais da leitura do texto, seguido da retomada das perguntas que irão auxiliar no aprofundamento da discussão, atentando para alguns aspectos principais: (i) os procedimentos metodológicos de Newton para solucionar os principais problemas conceituais do “disperso quebra-cabeça científico” nos domínios da astronomia, da cosmologia e da física, no século XVII; (ii) a importância dos significados ontológicos dos conceitos de peso, força, movimento, dos princípios e das leis físicas para a concepção da teoria da gravitação universal newtoniana; (iii) a importância do caráter coletivo da produção do conhecimento científico representada pelos trabalhos de Galileu, Kepler, Gilbert, Descartes, Hooke, Halley, Wren, Huygens, sem os quais Newton não teria condições de realizar seus feitos científicos; (iv) a importância da dedicação de Newton aos seus estudos de maneira inteiramente autônoma; (v) os principais elementos do trabalho de Newton que caracterizam o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia genuinamente e cognitivamente distinta da tradição de pesquisa grega representada pela astronomia, cosmologia e física; (vi) a relevância de avaliar a natureza da ciência implicadas no contexto dos séculos XVI e XVII; (vii) o significado epistemológico fundamental da solução dos problemas empíricos e dos problemas conceituais apresentados por Newton, por meio de sua teoria da gravitação universal, para, com êxito, concretizar essa incursão histórico-filosófica da história da astronomia, da cosmologia e da física, por uma visão de ciência orientada para a solução de problemas.</p>
<b>Terceiro Momento (5 min.)</b>	<p>Encerramento da aula, sinalizando a finalização da unidade de ensino com uma avaliação final da proposta didática como um todo, na próxima aula - aplicação do opinário de sondagem sobre a receptividade dos estudantes da proposta didática adotada.</p>
<b>Tempo Total</b>	<b>50 minutos</b>

## DINÂMICA DA AULA 19

No **primeiro momento** da aula 19, procura-se recolher as atividades e apresentar as perguntas que irão auxiliar no aprofundamento da discussão integral do texto. No **segundo momento**, inicialmente, abre-se um breve espaço de tempo para que os estudantes possam explanar suas ideias gerais sobre a leitura do texto.

A partir disso, retomam-se as perguntas atentando para os aspectos principais pontuados (i-vii). Nesse momento, além de aprofundar bastante a discussão mediante esses aspectos, é importante cadenciar seu desfecho para a conclusão da incursão histórico-filosófica da história da astronomia, da cosmologia e da física, orientada pela solução dos problemas empíricos e

conceituais. Coadunando com esse cadenciamento, dar ênfase nas principais características das transformações dessas áreas da ciência, tanto por meio da concepção newtoniana da gravitação universal quanto do significado de sua síntese, que permitem situar o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia e da constituição definitiva de sua nova visão de mundo cognitivamente distinta, especialmente, nos termos metodológicos e ontológicos da prática científica.

Nesse desfecho, é imprescindível que os estudantes possam compreender também a dimensão e grandiosidade do trabalho de Newton, juntamente com os demais personagens da história da ciência moderna dos séculos XVI e XVII, como Copérnico, Bruno, Digges, Brahe, Galileu, Kepler, Gilbert, Descartes, Hooke, Halley, Wren, Huygens, no contexto do estabelecimento da tradição de pesquisa europeia nos séculos XVI e XVII, comparável à mesma grandiosidade dos trabalhos dos personagens gregos no estabelecimento de sua tradição de pesquisa e visão de mundo.

Observado esses pontos, no **terceiro momento**, encerra-se a aula com a sinalização de uma avaliação da proposta didática adotada na unidade de ensino e entrega de um terceiro opinário sobre os conteúdos dos textos, que a critério pode ser considerada com uma segunda prova.

<b>AULA 20</b>	<b>Tema:</b> <i>Avaliação da proposta didática</i> da unidade de ensino e entrega da segunda prova
<b>Primeiro Momento (5 min.)</b>	Sinalização inicial da proposta de avaliação da unidade ensino em duas etapas. Na primeira etapa, correspondente a esta aula, os/as estudantes irão responder a um <b>opinário 1</b> , com sete questões para avaliar a proposta didática como um todo. Na segunda etapa, eles/elas irão responder outro <b>opinário 2</b> , sobre os conteúdos da unidade de ensino, dentro de um prazo de tempo hábil, já que este conta com 17 questões – ambos os opinários encontram-se no (ANEXO 2).
<b>Segundo Momento (40 min.)</b>	<p>Entrega do <b>opinário 1</b> para a avaliação dos estudantes sobre a proposta didática, contendo uma orientação para a avaliação e sete perguntas, como descrito a seguir.</p> <p><b>Orientação</b> – <i>Expresse sua opinião em cada uma das sete afirmações, a seguir, indicando se concorda fortemente (CF), concorda (C), discorda (D), ou discorda fortemente (DF) com cada uma delas. Em seguida, justifique sua opinião, por gentileza.</i></p> <p><b>Questões</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Que tipo de interesse o estudo da história da astronomia, da cosmologia e da física pela perspectiva histórico-filosófica da solução dos problemas empíricos e dos problemas conceituais laudanianos despertou em você?</li> <li>2. A estratégia didática da elaboração de perguntas mediante os critérios (A – perguntas com respostas no texto; B – perguntas com respostas margeando o texto; e C – perguntas com resposta para além do texto), contribuiu para dinamizar as discussões em sala de aula?</li> <li>3. A estratégia didática da elaboração de perguntas, mediante os critérios (A – perguntas com respostas no texto; B – perguntas com respostas margeando o texto; e C – perguntas com resposta para além do texto), contribuiu para monitorar e auto avaliar a compreensão dos textos?</li> <li>4. O método <i>feedback</i> por pares contribuiu para melhorar suas perguntas ao longo do curso?</li> <li>5. O método <i>feedback</i> por pares permite uma maior interação entre os estudantes dentro e fora da sala de aula, fornecendo informações de diagnósticos sobre os seus processos de pensamento e aumentou sua motivação e o seu interesse pelos conteúdos estudados?</li> <li>6. A troca das perguntas entre os colegas em sala de aula despertou alguma necessidade de monitoramento ativo da leitura e da compreensão dos textos?</li> <li>7. Como um (a) professor (a), você adotaria a estratégia didática de elaboração de perguntas e respostas em suas aulas de física?</li> </ol>
<b>Terceiro Momento (5 min.)</b>	Encerramento da aula com o recolhimento dos opinários respondidos e entrega da prova escrita sobre o conteúdo dos textos. Agradecimento da participação e contribuições de todos os estudantes ao longo da execução da proposta de ensino.
<b>Tempo Total</b>	<b>50 minutos</b>

### DINÂMICA DA AULA 20

No **primeiro momento** da aula 20, procura-se conversar com os estudantes sobre a de avaliação final da proposta de ensino em duas etapas. Sendo que, na primeira etapa,

correspondente a esta aula, eles/elas irão responder a um opinário para avaliar a proposta de ensino como um todo. Já na segunda etapa, eles/elas irão responder uma prova escrita com 17 questões (ANEXO 1) que abordam os conteúdos de todos os textos da unidade, que será entregue no final da aula, cujo prazo de entrega será estipulado, mais ou menos, em uma semana. No **segundo momento**, entregam-se os opinários aos estudantes para serem respondidos dentro dos 40 minutos de aula. Após isso, no **terceiro momento**, encerra-se a aula com o recolhimento dos opinários, bem como entregando a prova escrita, a ser devolvida uma semana depois. Além disso, agradecer a participação de todos/as estudantes e suas contribuições ao longo de todo o percurso trilhado pela proposta didática implementada.

### COMENTÁRIOS IMPORTANTES DA AULA 20

É importante destacar que, no que diz respeito a uma possível avaliação formal somativa – sob o critério docente –, sugere-se a elaboração de uma prova, cujas questões podem ser selecionadas do acervo das perguntas pertinentes que auxiliaram e motivaram os/as estudantes no aprofundamento das discussões dos textos. A partir dessa possibilidade, observa-se a importância de estabelecer um prazo de uma semana, ou mais, para que os/as estudantes tenham o compromisso e a seriedade de responder a prova, sabendo que as notas dos créditos contemplados pela unidade de ensino podem ser válidas para uma possível aprovação na disciplina.

## ANEXO 1 – OPINÁRIOS DE SONDAGEM

Os Opinários 1 e 2 são utilizados na **Aula 1** e na avaliação final da unidade de ensino, Aula 20.

### OPINÁRIO 1 - SONDAGEM SOBRE A IMPORTÂNCIA DA PERGUNTA NA CIÊNCIA E EM OUTROS CONTEXTOS

*Com base nos conteúdos do vídeo, expresse suas opiniões, respondendo as perguntas, a seguir.*

1. Que reflexão sobre a pergunta os trechos dos vídeos despertaram em você?
2. *Que tipo de análise crítica pode ser realizada sobre a afirmação, “as perguntas constituem o principal instrumento intelectual disponível para a ciência”?*
3. *Que considerações críticas são possíveis tecer sobre a importância da elaboração de perguntas e respostas no âmbito de sala de aula? Discorra, também, sobre os prós e contras desse recurso.*
4. *Que aspectos você considera relevantes ou necessários em uma pergunta? O que é preciso para elaborá-la (e.g., procedimentos metodológicos, imaginação, dúvidas, curiosidade, etc.)?*

#### **OBSERVAÇÃO IMPORTANTE!**

Recomenda-se que, para cada uma dessas perguntas, seja destinada uma lauda. Isso é importante para não limitar as respostas dos/as estudantes.

OPINÁRIO 2 – SONDAÇÃO SOBRE OS CONTEÚDOS DOS TEXTOS.

**Atenção:** *Expresse sua opinião em cada uma das dezessete afirmações, a seguir, indicando se concorda fortemente (CF), concorda (C), discorda (D), ou discorda fortemente (DF) com cada uma delas. Em seguida, justifique sua opinião, por gentileza.*

*É importante observar também que dentre as dezessete afirmações, algumas são positivas e outras negativas, mas isso faz parte do propósito da sondagem!*

**OBSERVAÇÃO IMPORTANTE!**

Neste opinário, devido à grande quantidade de perguntas 17, torna-se necessário induzir os estudantes a sintetizar suas respostas dentro de um quadro menor. Nesse sentido, em cada questão são colocadas siglas [CF ( ) – Concordo Fortemente; C ( ) – Concordo; D ( ) – Discordo; DF ( ) – Discordo Fortemente.

**1 - A história e a filosofia da ciência motiva o estudante a estudar física.**

CF ( )

C ( )

D ( )

DF ( )

Justifique, por gentileza...

---



---



---



---



---



---



---



---

**2 - A abordagem da história da astronomia, da cosmologia e da física, na perspectiva da solução de problemas empíricos e conceituais laudanianos contribui para uma melhor compreensão sobre o desenvolvimento da ciência.**

CF ( )

C ( )

D ( )

DF ( )

Justifique, por gentileza...

---



---



---



---



---



---

**3. A história e a filosofia da ciência, na perspectiva da solução de problemas da ciência, ilustram o caráter provisório das teorias científicas.**

CF ( )	C ( )	D ( )	DF ( )
--------	-------	-------	--------

Justifique, por gentileza...

---



---



---



---



---



---

**4 – Existe algum valor próprio (intrínseco) em compreender certos episódios fundamentais que ocorreram na história do pensamento científico ocidental.**

CF ( )	C ( )	D ( )	DF ( )
--------	-------	-------	--------

Justifique, por gentileza...

---



---



---



---



---



---

**5 – O que deve ser priorizado no ensino de física é o seu produto final, formado por (leis, teorias, conceitos e princípios), e não o processo de construção desses conhecimentos.**

CF ( )	C ( )	D ( )	DF ( )
Justifique, por gentileza...			
<hr/>			

**6 – A história e filosofia da ciência não contribuem para desmistificar certas imagens da ciência e dos cientistas (dogmatismo, neutralidade, método científico universal, a-problemática, a-histórica, a-política, a-econômica, a-cultural, a-religiosa, dentre outras características).**

CF ( )	C ( )	D ( )	DF ( )
Justifique, por gentileza...			
<hr/>			

**7 – O conhecimento científico não é definitivo.**

CF ( )	C ( )	D ( )	DF ( )
--------	-------	-------	--------

Justifique, por gentileza...

---



---



---



---



---



---

<b>8 – As observações e os experimentos são impregnados de teorias.</b>			
<b>CF ( )</b>	<b>C ( )</b>	<b>D ( )</b>	<b>DF ( )</b>
Justifique, por gentileza...			
<hr/>			

<b>9 – A observação neutra, sem teoria não existe.</b>			
<b>CF ( )</b>	<b>C ( )</b>	<b>D ( )</b>	<b>DF ( )</b>
Justifique, por gentileza...			
<hr/>			

<b>10 – As teorias científicas são obtidas dos dados da experiência, adquiridas por observação e experimentos, ou seja, a experiência é a fonte do conhecimento científico.</b>
---

CF ( )	C ( )	D ( )	DF ( )
Justifique, por gentileza...			
<hr/>			

<b>11 - As perguntas da ciência estão, em parte, ligadas a um contexto histórico investigativo e aos compromissos metodológicos e ontológicos assumidos pelos pensadores/cientistas/pesquisadores.</b>			
CF ( )	C ( )	D ( )	DF ( )
Justifique, por gentileza...			
<hr/>			

<b>11 – A solução dos problemas empíricos e dos problemas conceituais não é importante para o desenvolvimento cognitivo da ciência.</b>			
CF ( )	C ( )	D ( )	DF ( )
Justifique, por gentileza...			
<hr/>			

<b>12 – A origem de um problema científico não depende do conhecimento de fatos/fenômenos relevantes conhecidos.</b>			
<b>CF ( )</b>	<b>C ( )</b>	<b>D ( )</b>	<b>DF ( )</b>
Justifique, por gentileza...			
<hr/>			

<b>13 – A validade contextual das soluções dos problemas empíricos denota um caráter duradouro, porém, provisório do conhecimento científico.</b>			
<b>CF ( )</b>	<b>C ( )</b>	<b>D ( )</b>	<b>DF ( )</b>
Justifique, por gentileza...			
<hr/>			

<b>14 – Não há correntes de pensamento divergentes na ciência.</b>			
<b>CF ( )</b>	<b>C ( )</b>	<b>D ( )</b>	<b>DF ( )</b>

Justifique, por gentileza...

---



---



---



---



---



---

**15 – Os avanços científicos estão ligados às mudanças de visão de mundo e das abordagens metodológicas e ontológicas dos problemas da ciência.**

CF ( )	C ( )	D ( )	DF ( )
Justifique, por gentileza...			
<hr/>			

**16 – O episódio histórico da astronomia copernicana teve impacto importante para o desenvolvimento da ciência moderna do século XVI a XVII.**

CF ( )	C ( )	D ( )	DF ( )
Justifique, por gentileza...			
<hr/>			

**17 – Os avanços científicos estão ligados às mudanças de visão de mundo e das abordagens metodológicas e ontológicas dos problemas da ciência.**

**CF ( )**

**C ( )**

**D ( )**

**DF ( )**

Justifique, por gentileza...

---

---

---

---

---

---

---

## ANEXO 2 – APRESENTAÇÃO EM POWER POINT DA EPISTEMOLOGIA DE LAUDAN

Destaca-se que, as imagens que apresentadas, foram colocadas em formato de extensão.pdf. Devido a isso, quando o professor ou a professora for fazer uso desta apresentação, será preciso realocar novamente para o formato *Power Point*.

SLIDES 1-2.



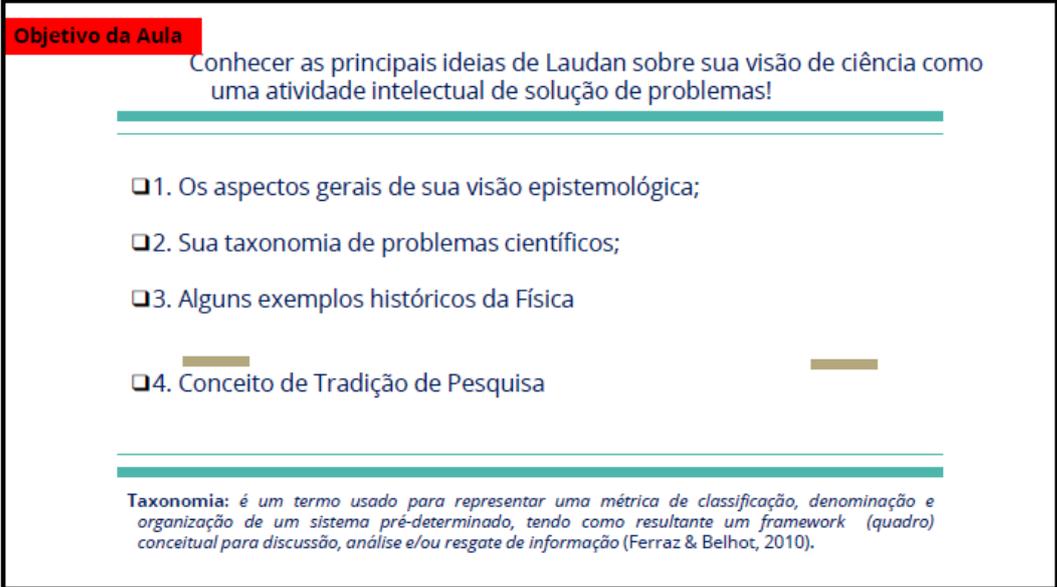

**Universidade Federal de Santa Catarina**  
 Departamento de Física  
 Disciplina: Evolução dos Conceitos da Física – 2020.1
 

---

**As concepções epistemológicas de Larry Laudan: a ciência como uma atividade de solução de problemas**

---

Prof. Me. Carlos A. S. Batista  
 E-mail: [casbatistauesc@gmail.com](mailto:casbatistauesc@gmail.com)



**Objetivo da Aula**

Conhecer as principais ideias de Laudan sobre sua visão de ciência como uma atividade intelectual de solução de problemas!

---

- 1. Os aspectos gerais de sua visão epistemológica;
- 2. Sua taxonomia de problemas científicos;
- 3. Alguns exemplos históricos da Física
- 4. Conceito de Tradição de Pesquisa

---

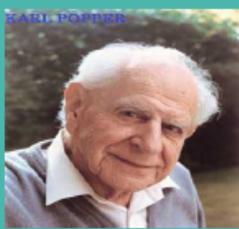
**Taxonomia:** é um termo usado para representar uma métrica de classificação, denominação e organização de um sistema pré-determinado, tendo como resultante um framework (quadro) conceitual para discussão, análise e/ou resgate de informação (Ferraz & Belhot, 2010).

## SLIDES 3-4.

 <p>Larry Laudan</p> <p>Nasceu em 1941, cidade de Austin/Texas - Estados Unidos</p>	<h3>Vida Acadêmica</h3> <p>Bacharel em Física pela Universidade de Kansas – 1962 PhD em Filosofia na Universidade de Princeton – 1965.</p> <p>Lecionou História e Filosofia da Ciência durante vários anos, e em várias universidades - University College London”, na Universidade de Cambridge e nas Universidades do Hawaii, Illinois, Melbourne, Minnesota e Rochester.</p> <p>Fundador do Departamento de História e Filosofia da Ciência da Universidade de Pittsburgh.</p> <p>Atualmente, é pesquisador sênior no “Instituto das las Investigaciones Filosóficas” da Universidade Autónoma Nacional do México (UNAM)</p>
--	---

<h3>Principal Obra</h3> <p><b>Progress and its Problems: Towards a Theory of Scientific Growth - 1977</b></p> <p><i>O Progresso e seus problemas: rumo a uma teoria do crescimento científico - 2011</i></p>	<h3>Demais Obras</h3> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <i>Science and hypothesis</i> - 1981</li> <li>➤ <i>Science and values</i> - 1984</li> <li>➤ <i>Science and relativism: Dialogues on the philosophy of science</i> - 1990</li> <li>➤ <i>The book of risks</i> - 1995</li> <li>➤ <i>Beyond positivism and relativism</i> - 1996</li> <li>➤ <i>Danger ahead</i> -1997</li> <li>➤ <i>Truth, Error and Criminal Law: an essay in legal epistemology</i> - 2005.</li> </ul>
--	--

## SLIDES 5-6.

		
<p>Larry Laudan</p>	<p>Karl Popper (1902-1994)</p>	<p>Imre Lakatos (1922-1974)</p>
<p>Foi aluno e/ou colega de estudiosos da história e filosofia da ciência contemporâneas</p>		
<p>Taxonomia dos problemas científicos</p>		
<p>Conceito de Tradição de Pesquisa</p>		
		
	<p>Thomas Kuhn (1922-1996)</p>	<p>Paul Feyerabend (1924-1994)</p>

## Aspectos gerais

## O Progresso e seus Problemas: rumo a uma teoria do crescimento científico

*"Temos de explicar por que a ciência – exemplo mais certo de um conhecimento sólido – progride como progride; antes, temos de descobrir como, na verdade, ela progride."* (Thomas S. Kuhn)

**Objetivo:** esboçar uma visão epistemológica que vê a ciência, acima de tudo, como uma atividade de solução de problemas



O **objetivo da ciência** (ou de qualquer investigação intelectual) é a **resolução ou a clarificação de problemas** (Laudan, 2011).

SLIDES 7-8.

**Aspectos gerais**

**Fonte de Análise**

Episódios da história da ciência

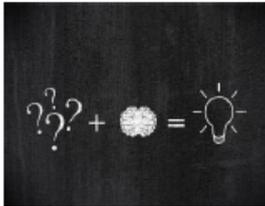
Física   Biologia   Geologia   Química

**Metodologia:** análise psicológica ou cognitiva) da atividade científica

**Produto da obra:** um modelo de progresso científico baseado na solução de problemas

**Aspectos gerais**

*Racionalidade da Ciência* está associada a escolha de teorias que resolve mais problemas do que as suas rivais



*Progresso científico* é um progresso cognitivo ligado às **aspirações intelectuais** da Ciência

1. O que são os problemas científicos?
2. Como são definidos/classificados?
3. Como surgem os problemas científicos na ciência?
4. Que exemplos históricos ilustram essas definições?

## SLIDES 9-10.

## 1. O que são os problemas científicos?

---

**Os problemas científicos constituem as perguntas da ciência!**


---



---

**As 20 grandes perguntas da ciência**


---

- |   |   |
|---|---|
| 1. De que é feito o universo?<br>2. Como a vida começou?<br>3. Estamos sós no universo?<br>4. O que nos torna humanos?<br>5. O que é a consciência?<br>6. Por que sonhamos?<br>7. Por que existe matéria?<br>8. Existem outros universos?<br>9. Onde colocamos todo o carbono?<br>10. Como conseguimos mais energia do sol? | 11. O que há de tão estranho nos números primos?<br>12. Como derrotar as bactérias?<br>13. Os computadores podem continuar se acelerando?<br>14. Encontraremos a cura para o câncer?<br>15. Quando poderei ter um mordomo robô?<br>16. O que há no fundo do oceano?<br>17. O que há no fundo de um buraco negro?<br>18. Podemos viver para sempre?<br>19. Como solucionar o problema da população?<br>20. É possível viajar no tempo? |
|---|---|
- 

---

**As teorias são respostas às perguntas da ciência**


---

*Tese 1: A primeira e essencial prova de fogo para qualquer teoria é se ela oferece respostas aceitáveis a perguntas interessantes: em outras palavras, se oferece soluções satisfatórias a problemas importantes (Laudan, 2011, p. 20).*

*Tese 2: Ao avaliar os méritos das teorias, é mais importante perguntar se constituem soluções adequadas a problemas significativos que perguntar se são "verdadeiras", "corroboradas", "bem confirmadas" ou justificáveis de outra maneira dentro do quadro conceitual da Epistemologia contemporânea (Ibid., p. 21)*

"É plausível pensar que o contraponto entre os problemas instigantes e as teorias adequadas é a dialética básica da ciência"! (Idem)

---

Como julgar a importância de um problema?

Qual a natureza das teorias e sua relação com os problemas que as geram, ou que as vezes por elas gerados?

SLIDES 11-12.

### Para refletir

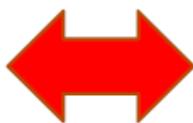
1. Na opinião de vocês, o que é possível dizer sobre o papel das teorias na ciência?
2. Qual é o significado de uma teoria científica para vocês?
3. As teorias científicas podem ser julgadas como verdadeiras ou falsas? Justifique!

### Taxonomia dos Problemas Científicos

2. Como são definidos/classificados os problemas científicos?

A Ciência procura resolver dois tipos de problemas!

**Problemas  
Empíricos**



**Problemas  
Conceituais**

*Será que existe alguma relação entre esses dois tipos de problemas?*

## SLIDES 13-14.

**Taxonomia dos Problemas Científicos: os problemas empíricos**

*Definição geral: são quaisquer coisas presentes no mundo natural que necessitem de explicações.*

*Por que corpos pesados caem com espantosa regularidade na direção do centro da Terra?*



Fonte: Google Imagem

*Por que o álcool deixado em um recipiente aberto logo desaparece?*



Fonte: Google Imagem

*Por que a descendência em plantas e animais são semelhante aos seus genitores?*



Fonte: Google Imagem

De modo específico: são perguntas substantivas acerca dos objetos (fenômenos naturais) que constituem o domínio de determinada ciência, em determinado contexto investigativo e histórico.

**Taxonomia dos Problemas Científicos: os problemas empíricos**

As investigações empíricas atende o pressuposto de que "o mundo é percebido através de "lentes" de uma ou outra malha conceitual.



As malhas e as linguagens que as lentes pertencem fornecem uma *matiz* (gradação) ao que é percebido.

*Os pressupostos teóricos que mudam com o tempo, dizem-nos o que esperar e o que parece peculiar, "problemático" ou "questionável". Existência de um contexto investigativo que define os problemas e depende das teorias que possuímos*

SLIDES 15-16.

**Taxonomia dos Problemas Científicos: os problemas empíricos**

*Um problema empírico importante sempre tem um prêmio para a sua solução!*

Prêmio Nobel	Energy Globe Awards	Prêmio Crafoord	Medalha Copley
			
Alfred B. Nobel (1833-1896)			
Realizações nas áreas de física, química, fisiologia ou medicina, literatura e paz	Projetos que envolvam uso consciente e econômico de recursos naturais e explorem fontes de energia alternativas.	Pesquisas internacionais inovadoras em astronomia, matemática, geociência e biociência	Pesquisador responsável por realizações de destaque nas áreas das ciências físicas e biológicas.

**Taxonomia dos Problemas Científicos: os problemas empíricos**

2. Como são definidos/classificados?

- (1) **Problemas empíricos não resolvidos** que ainda não foram adequadamente resolvidos por nenhuma teoria, indicando linhas para futuras investigações". (Laudan, 2011, p. 26) - Estimulam o crescimento e o progresso da ciência.
- (2) **Problemas empíricos resolvidos** que foram resolvidos adequadamente por uma teoria, contando ponto para a teoria". (Idem)
- (3) **Problemas empíricos anômalos** que determinada teoria não resolveu, mas outras teorias concorrentes, sim". (Idem) - A ocorrência de uma anomalia levanta dúvidas quanto à teoria que a exhibe, mas não a obriga abandoná-la.

*Uma das marcas de progresso científico é transformação de problemas empíricos anômalos e não resolvidos em problemas resolvidos. Sobre toda e qualquer teoria, devemos perguntar quantos problemas resolveu e com quantas anomalias se depara. (Laudan, 2011, p. 26-27)*

## SLIDES 17-18.

## 2. Como são definidos/classificados?

## Problemas empíricos não resolvidos

*Supõe-se que: (i) conjunto de problemas não resolvidos em determinado contexto histórico é delimitado e definido; (ii) os cientistas têm noção de quais problemas não resolvidos devem ser solucionados por suas teorias; e (iii) o fracasso de uma teoria em assimilar seus problemas não resolvidos é um defeito óbvio.*

*Os problemas não resolvidos só são considerados genuínos quando já não são não resolvidos. Até serem resolvidos por alguma teoria em seu domínio, são em geral apenas problemas "em potencial" e não em ato.*

Por que?

**Primeiro fator:** falta de certeza se objeto empírico é genuíno; dificuldade de reproduzir os resultados experimentais; dificuldade de isolar os sistemas físicos; falta de confiabilidade nos instrumentos de medição; resultados esquisitos gerados pela teoria dos erros.

**Segundo fator:** depois de um objeto empírico ter sido autenticado, não fica claro de modo algum a que domínio da ciência ele pertence.

## 2. Como são definidos/classificados?

## Problemas empíricos não resolvidos

*O fato da Lua parecer maior no horizonte é um problema para as teorias astronômicas, para as ópticas ou para as psicológicas?*



*A contorção da perna eletrificada de um sapo é um problema de biologia, de química ou da teoria da eletricidade?*



Fonte: Raicik (2019, p. 118)

*Durante muito tempo na história da ciência, esses problemas empíricos foram tidos como não resolvidos, e não era claro a área que pertenciam!*

## SLIDES 19-20.

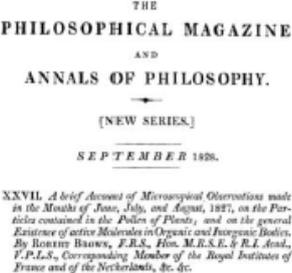
2. Como são definidos/classificados? **Problemas empíricos não resolvidos**

O exemplo histórico do **problema do movimento browniano**

O problema do movimento browniano foi discutido amplamente pela primeira vez, em 1828, pelo botânico e físico escocês Robert Brown (1773-1858).



Robert Brown -1828



Um Breve Conto das Observações Microscópicas, 1827, sobre as Partículas contidas no pólen das plantas; e sobre a existência geral de moléculas ativas em corpos orgânicos e inorgânicos.



Tito Lucrécio (99 a. C – 50 a. C): poema *De rerum natura* - Sobre a Natureza das Coisas, 60 A.C.



Jan Ingenhousz (1730-1799), fisiologista, biólogo e químico neerlandês

Partículas de poeira de carvão em álcool.



O problema do movimento browniano **Problemas empíricos não resolvidos**

Enquanto estudava o pólen, Brown observou partículas dentro dos grãos de pólen em um estado de movimento constante. Ele estendeu suas observações a matéria morta e inorgânica e descobriu que esse movimento não se restringia ao pólen vivo, mas podia ser observado em qualquer substância moída suficientemente fina (cinzas) para ser suspensa na água. Brown se convence sobre a natureza física do fenômeno!!!

*O movimento aleatório de partículas microscópica imersas em fluido, causado pelo choque das moléculas do fluido nessas partículas microscópicas.*

“Durante as décadas de 1830 e 1840, esse problema foi visto ora como um problema da **biologia** – sendo as partículas brownianas talvez “animálculos”, ora **da química**, ora da **óptica da polarização**, ora de **condutividade elétrica**, ora um problema **da teoria do calor**, ora como um **efeito mecânico** absolutamente sem interesse, complicado e insignificante demais para valer o esforço de se procurar uma solução, ora como um **absoluto não problema**”.

Até a primeira metade do século XIX esse **problema não pertencia a nenhuma dessas áreas**, como também não tinha solução. Até surgir como uma das **anomalias centrais da termodinâmica clássica**, e se tornou nas mãos de Albert Einstein (1789 – 1955) e Jean Perrin (1870-1942), um dos sucessos triunfais da teoria cinético-molecular do calor – Sustentação cabal da hipótese atômica!!

## SLIDES 21-22

Albert Einstein -  
1905**O problema do movimento browniano**

Um dos trabalhos intelectuais mais notáveis de todos os tempos: tese de doutorado e artigo ambos de 1905.

Na tese: "Einstein analisa o fenômeno de difusão das partículas do soluto numa solução diluída (partículas de açúcar em água) com o objetivo de obter estimativas para o número de Avogadro e o diâmetro das partículas do soluto" (Salinas, 2005)

O resultado final, expressão que relaciona o coeficiente de difusão (D) com a temperatura (T) e a viscosidade do fluido ( $\eta$ ).

$$D = \frac{RT}{6\pi a\eta N_A} \quad a = 9,9 \times 10^{-8} \text{ cm.}$$

$$N_A = 2,1 \times 10^{23} \text{ (partículas por mol)}$$

Com dados experimentais melhores, o valor do número de Avogadro foi aperfeiçoado para:

$$N_A = 3,3 \times 10^{23}$$

A realidade de átomos e moléculas foi imposta sobre a incredulidade dos energicistas como o físico Ernest Mach (1838-1916) e químico e filósofo alemão Wilhelm Ostwald (1853-1932) ((Salinas, 2005)).

Albert Einstein -  
1905**O problema do movimento browniano**

No artigo de 1905: Através de raciocínio probabilístico, Einstein obtém a expressão do percurso quadrático médio no movimento browniano (Salinas, 2005).

$$\langle x^2 \rangle = 2Dt = \frac{RT}{3\pi N_A a\eta} t$$

O desvio quadrático médio  $\langle x^2 \rangle$  e o tempo (t) podem ser medidos (conhecendo-se T,  $\eta$  e a (raio da partícula), sendo possível determinar o número de Avogadro  $N_A$

Einstein indicou claramente a grandeza que deveria ser medida, isto é, distâncias de percurso médio das partículas!

## SLIDES 23-24.



Jean Baptiste Perrin - 1908

### O problema do movimento browniano

O tratamento de Einstein forneceu uma estimativa do número de Avogadro

As experiências consistiram em registrar a observação, no microscópio, do movimento de um conjunto grande de partículas em suspensão, cuja forma esférica podia ser muito bem controlada.

Nova estimativa para o número de Avogadro. Os valores obtidos e a concordância com a teoria de Einstein representaram contribuição significativa para a aceitação geral do atomismo!

**Prêmio Nobel para Perrin em 1926**

### Movimento aleatório de uma partícula browniana

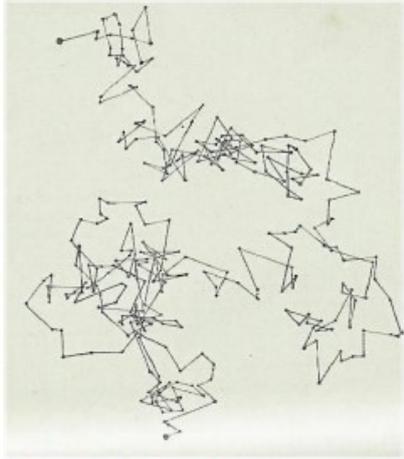


Imagem da trajetória de uma partícula executando movimento browniano (Silva & Lima, 2007). Publicada por Perrin em 1909.

### O problema do movimento browniano

1. O tratamento difusivo de Einstein - 1905;
2. A variante estocástica ou de força flutuante de Paul Langevin - 1908;
3. Abordagem via equação de Fokker-Planck / ou equação avançada de Kolmogórov - 1931
4. As caminhadas aleatórias de Mark Kac - 1947.

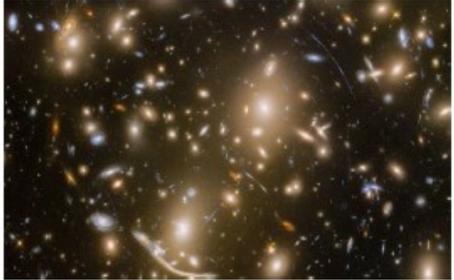
### Abordagens teóricas do movimento browniano

#### Molecular diffusion







SLIDES 25-26.

**Taxonomia dos Problemas Científicos: problemas empíricos resolvidos**

(2) **Problemas empíricos resolvidos** que foram resolvidos adequadamente por uma teoria, contando ponto para a teoria”.

A solução do problema empírico do movimento browniano contou ponto para a **teoria cinético-molecular do calor**, frente às suposições teóricas concorrentes: da óptica da polarização; da condutividade elétrica; da teoria do calor; do efeito mecânico; e, principalmente, sobre a incredulidade da existência de átomos e moléculas dos energeticistas como Mach e Ostwald.

Transformar problemas não resolvidos em resolvidos é o principal modo pelo qual as teorias estabelecem suas credenciais científicas!

**Taxonomia dos Problemas Científicos: problemas empíricos resolvidos**

Três aspectos devem ser observados no âmbito desses problemas:

**O caráter aproximativo da solução de problemas**

Em geral, as previsões teóricas chegam bem perto da reprodução dos dados que constituem um problema específico, sem coincidência de resultados.

Razões, “casos ideais”; o não isolamento dos sistemas reais, imperfeições em nossos instrumentos de medida, discrepância entre previsões teóricas e resultados obtidos em laboratório!

Newton não explicou exatamente o movimento dos planetas!

A teoria da relatividade geral de Einstein não implicou exatamente as observações Eddington!

A termodinâmica não se encaixa com precisão nos dados de transferência de calor de nenhum motor a vapor conhecido!

## SLIDES 27-28.

**Taxonomia dos Problemas Científicos: problemas empíricos resolvidos**

Três aspectos devem ser observados no âmbito desses problemas:

**A irrelevância da verdade e da falsidade para resolver um problema**

“Os cientistas em geral não o fazem, nem precisamos considerar questões de verdade e falsidade ao determinar se uma teoria resolve ou não um problema empírico” (Laudan, 2011, p. 36)

*A teoria de Ptolomeu sobre os epiciclos resolveu o problema do movimento retrógrado dos planetas, independente de aceitarmos ou não a verdade da astronomia dos epiciclos!*

*Da mesma forma, a teoria ondulatória da luz de Thomas Young, resolveu o problema da dispersão da luz!*

*A teoria da oxidação de Lavoisier, resolveu o problema de por que o ferro fica mais pesado depois de aquecido!*

*Em geral, pode-se considerar que qualquer teoria T, resolva um problema empírico, se funcionar (significativamente) em qualquer esquema de inferência cuja conclusão for uma declaração do problema (Idem)*

**Taxonomia dos Problemas Científicos: problemas empíricos resolvidos**

Três aspectos devem ser observados no âmbito desses problemas:

**A frequente não permanência das soluções**

Uma das mais ricas e saudáveis dimensões da ciência é o aumento ao longo do tempo do rigor dos padrões exigidos para que algo seja tido como solução para um problema.

O que uma geração de cientistas aceita como solução perfeitamente adequada muitas vezes será visto pela geração seguinte como resposta inapelavelmente inadequada!!

Em Física, Aristóteles cita o problema da queda dos corpos como um fenômeno central para qualquer teoria mecânica terrestre – **suas respostas foram levaras a sério por mais de 2 mil anos!!**

Como veremos, para Galileu, Descartes, Huygens e Newton, por exemplo, as ideias de Aristóteles não eram de modo nenhum soluções reais do problema da queda dos corpos

Aristóteles não conseguia explicar o caráter uniformemente acelerado dos corpos em queda!

## SLIDES 29-30.

**Taxonomia dos Problemas Científicos: problemas empíricos anômalos**

(3) **Problemas empíricos anômalos** que determinada teoria não resolveu, mas outras teorias concorrentes, sim". (Idem) - A ocorrência de uma anomalia levanta dúvidas quanto à teoria que a exhibe, mas não a obriga abandoná-la.

*Anomalia é uma situação empírica que, embora não ofereça razões definitivas para se abandonar uma teoria. Provoca dúvidas racionais acerca das credenciais empíricas. (Laudan, 2011, p. 41)*

*As anomalias constituem objeções importantes, mas não necessariamente decisivas, a qualquer teoria que as apresente – problemas empíricos que provocam dúvidas razoáveis acerca da adequação empírica de uma teoria (Ibid., p. 42).*

*Toda vez que um problema empírico, p, tiver sido resolvido por alguma teoria, então p passa a constituir uma anomalia para toda teoria no campo relevante que não o resolva (Ibid., p. 43)*

**Taxonomia dos Problemas Científicos: problemas empíricos anômalos**

Exemplos históricos

Estudo clássico de Galileu sobre o movimento pendular

Nos séculos XVII e XVIII, a medição precisa do tempo era extremamente importante para a navegação (Mendes & Batista, 2014). Na época, a medição de latitudes era feita com boa precisão, diferentemente da medição de longitude!

Governos de países como a Espanha e a Holanda ofereciam grandes prêmios para aqueles que resolvessem satisfatoriamente o problema da medição de longitudes!!



Necessidade desperta o interesse de Galileu Galilei, Jean Dominique Cassini, Christian Huygens, Isaac Newton, entre outros! (Mendes & Batista, 2014)

Galileu, em particular, critica as teorias cinemáticas de seus antecessores por não conseguirem explicar a matemática do movimento pendular! As teorias não davam nenhuma previsão correta sobre a geometria do peso movente

SLIDES 31-32.

<b>Problemas Conceituais Internos</b>	"Quando T apresenta certas incoerências internas ou quando suas categorias básicas de análise são vagas e pouco claras". (Laudan, 2011, p.68)
<b>Problemas Conceituais Externos</b>	"Quando T está em conflito com outra teoria ou doutrina, T', que os defensores de T acreditam ser bem fundamentada; esses são os problemas conceituais externos". (Laudan, 2011, p.68)
<p><b>Dificuldades intracientíficas</b> - <i>"Uma nova teoria em alguma área científica faz suposições incompatíveis com as de outra teoria científica, que se têm boas razões para ser aceita"</i>.</p> <p><b>Dificuldades normativas</b> - "Uma teoria científica está em conflito com as teorias metodológicas da comunidade científica Laudan (2011, p.81)</p> <p><b>Dificuldades relacionadas a visão de mundo</b> - "A incompatibilidade ou a falta de reforço mútuo não está dentro do quadro da própria ciência, mas entre a ciência e as nossas crenças "extra científicas" (Laudan, 2011, p.86) relacionadas com áreas bastante diversas (Metafísica, Lógica, Ética e a Teologia).</p>	

<b>Problemas Conceituais Internos</b>
<p>Exemplo. [...] "o primeiro modelo de interação elétrica concebido por Faraday foi criado para eliminar o conceito de ação a distância (já um problema conceitual na primeira Física newtoniana). Infelizmente, como mostrou Robert Hare, o próprio modelo de Faraday exigia ações a distância de pequeno alcance. Faraday simplesmente substituíra um conceito inútil por seu equivalente virtual. Pior ainda, o modelo de Faraday- como Hare indicou de maneira perspicaz - postulava partículas "contiguantes", que, na realidade, não eram contíguas. Esse tipo de crítica levou Faraday a repensar suas ideias acerca da matéria e da força e foi, por fim, responsável pelo surgimento da teoria de campo de Faraday, que evitava esses problemas conceituais". (Laudan, 2011, p.70)</p>

SLIDES 33-34.

### Problemas Conceituais Externos (Dificuldades relacionadas a visão de mundo)

Por exemplo, um dos problemas conceituais centrais que afligia os newtonianos no século XVIII, dizia respeito à ontologia das forças.

“Críticos como Leibniz e Huygens questionaram como os corpos podiam exercer força sobre pontos muito distantes deles mesmos. Que substância transporta a força atrativa do Sol pelos 90 milhões de milhas de espaço vazio, para que a Terra seja puxada na direção dele? Como, em um nível mais prosaico, pode um ímã arrastar em sua direção um pedaço de ferro que está a vários centímetros de distância? Tais fenômenos pareciam desafiar à própria lógica de se falar de substâncias e de propriedades, uma vez que as propriedades (por exemplo, o poder de atração) pareciam capazes de se desprender dos corpos materiais de que eram as propriedades”. (Laudan, 2011, p.87)

### Tradição de Pesquisa

A tradição de pesquisa, “um conjunto de afirmações e negações ontológicas e metodológicas”, que proporciona diretrizes para o desenvolvimento de teorias científicas (Laudan, 2011, p.113).

É também um conceito alternativo ao conceito de *paradigma* de Thomas Kuhn e de *programa de pesquisa* de Imre Lakatos.

- ❑ A principal diferença: a “tradição de pesquisa” pode alterar-se substancialmente no decorrer do tempo, inclusive nas suas doutrinas mais centrais. Não há um núcleo irreduzível e inalterável.
- ❑ Porém, a noção de tradição de pesquisa é bem mais vaga e de delimitação mais difícil que as noções de “paradigma” e “programa de pesquisa”, e pode dar margem a dúvidas, uma vez que pode não ficar claro quando uma tradição de pesquisa terminou e outra começou.

SLIDES 35-36.

### Tradição de Pesquisa

Com a caracterização dos problemas (empíricos e conceituais), Laudan define um critério (quantitativo) para medir o progresso de uma tradição de pesquisa relativamente à outra:

- ❑ deve-se calcular o número de problemas (empíricos e conceituais) importantes e resolvidos por determinada tradição e diminuir dele o número de anomalias e problemas conceituais importantes que as teorias geram.

Um critério objetivo de progresso científico, seria:

- ❑ uma tradição é mais progressiva que outra se resolve uma quantidade maior de problemas significativos e gera uma quantidade menor de anomalias e problemas conceituais.

Desse critério pode ser derivado, também, um critério de racionalidade:

- ❑ as escolhas mais progressivas são as mais racionais (Laudan, 2011).

### REFERÊNCIAS

LAUDAN, L. *O Progresso e seus Problemas: rumo a uma teoria do crescimento científico*. 1ª ed., Tradução de Roberto Leal Ferreira. São Paulo: Editora UNESP, 2011.

MENDES, G. H. G.; BATISTA, I. L. Síntese Histórica da Matematização do Pêndulo Simples. In: ENCONTRO PARANAENSE DE EDUCAÇÃO MATEMÁTICA. 12, Campo Mourão,. ISSN 2175-2044. Disponível em: <<http://sbemparana.com.br/arquivos/anais/epremxii/ARQUIVOS/COMUNICACOES/CCAutor/CCA034.PDF>>. Acesso: 12 fev., 2020.

RAIČIK, A. A rã enigmática e os experimentos exploratórios: dos estudos iniciais de Galvani à sua teoria da eletricidade animal. *Revista Brasileira de História da Ciência*. Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p. 114-137. Disponível em: <[https://www.sbhc.org.br/arquivo/download?ID\\_ARQUIVO=2863](https://www.sbhc.org.br/arquivo/download?ID_ARQUIVO=2863)>. Acesso: 12 fev., 2020.

SALINAS, S. R. A. Einstein e a teoria do movimento browniano. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. São Paulo, v.27, n. 2, p. 263-269, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1806-11172005000200013>>. Acesso: 12 fev., 2020.

SILVA, J. M.; LIMA, J. A. S. Quatro abordagens para o movimento browniano. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. São Paulo, v. 29, n. 1, p. 25-35, 2007. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/rbef/v29n1/a07v29n1.pdf>>. Acesso: 12 fev., 2020.

### ANEXO 3 – APRESENTAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE ENSINO

#### ESTRATÉGIA DIDÁTICA DA ELABORAÇÃO DE PERGUNTAS E RESPOSTAS DO PARECER AVALIATIVO – *FEEDBACK* POR PARES

Segundo David Bloom (1956), a evolução do pensamento crítico pode ser aferida no do domínio cognitivo a partir das seguintes ações: **Conhecer – Lembrar – Compreender – Entender – Aplicar – Analisar – Sintetizar/criar – Avaliar.**

Para cada uma dessas categorias gerais, é possível listar um conjunto de ações verbais específicas. **Categoria do conhecimento - Ação verbal conhecer:** apontar, citar, classificar, definir, descrever, distinguir, enumerar, enunciar, especificar, estabelecer, exemplificar, expressar, identificar, ordenar, relacionar, relatar, etc. **Categoria da compreensão - Ação verbal entender:** Explicar, ilustrar, representar, diferenciar, discutir, exprimir, interpretar, extrapolar, localizar, descrever. **Categoria de aplicação – Ação verbal aplicar:** Esboçar, estruturar, generalizar, ilustrar, interpretar, organizar, relacionar, comparar. **Categoria de análise – ação verbal analisar:** Categorizar, sistematizar, correlacionar, criticar, debater, diferenciar, discutir, distinguir, relacionar. **Categoria de síntese/criação – ação verbal criar/sintetizar:** Comunicar, construir, criar, documentar, especificar, escrever, esquematizar, formular, organizar, planejar, produzir, propor. Categoria de avaliação – ação verbal avaliar: avaliar, argumentar, contratar, escolher, julgar, selecionar, valorizar, validar.

Sobre o parecer de avaliação das perguntas, os/as estudantes são orientados a avaliar as perguntas de seus/as colegas, a partir dos seguintes critérios: 1 – Grau de dificuldade para entender a pergunta – formulação, clareza e objetividade; 2 – Grau de dificuldade para encontrar a resposta; 3 – Grau de curiosidade que a pergunta desperta sobre o assunto do texto que ela remete; e, por fim, 4 – Emissão de um comentário geral sobre as perguntas elaboradas.

## ANEXO 4 – CONJUNTO DE PERGUNTAS RELATIVAS AOS CONTEÚDOS DOS TEMAS/AULAS DA UNIDADE DE ENSINO

As perguntas elaboradas a partir das ações verbais e/ou objetivos educacionais (conhecer, entender, aplicar, analisar, criar/sintetizar, avaliar) da Taxonomia de Bloom (original e revisada), referentes aos conteúdos/temas das aulas são apresentadas, a seguir. Nesta apresentação, têm-se os objetivos específicos para cada objetivo geral apontado acima, juntamente com a indicação dos parâmetros da estratégia de elaboração de perguntas, cujas respostas estão contidas, margeando e/ou para além dos textos/conteúdos da história conceitual da astronomia, da cosmologia e da física desenvolvidos nesta tese.

**TEMA/AULA TEXTO I.** *Dos babilônios aos compromissos metodológicos e ontológicos da tradição de pesquisa grega antiga: da origem dos problemas empíricos aos modelos cosmológicos de Pitágoras de Samos e Filolau de Crotona.*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (conhecer: apontar, citar, definir, descrever, numerar, enunciar, especificar, estabelecer, exemplificar, expressar, identificar, localizar, relatar, etc.).

*Que conjunto de elementos relevantes pode ser enumerado no texto, para permitir colocar a origem da astronomia e da cosmologia científica na Grécia, e não na Babilônia? [Resposta contida no texto]; Que aspectos da vida prática dos babilônios podem ser citados como elementos que determinavam suas atividades astronômicas? [Resposta contida no texto]; Descreva os fatos celestes conhecidos pelos astrônomos babilônicos, que se tornaram a fonte dos problemas empíricos astronômicos e cosmológicos no contexto científico da tradição de pesquisa grega antiga. [Resposta contida no texto]; Enumere os feitos astronômicos babilônicos mais importantes, nos setecentos a oitocentos anos antes de Cristo. [Resposta contida no texto]; Que principal objetivo dos astrônomos babilônicos pode ser apontado no texto, como relativo à criação do conceito de zodíaco e da divisão da eclíptica em doze subdivisões de 30° graus? [Resposta contida no texto]; Especifique dois aspectos ligados aos procedimentos astronômicos babilônicos, que os distanciam da ideia de ciência que surgiu com os gregos. [Resposta contida no texto]; Enuncie o problema fundamental da astronomia babilônica, até o advento da astronomia matemática helenística grega. [Resposta contida no texto]; Cite os cinco fenômenos celestes conhecidos e registrados pelos*

*astrônomos babilônicos que estavam ligados ao ciclo sinódico de um planeta. [Resposta contida no texto];* *Expresse a principal preocupação dos astrônomos babilônicos em relação ao registro dos cinco fenômenos celestes ligados ao ciclo sinódico de um planeta. [Resposta contida no texto];* *Exemplifique os objetivos externos que motivaram os astrônomos babilônicos a calcular o tempo de retrogradação e a variação da posição dos planetas em longitude. [Resposta contida no texto];* *Que argumento relevante pode ser apontado no texto, como relacionado às evidências arqueológicas que diferenciam a ciência na Babilônia da ciência na Grécia Antiga? [Resposta contida no texto];* *Aponte o principal objetivo da ciência grega frente ao interesse pelos fenômenos celestes registrados pelos astrônomos babilônicos. [Resposta contida no texto];* *Relate sobre os atributos intelectuais que o filósofo Friedrich Nietzsche disse pertencer aos gregos antigos. [Resposta contida no texto];* *Cite a principal característica da cosmovisão pitagórica. Aponte os principais conceitos creditados a Pitágoras de Samos. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (entender: discutir, distinguir, diferenciar, exprimir, explicar, ilustrar, representar).

*Qual o significado do conceito de cosmos e o que ele representa para a cosmovisão pitagórica? [Resposta margeando o texto];* *Que tipo de aspectos, características, princípios da natureza da ciência estão associado à busca da cosmologia grega pelo ordenamento do universo? [Resposta contida no texto];* *Que descrição simbólica os números na cosmovisão pitagórica representam? [Resposta margeando o texto];* *Que distinção é possível tecer sobre a importância simbólica dos números no contexto babilônico e na cosmologia pitagórica? [Resposta margeando o texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (aplicar: esboçar, estruturar, organizar, ordenar, extrapolar, generalizar, interpretar, comparar, relacionar, selecionar, etc.).

*Que tipo de comparação é possível esboçar entre os objetivos astronômicos babilônicos e os objetivos astronômicos e cosmológicos gregos, marcados pela cosmovisão pitagórica? [Resposta contida no texto];* *Que discussão criticamente é possível esboçar, a partir do significado do conceito de Realidade presente na afirmação a seguir? “[...] para os pitagóricos a Realidade podia ser reduzida a séries e a razões numéricas, contanto que se conhecessem as regras do jogo, cuja descoberta foi a principal tarefa dos **Philosophos**, amigos da sabedoria”. [Resposta para além do texto];* *Esboce a estrutura do ordenamento do universo pitagórico, especificando o papel da localização da Terra nesse universo, bem como o tipo de movimento associado aos corpos celestes. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (analisar: criticar, correlacionar, debater, sistematizar etc.).

*Diante da ideia presente na literatura, isto é, de que Galileu foi o primeiro a introduzir a matemática no estudo da filosofia da natureza (hoje a Física), que tipo de discussão a afirmação, a seguir, promove: “Pitágoras e seus seguidores foram levados à suposição filosófica de que tudo na natureza é governado por relações numéricas”.* [Resposta para além do texto]; *Que aspecto(s), característica(s), princípio(s) da natureza da ciência, está (ão) associado(s) ao elemento científico intuição, na cosmovisão pitagórica, e exemplifique sua(s) importância(s) para o desenvolvimento da física?* [Resposta para além do texto].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (criar/sintetizar: comunicar, construir, documentar, escrever, esquematizar, formular, produzir, propor, etc.).

*Qual é o significado da harmonia no cosmos pitagórico e o qual a sua relação com o ordenamento do universo?* [Resposta contida no texto]; *Sintetize os principais aspectos filosóficos e conceituais da visão cosmológica pitagórica?* [Resposta contida no texto]; *Que explicação conceitual está contida no modelo cosmológico pitagórico para o ordenamento dos corpos celestes e suas distâncias orbitais, a partir da Terra?* [Resposta contida no texto]; *Que papel a intuição científica desempenha no desenvolvimento da ciência, segundo Poincaré, Heisenberg, Einstein e Nietzsche?* [Resposta contida no texto]; *Que conceito pitagórico tornou-se a base de todos os modelos astronômicos e cosmológicos, para explicar a estrutura do universo e os principais problemas empíricos, até o século XVI de nossa era?* [Resposta contida no texto].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (avaliar: argumentar, contrastar, julgar, valorizar, validar etc.).

*Sabendo o conceito de movimento circular uniforme, associado à explicação do movimento dos planetas, foi extinto pela formulação empírica (aproximada) das leis de Kepler para o movimento planetário, que aspecto, característica e princípio sobre o conhecimento científico são possíveis de distinguir, a partir disso?* [Resposta para além do texto]; *Que tipo de valor intrínseco para o desenvolvimento da ciência pode ser aferido e julgado, diante dos fundamentos filosóficos e conceituais da cosmovisão e do modelo cosmológico pitagórico?* [Resposta para além do texto]; *Que tipo de julgamento (s) simbólico é (são) possível (eis) esboçar, a partir da cosmovisão pitagórica e da afirmação que diz que uma das principais características do pensamento científico é o seu movimento*

por conceitos? **[Resposta para além do texto]**; *Que imagem da ciência, a afirmação, a seguir, te transmite? “[...] aprende-se com os pitagóricos que os caminhos trilhados pelos homens e mulheres da ciência nem sempre são claros e objetivos. O espírito criador é frequentemente impulsionado por concepções que colocam a ciência bastante longe de uma busca puramente metódica ao desconhecido”.* **[Resposta para além do texto]**; *Se os problemas constituem as perguntas da ciência, as teorias são suas respostas. Com base nessa afirmação, argumente sobre a passagem do texto, a seguir: “[...] Na cosmovisão pitagórica, a ideia de ordenamento do universo foi assimilada pela teoria cosmológica da harmonia das esferas, desenvolvida posteriormente pelos modelos cosmológicos de Filolau de Crotona (480-400 a. C.), Heráclides de Ponto (375-310 a. C.) e Aristarco de Samos (310-230 a. C.), tendo as distâncias entre as órbitas dos planetas como o principal problema empírico a ser solucionado”.* **[Resposta para além do texto]**; *Atualmente, o movimento terraplanista tem rebatido a ideia da esfericidade da Terra, considerando ideia de uma Terra plana também permeou o pensamento de filósofos gregos antigos, tais como Thales de Mileto (640 - 546 a. C.), que argumentos astronômicos estão presentes na cosmovisão pitagórica que rebatem, desde a Grécia Antiga, a defesa do terra planismo?* **[Resposta para além do texto]**; *Que importância os conceitos de simetria e beleza representam no ordenamento do universo pitagórico?* **[Resposta para além do texto]**; *Que aspectos da visão cosmológica pitagórica são atribuídos erroneamente à visão cosmológica aristotélica e/ou ptolomaica, especialmente, nos livros didáticos da física?* **[Resposta para além do texto]**; *Que importância o conceito de simetria representa para física nos dias atuais?* **[Resposta para além do texto]**.

**TEMA/AULA TEXTO II.** *A cosmologia de Platão e a sistematização dos principais problemas empíricos astronômicos da tradição de pesquisa grega antiga.*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (conhecer: apontar, citar, definir, descrever, numerar, enunciar, especificar, estabelecer, exemplificar, expressar, identificar, localizar, relatar, etc.).

*Quais foram os três importantes conhecimentos sobre os fenômenos celestes transmitidos do modelo cosmológico de Filolau para o pensamento cosmológico platônico, que podem ser citados, descritos, identificados, enumerados, especificados e/ou exemplificados no texto?* **[Resposta contida no texto]**; *Que prêmio oferecido por Platão*

*pode ser apontado no texto, para o astrônomo ou matemático que encontrasse a solução do problema empírico mais importante da astronomia? [Resposta contida no texto]; A partir do texto, quais compromissos ontológicos e metodológicos da cosmovisão pitagórica assumidos por Platão, podem ser citados, descritos, identificados, enumerados, especificados e/ou exemplificados? [Resposta contida no texto]; Quais compromissos metodológicos e ontológicos da cosmovisão pitagórica assumidos por Platão podem ser citados, descritos, identificados, enumerados, especificados e/ou exemplificados no texto? [Resposta contida no texto]; Que elementos metodológicos e ontológicos são estabelecidos no texto, para sustentar a função da corrente de pensamento epistemológica instrumentalista nas investigações astronômicas, a partir de Platão? [Resposta contida no texto]; Enuncie a passagem do texto referente à prescrição dos problemas empíricos, isto é, a formulação de perguntas para as investigações astronômicas. [Resposta contida no texto]; Quais correntes de pensamento epistemológicas, além da instrumentalista e realista, são citadas, especificadas, exemplificadas, apontadas no texto? [Resposta contida no texto]; Identifique as prerrogativas de naturezas científicas, conceituais, filosóficas, metafísicas e religiosas citadas no texto. [Resposta contida no texto]; Descreva a importância para o desenvolvimento da astronomia, dos três principais pontos do modelo cosmológico de Platão. [Resposta contida no texto]; Qual a principal pergunta de natureza empírica fomentou as investigações astronômicas de Platão a Copérnico? [Resposta contida no texto]; Que definição pode ser dada para a expressão “salvar as aparências”, no contexto da tradição de pesquisa grega antiga? [Resposta contida no texto]; Especifique o conceito de movimento retrógrado de um planeta. [Resposta contida no texto]; Que tipo de opinião pode ser explicitado, a partir de Ptolomeu, acerca do objetivo dos astrônomos e matemáticos instrumentalistas? [Resposta contida no texto]; Que expressão científica a corrente de pensamento epistemológica instrumentalista teve para o desenvolvimento da astronomia? [Resposta margeando o texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (entender: discutir, distinguir, diferenciar, exprimir, explicar, ilustrar, representar).

*Que interpretação é possível exprimir, a partir da frase: “Platão adotou os princípios filosóficos e metafísicos pitagóricos da ordenação do cosmos, sem se preocupar com a realidade objetiva dos dados observacionais”. [Resposta margeando o texto]; Que aspectos no texto podem ser ilustrados para denotar o caráter epistemológico plural da produção de conhecimento científico? [Resposta contida no texto]; Que elementos*

conceituais presentes no texto diferenciam/distinguir os dois tipos de movimentos (do mesmo e do outro), criados por Platão? [**Resposta contida no texto**]; Que aspectos astronômicos diferenciam os movimentos do Sol e da Lua, dos cinco planetas? [**Resposta contida no texto**]; Que discussão é possível fazer, acerca da ideia de que alguns astrônomos gregos não se preocupavam com a realidade física dos artificios matemáticos (epiciclo, equante, excêntrico) de suas teorias planetárias astronômicas? [**Resposta margeando o texto**]; Descreva os problemas empíricos ligados ao: (a) fenômeno celeste do movimento e do diâmetro da Lua, (b) ao movimento do Sol, e (c) ao movimento dos cinco planetas. [**Resposta contida no texto**]; Explique o motivo das fases da Lua ter se tornado um importante problema empírico para o desenvolvimento da astronomia. [**Resposta contida no texto**]; Localize no texto, o aspecto do modelo cosmológico de Platão que o aproxima do modelo de Pitágoras e, ao mesmo tempo, o distancia do modelo de Filolau. [**Resposta contida no texto**]; Que tipo de valor metodológico o conceito de movimento circular uniforme representou para o desenvolvimento da astronomia, do período histórico de Platão a Kepler? [**Resposta margeando o texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (aplicar: esboçar, estruturar, organizar, ordenar, extrapolar, generalizar, interpretar, comparar, relacionar, selecionar, etc.).

Que elementos conceituais, filosóficos, metafísicos e religiosos esboçam/estruturam/organizam e/ou ordenam o modelo cosmológico de Platão? [**Resposta contida no texto**]; Que tipo de interpretação acerca da natureza da ciência é possível fornecer, a partir do trecho do texto: “No contexto investigativo dos séc. XVI e XVII, marcado por muitas mudanças sociais, científicas, filosóficas, culturais, políticas, econômicas e religiosas, as ideias científicas foram afetadas por seu meio social e histórico surgindo novos compromissos ontológicos e metodológicos”. [**Resposta margeando o texto**]; Que tipo de extrapolação/generalização é possível fazer sobre a natureza da ciência, mediante a frase: “É com problemas, portanto, que nos dedicaremos à astronomia, tal como à geometria; e dispensaremos o que há no Céu, se quisermos realmente tratar da astronomia [...]”? [**Resposta para além do texto**]; Que tipo de comparação/relação pode ser feita acerca do contexto do significado da frase, “Ontologicamente, na visão pitagórica, os números são as entidades que permitem acessar a Realidade objetiva subjacente à natureza do próprio universo” e a importância da matemática para a ciência, nos dias atuais? [**Resposta para além do texto**]; Que tipo de comparação/relação é possível estabelecer entre os modelos cosmológicos de Platão, Pitágoras e Filolau? [**Resposta contida no texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (analisar: criticar, correlacionar, debater, sistematizar etc.).

*Que tipo de análise crítica sobre a natureza da ciência é possível fazer, a partir da existência das duas correntes de pensamento epistemológicas (instrumentalista e realista) no contexto da tradição de pesquisa grega? [Resposta para além do texto]; Que implicações para o desenvolvimento da astronomia e da cosmologia, podem ser sistematizadas, a partir do fragmento do texto, “[...] esse filósofo e matemático grego [Platão] foi atraído pela tentativa de explicar os fenômenos planetários, em termos de um movimento regular para cada corpo. Para tanto, Platão adotou os princípios filosóficos e metafísicos pitagóricos da ordenação do cosmos, sem se preocupar com a realidade objetiva dos dados observacionais”. [Resposta margeando o texto]; Considerando que a investigação astronômica instrumentalista alcançou seu apogeu na obra *Almagesto* de Ptolomeu, mas, posteriormente, deu lugar a investigação astronômica realista, a partir de Copérnico, e mais precisamente, a partir de Johannes Kepler, que tipo de implicação pode ser correlacionado com a natureza do conhecimento científico? [Resposta para além do texto]; Debata sobre a importância dos principais problemas empíricos astronômicos sistematizados no contexto da cosmologia de Platão. [Resposta margeando o texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (criar/sintetizar: comunicar, construir, documentar, escrever, esquematizar, formular, produzir, propor, etc.).

*Sintetize as principais ideias do modelo cosmológico de Platão. [Resposta contida no texto]; Sintetize os principais compromissos ontológicos e metodológicos no contexto da cosmologia de Platão. [Resposta contida no texto]; Construa contrapontos entre a corrente de pensamento epistemológica instrumentalista e a corrente realista. [Resposta contida no texto]; Esquematize conceitualmente o modelo cosmológico de Platão. [Resposta contida no texto]; Comunique a mensagem para os astrônomos e matemáticos gregos, transmitida por Platão, no trecho do texto: “[...] Sócrates - É com problemas, portanto, que nos dedicaremos à astronomia, tal como à geometria; e dispensaremos o que há no Céu, se quisermos realmente tratar da astronomia [...]. Glauco - Realmente é um trabalho complicado, em relação ao que têm agora, esse que tu prescreves aos astrônomos. Sócrates - Penso que faremos prescrições para as outras ciências no mesmo estilo, se de alguma coisa servirmos como legisladores”. [Resposta margeando o texto]; Escreva, formule, produza e/ou proponha uma frase ou oração, cujo significado seja o mesmo contido na expressão, “salvar as aparências dos fenômenos celestes” [Resposta margeando o texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (avaliar: argumentar, contrastar, julgar, valorizar, validar etc.).

*Argunte sobre papel da geometria na ciência, ao longo dos tempos antigos, modernos e contemporâneos, considerando o valor que Platão dava a geometria, ao ter escrito na porta de sua Academia, a frase: “Que ninguém ultrapasse a minha porta sem conhecer a geometria”. [Resposta para além do texto]; Que tipo de julgamento é possível fazer sobre a importância do movimento circular uniforme para o desenvolvimento da astronomia matemática grega? [Resposta margeando o texto]; Que valor científico é possível atribuir aos compromissos ontológicos e metodológicos, para o desenvolvimento da astronomia, da cosmologia e da física? [Resposta margeando o texto]; Julgue a validade da frase, a seguir, para o desenvolvimento da astronomia, da cosmologia e da física: “os corpos celestes, sendo de natureza divina, obedeciam a leis diferentes das encontradas na Terra”. [Resposta para além do texto].*

**TEMA/AULA TEXTO III.** *A origem dos problemas conceituais internos implicados na teoria planetária das esferas concêntricas de Eudoxo de Cnido.*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (conhecer: apontar, citar, definir, descrever, numerar, enunciar, especificar, estabelecer, exemplificar, expressar, identificar, localizar, relatar, etc.).

*Que conhecimentos científicos podem ser apontados, citados e/ou numerados no texto, cuja autoria é creditada a Eudoxo de Cnido? [Resposta contida no texto]; Que importância científica a teoria das proporções de Eudoxo de Cnido expressa, em relação à crise da geometria grega? [Resposta margeando o texto]; Que tipo de relação é possível estabelecer entre a descoberta da natureza esférica da Terra e a teoria planetária de Eudoxo de Cnido? [Resposta contida no texto]; Em que parte inicial do texto é possível localizar a importância científica da teoria de Eudoxo para o desenvolvimento da tradição de pesquisa grega? [Resposta contida no texto]; Que exemplos nos escritos de Aristóteles e Simplicio podem ser especificados como explicações da teoria de Eudoxo para o movimento dos planetas? [Resposta contida no texto]; Em que parte do texto é possível localizar os problemas conceituais internos gerados pela teoria das esferas concêntricas de Eudoxo? [Resposta contida no texto]; Como são definidos os cinco critérios epistêmicos instituídos pela epistemologia para avaliar as teorias científicas? [Resposta contida no texto]; Que*

*aspectos, características e/ou princípios da natureza da ciência podem ser exemplificados a partir do texto?* [**Resposta contida no texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (entender: discutir, distinguir, diferenciar, exprimir, explicar, ilustrar, representar).

*Que explicações são dadas pela teoria de Eudoxo para as soluções do movimento da Lua, do Sol e dos cinco planetas?* [**Resposta contida no texto**]; *Que discussão é possível fazer mediante a seguinte passagem no texto: “a teoria das esferas concêntricas de Eudoxo não explicava, nem previa nenhum tipo de resultado independente. Por isso ela não podia ser testada, uma vez que os parâmetros intrínsecos do modelo podiam ser modificados, sempre que as observações não se encaixavam nas previsões. Portanto, cientificamente, essa teoria pode ser descrita como uma hipótese ad hoc, uma vez que explica os fenômenos celestes, apenas à medida que são incorporados ao seu esquema conceitual”.* [**Resposta margeando o texto**]; *Exprima o significado do critério epistêmico de previsão de uma teoria, mediante a seguinte passagem do texto: “quando comparada a capacidade de previsão das posições planetárias dessa teoria [de Eudoxo], com o sistema astronômico aritmético dos babilônios, observa-se que esse último, apesar de não poder ser considerado aqui como uma teoria, era bem mais consistente e seguro”.* [**Resposta margeando o texto**]; *Que diferenças epistêmicas estão presentes nas funções de uma teoria científica (explicativa, descritiva, preditiva)?* [**Resposta contida no texto**]; *Que ressalva deve ser distinguida no texto, antes de utilizar os critérios epistêmicos para avaliar as credenciais científicas da teoria planetária de Eudoxo?* [**Resposta contida no texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (aplicar: esboçar, estruturar, organizar, ordenar, extrapolar, generalizar, interpretar, comparar, relacionar, selecionar, etc.).

*Esboce/estruture/organize e/ou ordene os alicerces conceituais da teoria planetária de Eudoxo.* [**Resposta contida no texto**]; *Que tipo de interpretação pode ser feita a partir da passagem do texto: “a convicção humana profundamente enraizada de que a simplicidade e a beleza são critérios de verdade manteve viva a esperança de que as esferas homocêntricas, embora em algumas modificações, possam representar corretamente o plano do criador”.* [**Resposta margeando o texto**]; *Que comparações podem ser estabelecidas entre as explicações dadas por Aristóteles e Simplicio, com as explicações da teoria de Eudoxo?* [**Resposta contida no texto**]; *Que principais contribuições de Eudoxo, para a ciência, podem ser selecionadas no texto, além da sua teoria planetária?* [**Resposta contida no texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (analisar: criticar, correlacionar, debater, sistematizar etc.).

*Quais problemas conceituais internos enfrentados pela teoria planetária de Eudoxo podem ser sistematizados no texto? [Resposta contida no texto]; Que tipo de crítica pode ser feita em relação à descoberta do ano tropical de 365 e 6 horas por Eudoxo, e a falta de consistência de sua teoria com esta observação? [Resposta para além do texto]; Que tipo de debate científico a importância das observações telescópicas de Galileu, suscita, frente ao problema do brilho aparente dos planetas internos e externos? [Resposta para além do texto]; Que correlações podem ser feitas entre as explicações da teoria de Eudoxo nos escritos de Aristóteles, de Simplicio e nas reconstruções da teoria, nas versões apresentadas no texto? [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (criar/sintetizar: comunicar, construir, documentar, escrever, esquematizar, formular, produzir, propor, etc.).

*Sintetize nos escritos de Aristóteles e de Simplicio acerca da teoria de Eudoxo, uma resposta para as perguntas: Quais são os movimentos circulares uniformes ordenados que possam ser tomados como hipóteses, para explicar os movimentos aparentes dos planetas? Como se consegue reduzir o complexo e variável movimento planetário a uma simples ordem? [Resposta contida no texto] Esquematize os problemas empíricos astronômicos e as explicações dadas pela teoria planetária de Eudoxo, nas reconstruções apresentada no texto. [Resposta contida no texto]; Que mensagem pode ser comunicada pela teoria de Eudoxo, levando em consideração os critérios epistêmicos e a importância dessa teoria para o desenvolvimento da tradição de pesquisa grega? [Resposta margeando o texto]; Escreva sobre o significado de uma hipótese ad hoc e sua implicação sobre algum aspecto, característica e/ou princípio da natureza da ciência encontrado no texto. [Resposta contida no texto]*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (avaliar: argumentar, contrastar, julgar, valorizar, validar etc.).

*Que argumentos sobre a natureza da ciência são possíveis construir, a partir da passagem do texto: “As contribuições de Eudoxo revestem-se de máxima importância para o desenvolvimento científico, pois marcam o deslocamento dos estudos astronômicos pautados em especulações filosóficas, para a construção da primeira teoria astronômica planetária, elaborada para resolver os problemas empíricos da tradição de pesquisa grega, na perspectiva instrumentalista matemática” [Resposta margeando o texto]; Que julgamento*

*científico pode ser realizado sobre a validade dos cinco critérios epistêmicos dentro e fora do contexto da teoria planetária de Eudoxo? [Resposta para além do texto]; Que valor científico pode ser atribuído à teoria de Eudoxo e as suas explicações dos problemas empíricos astronômicos? [Resposta para além do texto]; Que tipo de contraste pode ser feito entre os cinco critérios epistêmicos e/ou os valores cognitivos dos valores morais e sociais? [Resposta margeando o texto].*

**TEMA/AULA TEXTO IV.** *A origem dos problemas conceituais externos implicados na visão de mundo e na malha conceitual aristotélica.*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (conhecer: apontar, citar, definir, descrever, numerar, enunciar, especificar, estabelecer, exemplificar, expressar, identificar, localizar, relatar, etc.).

*Que características diferentes e semelhantes podem ser apontadas/apresentadas no texto, acerca da cosmologia de Aristóteles, Platão, Filolau e Pitágoras? [Resposta contida no texto]; Que argumentos podem ser apresentados no texto, como exemplos da defesa da mobilidade da Terra? [Resposta contida no texto]; Que principais aspectos e implicações acerca dos mundos supralunar e sublunar podem ser descritos na cosmologia de Aristóteles? [Resposta contida no texto]; Como pode ser descrita a estrutura do modelo cosmológico de Aristóteles? [Resposta contida no texto]; Que principais conceitos, fundamentos e pressupostos definem a visão de mundo de Aristóteles? [Resposta contida no texto]; Enumere os conceitos que caracterizam a visão de mundo e a malha conceitual de Aristóteles. [Resposta contida no texto]; Enuncie as ideias de mundo sublunar e supralunar [Resposta contida no texto]; Expresse uma das principais preocupações de Aristóteles associada ao espaço da geometria. [Resposta contida no texto]; Localize e enuncie, no texto, os seis pressupostos filosóficos e metafísicos adotados por Aristóteles. [Resposta contida no texto]; Identifique a diferença entre o ordenamento dos planetas no modelo cosmológico de Aristóteles e no modelo de Filolau. [Resposta contida no texto]; Cite no texto, os conceitos e fundamentos da visão de mundo e da malha conceitual de Aristóteles. [Resposta contida no texto]; De que maneira a principal implicação acerca das preocupações aristotélicas com a realidade empíricas das ideias platônicas, pode ser exemplificada no texto? [Resposta margeando o texto]; Como se define o conceito de universo finito e pleno de Aristóteles? [Resposta contida no texto]; Como pode ser*

*exemplificada a assimilação de Aristóteles dos conceitos metafísicos de simplicidade, harmonia e beleza? [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (entender: discutir, distinguir, diferenciar, exprimir, explicar, ilustrar, representar).

*Que marco epistemológico, no contexto de investigação da tradição de pesquisa grega, pode ser representado a partir da passagem do texto: “Aristóteles procurava uma ideia na sua realização concreta nos fenômenos da natureza, e todos os resultados da experiência e da observação, portanto, chamavam sua atenção”. [Resposta margeando o texto]; Que diferenças epistemológicas essenciais podem ser ilustradas frente às preocupações de Aristóteles e as de Platão? [Resposta contida no texto]; Exprima um dos significados da ideia de Aristóteles, a seguir, para o desenvolvimento da astronomia, da cosmologia e da física: “As ideias não constituem mais um mundo pairando no vazio, não se encontram acima das coisas nelas, são as formas essenciais das coisas. Elas representam o núcleo essencial e racional das coisas, que as propriedades empíricas envolvem como uma membrana”. [Resposta para além do texto]; Que explicação pode ser dada acerca das implicações lógicas acerca a aplicabilidade do primeiro motor de Aristóteles, em sua cosmologia. [Resposta contida no texto]; Que discussão crítica pode ser feita acerca do significado metafísico das palavras Amor e Ódio, para os gregos e de sua incorporação teológica? [Resposta margeando o texto]; Discuta sobre a principal implicação do conceito de universo finito e pleno de Aristóteles. [Resposta contida no texto]; Explique o significado ontológico do conceito de vazio, matéria e espaço, na cosmologia Aristotélica. [Resposta margeando o texto]; Explique a função da lei do movimento natural na cosmologia de Aristóteles e no movimento dos corpos celestes. [Resposta contida no texto]; Exprima o significado das duas importantes implicações associadas aos fundamentos da lei do movimento natural na visão de mundo de Aristóteles. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (aplicar: esboçar, estruturar, organizar, ordenar, extrapolar, generalizar, interpretar, comparar, relacionar, selecionar, etc.).

*De que maneira pode-se esboce/estruture e/ ou ordene o modelo cosmológico de Aristóteles? [Resposta contida no texto]; De que maneira é possível relacionar as explicações de Aristóteles para os problemas empíricos, com as explicações de Eudoxo. [Resposta contida no texto]; Que tipo de interpretações encontram-se associadas ao conceito de primeiro motor na cosmologia de Aristóteles? [Resposta contida no texto]; Que tipo de comparação é possível estabelecer entre as prerrogativas de Aristóteles, Platão e os*

*Pitagóricos, sobre os problemas do conhecimento (ideias). [Resposta contida no texto]; Que tipo de extrapolação pode ser feita mediante a implicação máxima do problema conceitual externo do componente visão de mundo, para o desenvolvimento da astronomia, da cosmologia e da física? [Resposta para além do texto]; Que tipo de relação pode ser estabelecido entre o conceito de universo finito e pleno com o problema conceitual externo da visão de mundo? [Resposta contida no texto]; Interprete o significado das implicações astronômicas e cosmológicas presentes na passagem do texto: “poder do céu aristotélico” tornou-se um elemento fundamental da crença na existência física das esferas celestes. Acreditava-se que, pelo seu movimento produzir, por fricção, as mudanças terrestres, ele dava condição para os astrólogos sentirem-se capazes de “predizer as futuras configurações do céu, capacitando o homem para adivinhar o futuro dos homens e das nações”. [Resposta contida no texto]; Relacione, no texto, a principal implicação da crença e defesa aristotélica da imobilidade da Terra no imaginário cultural renascentista. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (analisar: criticar, correlacionar, debater, sistematizar etc.).

*Que tipo de crítica de cunho lógico é possível lançar contra o conceito de primeiro motor aristotélico? [Resposta contida no texto]; Que correlação religiosa e cultural estar implicada com o conceito de primeiro motor aristotélico? [Resposta contida no texto]; Que principais elementos do texto podem ser sistematizados, a partir da relação direta entre o problema conceitual externo do componente visão de mundo, com os conceitos, fundamentos e implicações culturais, filosóficas, metafísicas e religiosas? [Resposta contida no texto]; Que análise crítica pode ser feita, ao se julgar a tentativa dos filósofos gregos em suplantarem o materialismo e a implicação teológica e metafísica da visão de mundo aristotélica, ligada à unicidade do universo? [Resposta margeando o texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (criar/sintetizar: comunicar, construir, documentar, escrever, esquematizar, formular, produzir, propor, etc.).

*Que síntese pode ser feita, a partir das explicações dadas por Aristóteles para os problemas empíricos mais importantes da astronomia? [Resposta contida no texto]; Comunique, porque as explicações de Aristóteles para os problemas empíricos não conseguiram sanar os problemas conceituais internos associados aos critérios epistêmicos? [Resposta contida no texto]; Que narrativa pode ser construída acerca das principais implicações da visão de mundo e da malha conceitual aristotélica, no contexto da tradição de pesquisa grega? [Resposta margeando o texto]; Esquematize, em um quadro, como cada*

*conceito e fundamento aristotélico, integrado em sua visão de mundo, implicou na origem do problema conceitual externo mais importante para o desenvolvimento da astronomia, da cosmologia e da física. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (avaliar: argumentar, contrastar, julgar, valorizar, validar etc.).

*“Aristóteles acreditava que todos os seres humanos têm, por natureza, o desejo de conhecer. O prazer que as percepções de nossos sentidos nos causam é uma prova dessa verdade. Ele afirmava que: Nós gostamos deles por conta própria, independentemente da sua utilidade, especialmente os da visão”. A partir desse fragmento de texto, que argumentos podem ser aplicados quanto à importância epistemológica da observação na ciência? [Resposta para além do texto]; Que tipo de julgamento é oportuno fazer acerca da validade científica da lógica de Aristóteles, amparada na percepção sensível e senso comum? [Resposta margeando o texto]; Aristóteles “deslocou o mundo platônico das ideias para a realidade empírica”. Em suas obras mais importantes (Física, Metafísica, De Caelo e Meteorologia), Aristóteles defendeu que: “As ideias não constituem mais um mundo pairando no vazio, não se encontram acima das coisas nelas, são as formas essenciais das coisas. Elas representam o núcleo essencial e racional das coisas, que as propriedades empíricas envolvem como uma membrana”. Mediante essa passagem de texto, que tipo de argumentos pode ser utilizado para contrastar as preocupações epistemológicas de Aristóteles e as de Platão? [Resposta margeando o texto]; Que argumentos podem ser lançados acerca das implicações filosóficas da realidade do vazio, da pluralidade dos mundos defendidas pelos atomistas, e o seu combate, especialmente, pelos seguidores de Aristóteles e Platão. [Resposta margeando o texto]; De que maneira é possível avaliar a integração do problema conceitual externo do componente visão de mundo à cosmologia de Aristóteles e sua malha conceitual? [Resposta contida no texto].*

**TEMA/AULA TEXTO V.** *As cosmologias de Heráclides de Ponto e Aristarco de Samos e a medida da esfericidade da Terra por Eratóstenes de Cirene.*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (conhecer: apontar, citar, definir, descrever, numerar, enunciar, especificar, estabelecer, exemplificar, expressar, identificar, localizar, relatar, etc.).

*Que importante ideia sobre a Terra pode ser apontada, como aporte astronômico e cosmológico adotado por Heráclides de Ponto, como premissa inicial de sua visão cosmológica? [Resposta contida no texto]; Cite quais foram os principais objetivos dos trabalhos cosmológicos de Heráclides de Ponto e de Aristarco de Samos. [Resposta contida no texto]; Descreva as principais características dos movimentos dos planetas Mercúrio e Vênus. [Resposta contida no texto]; Localize no texto a principal característica do problema empírico do brilho aparente dos planetas Mercúrio e Vênus. [Resposta contida no texto]; Que tipos de movimentos Heráclides e Aristarco atribuíram à Terra? [Resposta contida no texto]; Descreva o método de Aristarco de Samos. [Resposta contida no texto]; Enuncie as hipóteses astronômicas de Aristarco de Samos. [Resposta contida no texto]; Que dificuldades técnicas, empíricas e conceituais foram enfrentadas por Aristarco de Samos durante sua busca pela solução do problema empírico das distâncias entre o Sol a Terra e a Lua? [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (entender: discutir, distinguir, diferenciar, exprimir, explicar, ilustrar, representar).

*Considerando que Heráclides de Ponto adotou a visão de mundo geocêntrica predominante no pensamento astronômico e cosmológico grego, discuta sobre as principais diferenças entre seu modelo cosmológico e os modelos de Pitágoras, Filolau, Platão e Aristóteles. [Resposta margeando o texto]; Explique porque o modelo de epiciclo idealizado por Heráclides de Ponto foi tão importante para o desenvolvimento das teorias planetárias posteriores e conseqüentemente para o desenvolvimento da astronomia matemática grega. [Resposta margeando o texto]; Explique como Heráclides apresentou sua solução ao problema empírico do brilho aparente de Mercúrio e Vênus. [Resposta contida no texto]; Discuta sobre o principal aspecto da natureza do conhecimento, que o trabalho de Aristarco de Samos representa. [Resposta margeando o texto]; Explique como Aristarco utilizou suas hipóteses para calcular as distâncias relativas entre Sol, Terra e Lua. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (aplicar: esboçar, estruturar, organizar, ordenar, extrapolar, generalizar, interpretar, comparar, relacionar, selecionar, etc.).

*Esboce a ordenação do modelo cosmológico de Heráclides de Ponto, especificando a posição da Terra, do Sol e dos planetas. [Resposta contida no texto]; Extrapole a ideia de liberdade de pensamento científico de Aristarco para o contexto atual, considerando as*

*diversas ideias contemporâneas sobre o universo. [Resposta margeando o texto]; Que relação existe entre as ideias de Aristarco e Copérnico? [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (analisar: criticar, correlacionar, debater, sistematizar etc.).

*Correlacione a passagem no texto, a seguir, com o conflito entre a visão de mundo de Aristarco e visão de mundo predominante na Grécia de seu tempo, “não há ideia, por mais antiga e absurda, que não seja susceptível de melhorar o nosso conhecimento”. [Resposta para além do texto]; Considerando que Aristarco foi acusado de impiedade, que tipo de crítica pode ser feita a afirmação de Plutarco, a seguir: “[...] os Gregos deviam fazer isso contra Aristarco de Samos, sob o pretexto de que ele movera o coração do mundo ao tentar salvar os fenômenos, supondo que o céu permanece imóvel e que a Terra se move ao longo de uma órbita oblíqua, ao mesmo tempo em que gira em redor do seu eixo”. [Resposta para além do texto]; Que correlações podem ser feitas entre a mudança significativa no tratamento matemático dos problemas empíricos astronômicos, frente ao tratamento filosófico especulativo antes de Aristarco de Samos, a cidade e a Biblioteca de Alexandria? [Resposta para além do texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (criar/sintetizar: comunicar, construir, documentar, escrever, esquematizar, formular, produzir, propor, etc.).

*Esquematize as principais ideias da cosmologia de Heráclides de Ponto e de Aristarco de Samos. [Resposta contida no texto]; Esquematize as principais objeções de ordem físicas contra as ideias de Aristarco de Samos. [Resposta contida no texto]; Produza uma síntese das principais explicações de Aristarco de Samos ao problema empírico das distâncias dos planetas. [Resposta contida no texto]; Produza uma síntese sobre os procedimentos de Eratóstenes para calcular a esfericidade da Terra. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (avaliar: argumentar, contrastar, julgar, valorizar, validar etc.).

*Argunte sobre a seguinte passagem no texto: “a ciência avança quando utilizamos hipóteses que contradizem teorias solidamente confirmadas”. [Resposta para além do texto]; Avalie as principais implicações das contribuições de Aristarco para o desenvolvimento da tradição de pesquisa grega via astronomia matemática. [Resposta margeando o texto]; Frente às medidas de Aristarco, julgue criticamente a função do erro na ciência? [Resposta margeando o texto]; Que tipo de contraste pode ser estabelecido*

entre as ideias observadas nos modelos cosmológicos de Heráclides e de Aristarco, frente à visão de mundo predominante? [**Resposta margeando o texto**]; Sabendo que Aristarco de Samos desenvolveu sua cosmologia a partir de sua ideia heliocêntrica, argumente sobre a importância desta para o desenvolvimento da astronomia, da cosmologia e da física, frente à visão geocêntrica predominante. [**Resposta para além do texto**]; Considerando o adendo feito sobre Hipátia de Alexandria, argumente sobre o valor do reconhecimento ao trabalho científico das mulheres da ciência. [**Resposta para além do texto**]; Julgue criticamente os argumentos de Aristóteles para o formato da Terra e a medida de sua esfericidade por Eratóstenes de Cirene, frente ao movimento atual terraplanista? [**Resposta margeando o texto**].

**TEMA/AULA TEXTO VI.** *A teoria planetária de Apolônio de Perga e as contribuições astronômicas de Hiparco de Nicéia.*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (conhecer: apontar, citar, definir, descrever, numerar, enunciar, especificar, estabelecer, exemplificar, expressar, identificar, localizar, relatar, etc.).

*Aponte no texto o principal problema empírico enfrentado por Apolônio de Perga. [**Resposta contida no texto**]; Descreva a teoria epiciclo-deferente de Apolônio. [**Resposta contida no texto**]; Especifique o tipo de problema conceitual interno enfrentado pela teoria de Apolônio. [**Resposta contida no texto**]; Localize no texto a explicação de Apolônio para o problema empírico de retrogradação dos planetas. [**Resposta contida no texto**]; Especifique que tipo de aperfeiçoamento Apolônio fez no modelo de epiciclo-deferente de Heráclides de Ponto. [**Resposta contida no texto**]; Cite as principais contribuições astronômicas de Hiparco de Nicéia. [**Resposta contida no texto**]; Defina o fenômeno de precessão dos equinócios. [**Resposta contida no texto**]; Descreva a observação de Hiparco sobre o fenômeno de precessão dos equinócios. [**Resposta contida no texto**]; Especifique o trabalho de Hiparco sobre o ano meta. [**Resposta contida no texto**].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (entender: discutir, distinguir, diferenciar, exprimir, explicar, ilustrar, representar).

*Discuta sobre a importância do aperfeiçoamento realizado por Ptolomeu à teoria epiciclo-deferente de Apolônio. [**Resposta margeando o texto**]; Explique como Apolônio atacou o problema empírico do movimento retrógrado dos planetas externos. [**Resposta***

**contida no texto**]; *Discuta sobre o problema nos dados astronômicos babilônios.* [**Resposta contida no texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (aplicar: esboçar, estruturar, organizar, ordenar, extrapolar, generalizar, interpretar, comparar, relacionar, selecionar, etc.).

*Relacione a importância da teoria epiciclo-deferente de Apolônio com o desenvolvimento da tradição de pesquisa grega via astronomia matemática.* [**Resposta margeando o texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (analisar: criticar, correlacionar, debater, sistematizar etc.).

*Sistematize as explicações de Apolônio para o movimento de retrogradação dos planetas externos, o movimento da Lua e o teorema dos pontos estacionários.* [**Resposta contida no texto**]; *Debata sobre o papel das observações de Hiparco, no desenvolvimento da astronomia grega.* [**Resposta margeando o texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (criar/sintetizar: comunicar, construir, documentar, escrever, esquematizar, formular, produzir, propor, etc.).

*Escreva uma síntese sobre a importância dos trabalhos de Apolônio e Hiparco para a mudança de abordagem no tratamento dos problemas empíricos astronômicos, iniciada por Aristarco de Samos.* [**Resposta contida no texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (avaliar: argumentar, contrastar, julgar, valorizar, validar etc.).

*Frente ao problema conceitual interno de inconsistência que pesava contra a teoria de Apolônio, argumente sobre a seguinte passagem do texto: “uma teoria deve conformar com a precisão à experiência: em seu domínio, às consequências dedutíveis da teoria devem estar em clara concordância com os resultados da experimentação e da observação existente”.* [**Resposta margeando o texto**].

**TEMA/AULA TEXTO VII.** *As teorias planetárias de Ptolomeu e suas explicações astronômicas dos problemas empíricos.*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (conhecer: apontar, citar, definir, descrever, numerar, enunciar, especificar, estabelecer, exemplificar, expressar, identificar, localizar, relatar, etc.).

*Aponte as principais características da obra Almagesto de Ptolomeu. [Resposta contida no texto]; Especifique a principal diferença entre o conteúdo do Almagesto de Ptolomeu os demais trabalhos astronômicos gregos. [Resposta contida no texto]; Enuncie no texto, as cinco características epistêmicas da ideia de simplicidade no contexto epistemológico grego. [Resposta contida no texto]; Especifique qual foi a principal meta que Ptolomeu estabeleceu para produzir o Almagesto. [Resposta contida no texto]; Aponte as principais considerações celestes adotadas por Ptolomeu. [Resposta contida no texto]; Localize no texto, o motivo das considerações de Ptolomeu não terem sido arbitrárias. [Resposta contida no texto]; Enumere as principais diferenças entre as correntes de pensamento instrumentalista e realista. [Resposta contida no texto]; Descreva como o conhecimento era dividido na época de Ptolomeu. [Resposta contida no texto]; Exemplifique como Ptolomeu resolveu cada um dos problemas empíricos astronômicos. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (entender: discutir, distinguir, diferenciar, exprimir, explicar, ilustrar, representar).

*Explique porque dizer que o sistema copernicano foi aceito por ser mais simples que a astronomia de Ptolomeu é uma falácia desmedida. [Resposta contida no texto]; Explique o significado do termo “salvar os fenômenos”, para os astrônomos como Ptolomeu. [Resposta contida no texto]; Discuta sobre como a divisão do conhecimento na época de Ptolomeu auxilia na distinção da astronomia matemática, em relação à astronomia física. [Resposta contida no texto]; Explique como a redução dos corpos celestes a meros pontos na esfera celeste serviu de utilidades práticas na época de Ptolomeu. [Resposta contida no texto]; Explique como Ptolomeu resolveu o problema empírico das estações do ano. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (aplicar: esboçar, estruturar, organizar, ordenar, extrapolar, generalizar, interpretar, comparar, relacionar, selecionar, etc.).

*Compare teoria do epiciclo-deferente de Apolônio com a teoria do excêntrico de Ptolomeu. [Resposta contida no texto]; Intérprete a passagem a seguinte passagem do texto: “Hanson viu Ptolomeu como o expoente máximo do instrumentalismo”. [Resposta margeando o texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (analisar: criticar, correlacionar, debater, sistematizar etc.).

*Que debate sobre a natureza da ciência é possível desenvolver em torno da implicação do estado cognitivo das teorias científicas? [Resposta margeando o texto]; Debata sobre as críticas de Copérnico a Ptolomeu, quanto ao uso do artifício geométrico equante. [Resposta margeando o texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (criar/sintetizar: comunicar, construir, documentar, escrever, esquematizar, formular, produzir, propor, etc.).

*Que mensagem sobre a natureza da ciência pode ser comunicada a partir da existência das correntes instrumentalistas e realista dentro da tradição de pesquisa grega? [Resposta para além do texto]; Esquematize as explicações de Ptolomeu aos problemas empíricos astronômicos. [Resposta contida no texto]; Produza uma síntese sobre as teorias planetárias de Ptolomeu e suas explicações para os problemas empíricos. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (avaliar: argumentar, contrastar, julgar, valorizar, validar etc.).

*Argunte sobre como a existência das duas correntes epistemológicas de pensamento instrumentalista e realista na tradição de pesquisa grega, implica na não linearidade e do crescimento cumulativo da ciência. [Resposta contida no texto]; Comente como a passagem o texto, a seguir, se relaciona com a importância da matemática na ciência. “Ptolomeu afirmava que a matemática “determinava a natureza envolvida nas formas e em seus movimentos de um lugar para outro, servindo para investigar a forma, o número, o tamanho e o lugar, o tempo e coisas semelhantes”. [Resposta para além do texto]; Avalie criticamente como a passagem, a seguir, corrige a visão empírico-indutivista ingênua da produção do conhecimento científico: “leis e teorias científicas são elaborações, criações do intelecto humano. Não são meras sínteses indutivas do observado, do experimentado. Os dados, per se, não geram teorias”. [Resposta margeando o texto]; Contraste os modos dos instrumentalistas e dos realistas praticarem a mesma astronomia. [Resposta contida no texto]; Argunte sobre a importância do artifício geométrico equante na teoria planetária de Ptolomeu. [Resposta contida no texto].*

**TEMA/AULA TEXTO VIII.** *Os debates astronômicos, cosmológicos e físicos nos antecedentes medievais ao advento da astronomia copernicana.*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (conhecer: apontar, citar, definir, descrever, numerar, enunciar, especificar, estabelecer, exemplificar, expressar, identificar, localizar, relatar, etc.).

*Aponte os aspectos de cunhos sociais, culturais, políticos, econômicos e religiosos que estavam implicados na prática astronômica, cosmológica e física nos antecedentes medievais ao advento da astronomia copernicana. [Resposta contida no texto];* *Descreva a visão de mundo de Parmênides implicada no problema das antípodas. [Resposta contida no texto];* *Descreva no texto, como a visão terraplanista de Lactâncio entrou em conflito com o problema das antípodas de Parmênides. [Resposta contida no texto];* *Enumere, a partir do texto, as diferenças de abordagem sobre o problema das antípodas de Parmênides, por Lactâncio e Agostinho. [Resposta contida no texto];* *Localize os argumentos de Agostinho sobre o papel subordinado do pensamento filosófico grego a teologia cristã, e sua principal implicação para o pensamento religioso da época. [Resposta contida no texto];* *Cite as principais contribuições astronômicas dos árabes durante a invasão muçulmana na bacia do mar Mediterrâneo ou península ibérica. [Resposta contida no texto];* *Aponte os problemas técnicos presentes nas traduções árabes do Almagesto de Ptolomeu. [Resposta contida no texto];* *Especifique as preocupações de Peurbach com a astronomia de seu tempo, e como isso implicou de alguma forma na atitude posterior de Copérnico, quanto a uma nova interpretação da prática astronômica de seu tempo. [Resposta margeando o texto];* *Defina o conceito de força motriz de Aristóteles. [Resposta contida no texto];* *Defina o conceito de antiperistasis de Aristóteles. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (entender: discutir, distinguir, diferenciar, exprimir, explicar, ilustrar, representar).

*Explique porque os primeiros cristãos não considerava a ciência como uma atividade importante na fase do declínio do conhecimento antigo grego. [Resposta contida no texto];* *Como as implicações das duas fases extra científicas antecedentes ao advento da astronomia copernicana representaram um atraso ao desenvolvimento da astronomia, da cosmologia e da física, no contexto científico europeu? [Resposta margeando o texto];* *Discuta sobre a importância dos árabes na segunda fase medieval antecedente ao advento da astronomia copernicana. [Resposta margeando o texto];* *Sabendo da importância da Biblioteca de Alexandria para o desenvolvimento científico grego, discuta sobre a importância da criação das universidades, no contexto medieval, bem como no contexto contemporâneo atual. [Resposta margeando o texto];* *Explique sobre o problema conceitual*

*de incompatibilidade lógica entre a visão cosmológica aristotélica e a astronomia ptolomaica. [Resposta contida no texto]; Explique sobre a importância do trabalho de Nicolau de Cusa, frente ao problema da visão de mundo geocêntrica aristotélica. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (aplicar: esboçar, estruturar, organizar, ordenar, extrapolar, generalizar, interpretar, comparar, relacionar, selecionar, etc.).

*Interprete o significado do problema conceitual externo ligado ao componente da visão de mundo, frente aos debates científicos nos antecedentes medievais ao advento da astronomia copernicana e ao próprio desenvolvimento da ciência. [Resposta margeando o texto]; Compare os diferentes estágios do desenvolvimento científico europeu entre os treze séculos que separam o trabalho de Ptolomeu do advento da astronomia copernicana. [Resposta margeando o texto]; Selecione, no texto, os principais fatores externos e internos, implicados na prática da astronomia, da cosmologia e da física, nos antecedentes medievais ao advento da astronomia copernicana. [Resposta contida no texto]; Compare conceitualmente as ideias sobre: (a) a força motriz aristotélica, (b) a força motriz incorpórea de Philoponus e (c) a força motriz (viz motiva) de Buridan. [Resposta contida no texto]; Interprete a seguinte passagem do texto: “o homem, em sua tentativa de entender o mundo em que vive, tem consciência das limitações do seu saber, isto é, de sua doura ignorância”. [Resposta para além do texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (analisar: criticar, correlacionar, debater, sistematizar etc.).

*Correlacione cada um dos quatro aspectos, características e princípios da natureza da ciência com ideias no texto, que corroboram com sua validade epistemológica contextual. [Resposta margeando o texto]; Debata sobre o significado ontológico do conceito de força para Aristóteles, Philoponus e Buridan. [Resposta margeando o texto]; Sistematize os principais fatores externos e internos à astronomia e a cosmologia nos antecedentes medievais ao advento da astronomia copernicana e aponte suas implicações sobre o desenvolvimento da ciência, frente à ideia ingênua de que a Europa tenha dormido profundamente uma noite de mil anos. [Resposta margeando o texto]; Que crítica pode ser feita acerca da ideia de que a Europa tenha dormido uma longa noite de mil anos. [Resposta para além do texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (criar/sintetizar: comunicar, construir, documentar, escrever, esquematizar, formular, produzir, propor, etc.).

*Sintetize os principais argumentos sobre a possibilidade do movimento da Terra e sua implicação para o desenvolvimento da astronomia, da cosmologia e da física no contexto europeu. [Resposta contida no texto]; Construa um esquema ilustrativo (infográfico) para representar os principais aspectos da cosmologia de Nicolau de Cusa. [Resposta margeando o texto]; Produza uma síntese sobre as principais críticas à dinâmica de forças de Aristóteles. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (avaliar: argumentar, contrastar, julgar, valorizar, validar etc.).

*Argunte sobre como a discussão sobre o movimento da Terra nos antecedentes medievais contribuiu, posteriormente, para o advento da astronomia copernicana. [Resposta margeando o texto]; Construa um contraste entre as visões de mundo de Aristóteles e de Nicolau de Cusa, observando, principalmente, as ideias de unicidade da Terra e do universo defendidas por Aristóteles. [Resposta contida no texto]; Avalie o impacto científico sobre a discussão cosmológica sobre a pluralidade do universo e não centralidade da Terra no contexto medieval, para o crescimento científico, após o advento da astronomia copernicana. [Resposta para além do texto].*

**TEMA/AULA TEXTO IX.** *As influências dos fatores extra e intracientíficos implicadas no advento da astronomia copernicana.*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (conhecer: apontar, citar, definir, descrever, numerar, enunciar, especificar, estabelecer, exemplificar, expressar, identificar, localizar, relatar, etc.).

*Apresente os principais aspectos das influências da escola de pensamento neoplatônica e do culto ao Sol sobre o advento da astronomia copernicana. [Resposta contida no texto]; Cite os aspectos mais importantes da influência da escola de pensamento neoplatônica sobre o trabalho de Copérnico. [Resposta contida no texto]; Defina as principais características da escola de pensamento neoplatônico. [Resposta contida no texto]; Descreva a importância da matemática para a escola de pensamento neoplatônica. [Resposta contida no texto]; Enuncie as exigências de Copérnico para propor sua reforma astronômica. [Resposta contida no texto]; Especifique o papel das ideias pitagóricas de simplicidade e harmonia na prática da astronomia e da cosmologia no contexto grego e europeu. [Resposta margeando o texto]; Estabeleça as principais diferenças entre a*

*astronomia copernicana e a astronomia ptolomaica. [Resposta margeando o texto]; Exemplifique como Copérnico atribuiu ao Sol um lugar em seu sistema astronômico. [Resposta contida no texto]; Expresse o significado metafísico do culto ao Sol no contexto do advento da astronomia copernicana. [Resposta contida no texto]; Identifique a principal crítica de Copérnico à astronomia de Ptolomeu na seguinte passagem de texto: “Eles [os ptolomaicos] nem têm sido capazes de distinguir nem reproduzir a coisa principal - a saber, a forma do Universo e a simetria fixa de suas partes. Com eles é como se um artista reunisse mãos, pés, cabeça e outros membros na imagem de diversos modelos, cada parte muitíssimo bem desenhada, mas sem relação com o mesmo corpo. Uma vez que elas não se adaptam umas às outras de forma alguma, o resultado seria antes um monstro que um homem”. [Resposta contida no texto]; Localize no texto os principais aspectos da astronomia copernicana que impedem de afirmar que ela era mais simples que a astronomia de Ptolomeu. [Resposta contida no texto]; Relate sobre como as influências neoplatônicas se constituíram nos principais fatores extra científicos responsáveis pelo advento da astronomia copernicana. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (entender: discutir, distinguir, diferenciar, exprimir, explicar, ilustrar, representar).

*Discuta sobre a importância epistemológica da matemática como estruturante do pensamento científico na seguinte passagem do texto: “Essa concepção de que a natureza pode ser matematizada tornou-se parte estrutural da filosofia neoplatônica. Com isso, na Idade Média, ela forneceu uma das principais contribuições para o desenvolvimento da ciência, isto é, a extensão das matemáticas a toda a ciência física, ao menos em princípio”. [Resposta margeando o texto]; Que principal distinção epistemológica pode ser observada entre a prática da astronomia da tradição de pesquisa grega e da tradição de pesquisa europeia que está nascendo com Copérnico? [Resposta contida no texto]; Diferencie os principais aspectos metodológicos e ontológicos das tradições de pesquisas grega e europeia nascente. [Resposta contida no texto]; Explique de que maneira é possível afirmar que a escola de pensamento neoplatônica auxiliou a astronomia copernicana a dar início a uma nova visão de mundo europeia. [Resposta contida no texto]; Que tipo de representação epistemológica a simetria possui para com a física nos dias atuais? [Resposta para além do texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (aplicar: esboçar, estruturar, organizar, ordenar, extrapolar, generalizar, interpretar, comparar, relacionar, selecionar, etc.).

*Esboce os principais aspectos do sistema astronômico copernicano. [Resposta contida no texto]; Interprete a seguinte passagem do texto: “se nos guiarmos pelo que o próprio Copérnico nos diz a respeito da forma como ele chegou a seu sistema, certamente não chegaremos à sua astronomia, mas sim a uma astronomia no gênero da que Tycho Brahe desenvolveu, a qual, aliás, deveria logicamente se colocar entre Ptolomeu e Copérnico, e não depois deste último”. [Resposta contida no texto]; Compare as explicações de Copérnico aos problemas empíricos astronômicos, com as explicações de Ptolomeu. [Resposta margeando o texto]; Relacione o peso dos fatores filosóficos e metafísicos que acentuaram a reforma astronômica de Copérnico, com o peso do motivo interno de natureza física ligada à necessidade de uma explicação mecânica da astronomia matemática. [Resposta margeando o texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (analisar: criticar, correlacionar, debater, sistematizar etc.).

*Que tipo de crítica sobre a visão de ciência lógica e infalível é possível extrair do episódio da astronomia copernicana, ao considerar a seguinte passagem de texto: “nos mostra que a história do pensamento científico não é inteiramente lógica. Assim, para compreender lhe a evolução, é mister levar em conta fatores extra lógicos. Dessa forma, uma das razões - provavelmente a mais profunda - da grande reforma astronômica operada por Copérnico não era absolutamente científica”. [Resposta margeando o texto]; Que tipo de correlação metafísica Copérnico construiu para colocar o Sol no centro do seu sistema astronômico? [Resposta contida no texto]; Debata sobre a passagem do texto, a seguir, considerando a existência de possíveis conflitos cognitivos para o pensamento científico europeu, no contexto de Copérnico: (...) quase todos os astros giram em torno do Sol, mas a Lua gira em torno da Terra. Algo um tanto estranho, pois satélites orbitando outros planetas só seriam conhecidos a partir das observações telescópicas de Galileu, em 1609. Portanto, para um questionamento desta natureza, “se Copérnico estava identificando a Terra como um planeta, por que motivo só ela possuía outro planeta girando a seu redor”? [Resposta margeando o texto]. Sistematize as principais críticas de Copérnico à astronomia de Ptolomeu. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (criar/sintetizar: comunicar, construir, documentar, escrever, esquematizar, formular, produzir, propor, etc.).

*Que possível mensagem sobre o Renascimento científico pode ser comunicada na seguinte passagem de texto: “Mirando as causas físicas dos movimentos celestes e terrestres,*

*no contexto da tradição de pesquisa europeia, em última instância, o crescimento científico cognitivo se materializou na construção de novos aportes teórico e metodológico, cuja síntese final se materializa na mecânica newtoniana*". [Resposta contida no texto]; *Produza uma síntese acerca dos principais problemas conceituais e das soluções apresentada por Copérnico, antes de propor sua astronomia*. [Resposta contida no texto]; *Esquematize as principais soluções apresentados por Copérnico aos problemas empíricos astronômicos*. [Resposta contida no texto]; *Diante do equívoco acerca do valor epistemológico empregado ao critério de simplicidade na astronomia copernicana, encontrado em alguns livros didáticos de física, proponha uma redação que possa dirimi-lo*. [Resposta margeando o texto].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (avaliar: argumentar, contrastar, julgar, valorizar, validar etc.).

*Argumente sobre como a escola de pensamento neoplatônico influenciou no advento da astronomia copernicana*. [Resposta contida no texto]; *Que tipo de contraste epistemológico encontra-se entre a proposta astronômica de Copérnico, em relação à proposta de Ptolomeu?* [Resposta contida no texto]; *Julgue natureza da produção de conhecimento científico, considerando a seguinte passagem de texto: "a inovação proporcionada pelo sistema astronômico copernicano não nasceu da observação de novos fatos, nem da falta de explicação de fatos antigos, mas de uma nova interpretação de fatos bastante conhecidos pelos astrônomos do século XV". Copérnico "foi um supremo exemplo de um homem que revolucionou a ciência ao olhar fatos velhos de um novo modo, basicamente neoplatônico"*. [Resposta para além do texto]; *Discuta sobre a validade da astronomia copernicana para o nascimento da tradição de pesquisa europeia*. [Resposta margeando do texto].

**TEMA/AULA TEXTO X.** *A natureza das perguntas nas críticas ao sistema astronômico copernicano.*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (conhecer: apontar, citar, definir, descrever, numerar, enunciar, especificar, estabelecer, exemplificar, expressar, identificar, localizar, relatar, etc.).

*Apresente as perguntas fomentadas pelo advento da astronomia copernicana, durante e depois da morte de Copérnico. [Resposta contida no texto]; Cite as principais críticas lançadas contra a astronomia copernicana, no contexto de Copérnico. [Resposta contida no texto]; Defina o conceito de gravidade formulado por Copérnico. [Resposta contida no texto]; Descreva os principais aspectos empíricos e conceituais presentes nas críticas lançadas contra o sistema astronômico copernicano. [Resposta contida no texto]; Especifique quais foram as explicações de Copérnico, frente aos problemas empíricos e conceituais fomentados por sua astronomia. [Resposta contida no texto]; Exemplifique o papel epistemológico das críticas lançadas por Tycho Brahe ao sistema astronômico copernicano. [Resposta margeando o texto]; Expresse o significado do aparecimento da estrela nova em 1572 e do cometa em 1577, em face do início do rompimento com a visão de mundo aristotélica. [Resposta para além do texto]; Identifique as fragilidades conceituais das explicações de Copérnico, diante dos problemas empíricos que sua astronomia fomentou. [Resposta contida no texto]; Localize no texto o principal aspecto da oposição dos astrônomos contemporâneos à astronomia de Copérnico. [Resposta contida no texto]; Relate sobre as habilidades observacionais de Tycho Brahe e outros aspectos que foram fundamentais para torná-lo o melhor astrônomo experimental de seu tempo. [Resposta para além do texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (entender: discutir, distinguir, diferenciar, exprimir, explicar, ilustrar, representar).

*Discuta sobre as implicações astronômicas dos dados observacionais de Tycho Brahe, considerando sua importância para a constituição de uma nova astronomia. [Resposta para além do texto]; Explique como Tycho Brahe desenvolveu uma consciência crítica acerca dos erros presentes nos instrumentos de medidas. [Resposta contida no texto]; Que principais distinções cosmológicas encontram-se no modelo híbrido de Tycho Brahe, em relação aos modelos de Aristóteles, Heráclides e Copérnico? [Resposta margeando o texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (aplicar: esboçar, estruturar, organizar, ordenar, extrapolar, generalizar, interpretar, comparar, relacionar, selecionar, etc.).

*Esboce as principais ideias astronômicas e cosmológicas do modelo híbrido de universo de Tycho Brahe. [Resposta contida no texto]; Interprete as ilustrações sobre o aparecimento da estrela nova e do cometa, no contexto do século XVI, fazendo um contraponto com as expectativas da sociedade atual para com alguma “descoberta” da*

ciência moderna e contemporânea. [**Resposta margeando o texto**]; *Que tipo de relação pode ser estabelecida entre o uso da metáfora na ciência e em outras áreas, como a religiosa, representada pelo “milagre de Josué”?* [**Resposta para além do texto**]

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (analisar: criticar, correlacionar, debater, sistematizar etc.).

*Que tipo de visão crítica pode ser observada sobre a produção de conhecimento científico, ao analisar a queixa de Tycho Brahe acerca da disputa com seu contemporâneo Nicoli Reymers Baer sobre a autoria do modelo híbrido de universo?* [**Resposta para além do texto**]; *Que tipo de correlação a explicação de Aristóteles sobre a origem dos cometas possui, com aspectos fundantes de sua visão de universo dividido em duas regiões distintas?* [**Resposta margeando o texto**]; *Debata sobre a importância dos estudos de Brahe sobre o cometa de 1577, no contexto da seguinte passagem do texto: “em tempos anteriores, na Antiguidade e na Idade Média, por exemplo, os cometas eram classificados como fenômenos sublunares e pertenciam ao campo da meteorologia. Isso significa que os astrônomos, cuja atenção se concentrava exclusivamente em problemas relativos às regiões celestiais, não sentiam necessidade de apresentar teorias sobre os cometas nem demarcar seu curso”.* [**Resposta margeando o texto**]; *Sistematize os principais aspectos metodológicos e ontológicos no contexto astronômicos, cosmológicos e físicos de Tycho Brahe, que permitem observar a indicação da direção do pensamento científico europeu rumo ao estabelecimento de uma nova tradição de pesquisa.* [**Resposta margeando o texto**]

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (criar/sintetizar: comunicar, construir, documentar, escrever, esquematizar, formular, produzir, propor, etc.).

*Comente criticamente sobre a aceitação da astronomia de Copérnico em alguns países europeus, como a Espanha.* [**Resposta contida no texto**]; *Que mensagem positiva pode ser comunicada para o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia, na transição da interpretação dos cometas do domínio da meteorologia para a astronomia?* [**Resposta margeando o texto**]; *Produza uma síntese dos principais aspectos metodológicos e ontológicos pertencentes ao trabalho de Tycho Brahe, que apontam na direção do processo de estabelecimento da tradição de pesquisa europeia.* [**Resposta contida no texto**]; *Escreva sobre os fundamentos das principais críticas, de cunho religioso, lançadas contra a astronomia copernicana.* [**Resposta contida no texto**]; *Esquematize quais foram as principais críticas de Brahe para com as ideias astronômicas e cosmológicas de Ptolomeu e Copérnico.* [**Resposta contida no texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (avaliar: argumentar, contrastar, julgar, valorizar, validar etc.).

*Argunte sobre a passagem de texto, seguinte, levando em consideração o fundamento epistemológico que ela transmite quanto à natureza da ciência, no contexto europeu: “o confronto entre teoria e evidência empírica se mostrou um ponto fundamental da prática científica”. [Resposta margeando o texto]; Considerado o conflito cognitivo do pensamento científico, cultural e religioso europeu provocado pela defesa de Copérnico do movimento da Terra, faça um contraste epistemológico acerca do uso das metáforas na ciência e em outras áreas extra científicas. [Resposta margeando o texto]; Que tipo de julgamento epistemológico pode ser feito, no contexto renascentista europeu, quanto à necessidade de creditar à prática científica e, por conseguinte, à astronomia e as ideias copernicanas, o mesmo status de “verdade”, atribuído somente à filosofia e a teologia? [Resposta margeando o texto]; Que tipo de valor epistemológico, as implicações astronômicas, cosmológicas, físicas e religiosas, promovidas pelo conjunto formado pelas críticas à astronomia copernicana e pelos problemas empíricos e conceituais, fornece para a libertação do pensamento europeu, da visão de mundo grega? [Resposta margeando o texto].*

**TEMA/AULA TEXTO XI.** *As defesas mais proeminentes das ideias copernicanas e suas implicações astronômicas, cosmológicas e físicas.*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (conhecer: apontar, citar, definir, descrever, numerar, enunciar, especificar, estabelecer, exemplificar, expressar, identificar, localizar, relatar, etc.).

*Apresente a principal objetivo de Giordano Bruno ao defender as ideias de Copérnico. [Resposta contida no texto]; Cite os principais argumentos de Bruno a favor das ideias de Copérnico, frente aos eruditos escolásticos. [Resposta contida no texto]; Defina o modelo cosmológico de Giordano Bruno. [Resposta contida no texto]; Descreva o papel dos personagens idealizados por Giordano Bruno para defender as ideias copernicanas. [Resposta contida no texto]; Descreva sucintamente cada uma das observações telescópicas de Galileu. [Resposta contida no texto]; Especifique quais foram os principais motivos da cruel condenação de Giordano Bruno à fogueira. [Resposta margeando o texto]; Exemplifique como as observações telescópicas de Galileu auxiliaram, em parte, na defesa*

*da astronomia copernicana. [Resposta contida no texto];* *Expresse o significado da formação artística de Galileu, frente ao reconhecimento de suas observações telescópicas. [Resposta contida no texto];* *Identifique os principais obstáculos inerentes ao uso do telescópio que impediam a aceitação das observações telescópicas de Galileu. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (entender: discutir, distinguir, diferenciar, exprimir, explicar, ilustrar, representar).

*Discuta sobre as implicações da obra de Bruno, A ceia de cinzas, na constituição de uma nova visão de mundo europeia. [Resposta margeando o texto];* *Que distinções podem ser observadas entre as ideias de Copérnico e Bruno? [Resposta contida no texto];* *Diferencie os argumentos de Galileu dos argumentos dos jesuítas aristotélicos frente à ideia da imutabilidade do mundo supralunar. [Resposta contida no texto];* *Explique as principais diferenças entre as defesas da astronomia copernicana por Bruno e Galileu. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (aplicar: esboçar, estruturar, organizar, ordenar, extrapolar, generalizar, interpretar, comparar, relacionar, selecionar, etc.).

*Interprete a passagem de texto, a seguir, observando o principal objetivo de Giordano Bruno em defender as ideias copernicanas: “[...] superior por ter-se libertado de alguns falsos pressupostos, para não dizer da cegueira, da filosofia comum e vulgar. No entanto, ele não se afastou muito dela, porque, ao ser mais estudioso da Matemática que da natureza, não pôde penetrar e aprofundar a ponto de arrancar as raízes de princípios vãos e inconvenientes e, com isso, resolver perfeitamente todas as dificuldades contrárias, libertando-se a si mesmo e aos outros de tantas investigações vãs, a fim de contemplar as coisas constantes e certas”. [Resposta margeando o texto];* *Compare os principais aspectos das defesas da astronomia de Copérnico por Bruno e Galileu. [Resposta contida no texto];* *Relacione a defesa da astronomia de Copérnico por Bruno e Galileu com o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia. [Resposta margeando o texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (analisar: criticar, correlacionar, debater, sistematizar etc.).

*Que tipo de crítica, a astronomia copernicana foi submetida nos contextos das defesas de Bruno e Galileu? [Resposta contida no texto];* *Que tipo de correlação pode ser feita entre o desenvolvimento do pensamento científico e a seguinte passagem do texto: “Para Bruno, Copérnico liberou o espírito humano e deu liberdade ao saber, visto que a*

*inteligência humana sufocava-se no ar abafado de uma prisão estreita, onde só de modo ténue, e, por assim dizer, através de frestas ela podia contemplar as estrelas distantes”.*

[**Resposta para além do texto**]; Que tipo de debate epistemológico pode ser observado entre os eruditos escolásticos e Giordano Bruno? [**Resposta margeando o texto**]; *Sistematize os principais aspectos da defesa da astronomia copernicana por Giordano Bruno.* [**Resposta contida no texto**]; *Sistematize os principais aspectos da defesa da astronomia copernicana por Galileu Galilei.* [**Resposta contida no texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (criar/sintetizar: comunicar, construir, documentar, escrever, esquematizar, formular, produzir, propor, etc.).

*Que mensagem Giordano Bruno procurou comunicar em suas passagens pela Inglaterra e Itália?* [**Resposta margeando o texto**]; *Produza uma síntese sobre a forma como as observações telescópicas de Galileu colocavam em xeque as ideias e visão de mundo aristotélica.* [**Resposta margeando o texto**]; *Construa uma opinião em defesa da astronomia copernicana, frente os argumentos dos aristotélicos e os conflitos cognitivos que Copérnico fomentou contra a visão de mundo geocêntrica europeia herdada dos gregos.* [**Resposta margeando o texto**]; *Escreva sobre o percurso científico de Galileu e a importância de sua formação artística nesse contexto.* [**Resposta margeando o texto**]; *Esquematize os principais argumentos de Galileu em favor da astronomia copernicana.* [**Resposta contida no texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (avaliar: argumentar, contrastar, julgar, valorizar, validar etc.).

*Avalie a importância epistemológica das obras de Galileu na constituição de uma nova física e, conseqüentemente, no estabelecimento da tradição de pesquisa europeia.* [**Resposta margeando o texto**]; *Argumente sobre a seguinte passagem do texto: O filósofo italiano Giordano Bruno (1548 - 1600) é considerado um mártir da liberdade de pensamento.* [**Resposta margeando o texto**]; *Que tipo de contraste pode ser feito entre a visão de mundo aristotélica e as implicações das observações telescópicas de Galileu?* [**Resposta margeando o texto**]; *Que tipo de valorização epistemológica Galileu creditou a astronomia copernicana, frente às opiniões dos aristotélicos acerca do conflito com passagens da Bíblia?* [**Resposta margeando o texto**]; *Que validade epistemológica, a astronomia precisava alcançar, para que as ideias de Copérnico fossem aceitas no contexto do século XVI e XVII?* [**Resposta margeando o texto**].

**TEMA/AULA TEXTO XII.** *As contribuições de Galileu para a constituição de uma nova física;*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (conhecer: apontar, citar, definir, descrever, numerar, enunciar, especificar, estabelecer, exemplificar, expressar, identificar, localizar, relatar, etc.).

*Apresente as soluções de Galileu para os problemas empíricos e conceituais fomentados pela astronomia copernicana. [Resposta contida no texto]; Especifique o princípio epistemológico da Navalha de Ockham e como Galileu utilizou esse princípio para mudar a ontologia do conceito de movimento e repouso. [Resposta contida no texto]; Exemplifique como Galileu utilizou os aportes teóricos de outros pensadores. [Resposta contida no texto]; Expresse o significado da lei da queda dos corpos para a constituição da nova física, considerando a matematização do movimento realizada por Galileu, mediante a relação ( $d \propto t^2$ ). [Resposta margeando o texto]; Identifique no texto os motivos de Galileu não ter sido o autor da elaboração da lei da inércia atribuída a ele por Newton. [Resposta contida no texto]; Localize no texto os motivos da experiência da Torre de Pisa não ter sido, concretamente, realizadas por Galileu. [Resposta contida no texto]; Relate sobre as principais contribuições de outros pensadores ao trabalho de Galileu. [Resposta contida no texto]; Cite quais foram as principais dificuldades conceituais que impediram Galileu de apresentar uma explicação correta para a pergunta: Por que não somos atirados fora da Terra por sua rotação? [Resposta contida no texto]; Defina os conceitos de gravidade para Galileu e Copérnico. [Resposta contida no texto]; Descreva as experiências de Galileu. [Resposta contida no texto]; Enuncie a lei da queda dos corpos desenvolvida por Galileu. [Resposta contida no texto]; Enumere os feitos científicos de Galileu encontrados no texto. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (entender: discutir, distinguir, diferenciar, exprimir, explicar, ilustrar, representar).

*Discuta sobre a relevância das explicações de Galileu para a constituição da nova física, frente aos problemas empíricos e conceituais fomentados pela astronomia copernicana. [Resposta margeando o texto]; Que distinções metodológicas e ontológicas são encontradas no trabalho de Galileu, que permitem situar a tradição de pesquisa europeia como cognitivamente distinta da grega. [Resposta margeando o texto]; Diferencie os aspectos metodológicos e ontológicos encontrados no trabalho de Galileu na física, com os*

encontrados nas ideias de Aristóteles e seus seguidores. [**Resposta contida no texto**]; Explique como Galileu chegou à elaboração da lei da queda dos corpos. [**Resposta contida no texto**]; Que representatividade científica o trabalho de Galileu garante para a constituição da nova física e, conseqüentemente, para o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia. [**Resposta margeando o texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (aplicar: esboçar, estruturar, organizar, ordenar, extrapolar, generalizar, interpretar, comparar, relacionar, selecionar, etc.).

Intérprete a passagem do texto, a seguir, considerando suas implicações sobre a natureza da ciência, no contexto do século XVII: “Diferente da física de Aristóteles, Galileu está demonstrando que é preciso não somente fazer conjecturas acerca do movimento, na queda dos corpos, como submetê-las indispensavelmente ao escrutínio da própria natureza. E é justamente essa atitude que vai configurar o novo espírito científico no contexto da tradição de pesquisa europeia”. [**Resposta para além do texto**]; Compare as explicações apresentadas por Galileu e Mersenne para a pergunta: Por que não somos atirados fora da Terra por sua rotação? [**Resposta contida no texto**]; De que maneira as considerações matemáticas de Galileu estão relacionadas com o seu insucesso frente à explicação da pergunta: Por que não somos atirados fora da Terra por sua rotação? [**Resposta contida no texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (analisar: criticar, correlacionar, debater, sistematizar etc.).

Correlacione a hipótese de Galileu de que a “natureza sempre se manifesta na sua forma mais simples”, com a importância simbólica do valor epistêmico da simplicidade na construção de conhecimentos científicos. [**Resposta para além do texto**]; Que tipo de debate epistemológico Galileu travou com os aristotélicos em sua obra *Diálogos sobre os dois principais sistemas de mundo*? [**Resposta margeando o texto**]; Sistematize as principais contribuições metodológicas e ontológicas de Galileu para o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia. [**Resposta contida no texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (criar/sintetizar: comunicar, construir, documentar, escrever, esquematizar, formular, produzir, propor, etc.).

Que mensagem sobre a natureza da ciência moderna dos séculos XVI e XVII, pode ser comunicada mediante a passagem do texto: “Galileu teve uma atitude mais perspicaz, em relação à atitude dos filósofos da natureza medievais. Estes atacavam o problema do movimento de maneira meramente hipotética, bem como não empreendiam qualquer tentativa

*de relacionar suas hipóteses com os movimentos reais do mundo físico*". [**Resposta para além do texto**]; *Construa uma síntese sobre as principais contribuições de Galileu para a constituição da nova física, no século XVII*. [**Resposta contida no texto**]; *Escreva sobre a pertinência da explicação de Galileu, para a pergunta: Existe alguma experiência terrestre que mostre que a Terra se move? -, considerando também o aspecto da não observação da paralaxe estelar, no contexto do século XVII*. [**Resposta margeando o texto**]; *Esquematize as principais objeções dos aristotélicos que acompanham os problemas empíricos e conceituais enfrentados por Galileu*. [**Resposta contida no texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (avaliar: argumentar, contrastar, julgar, valorizar, validar etc.).

Argumente sobre os motivos conceituais que impediu Galileu elaborar a lei da inércia. [**Resposta contida no texto**]; Estabeleça um contraste conceitual na passagem de texto, a seguir, com as ideias de Galileu. Para Descartes, "A primeira lei da natureza: cada coisa permanece no seu estado se nada o alterar; assim, aquilo que uma vez foi posto em movimento continuará sempre a se mover; a segunda lei da natureza: todo corpo que se move tende a continuar o seu movimento em linha reta". [**Resposta contida no texto**]; Julgue a falsa atribuição da autoria da lei da inércia que Newton fez a Galileu. [**Resposta para além do texto**]; Argumente sobre a validade histórica contextual das explicações de Galileu, frente aos problemas empíricos e problemas conceituais fomentados pela astronomia de Copérnico, e os estabelecimentos de uma nova física e uma nova tradição de pesquisa europeia cognitivamente distinta da tradição de pesquisa grega antiga. [**Resposta para além do texto**].

**TEMA/AULA TEXTO XIII.** *Johannes Kepler e a constituição de uma nova astronomia.*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (conhecer: apontar, citar, definir, descrever, numerar, enunciar, especificar, estabelecer, exemplificar, expressar, identificar, localizar, relatar, etc.).

*Apresente os principais aspectos da escola de pensamento neoplatônico que Kepler compartilhava*. [**Resposta contida no texto**]; *Cite os principais aspectos da imposição de Kepler aos limites filosóficos de suas conjecturas acerca do ordenamento do universo*. [**Resposta contida no texto**]; *Defina as principais características metafísicas do modelo cosmológico de Kepler*. [**Resposta contida no texto**]; *Descreva conceitualmente as três leis de Kepler na constituição da nova astronomia*. [**Resposta contida no texto**]; *Especifique*

quais foram as principais críticas metodológicas que Tycho Brahe proferiu contra o trabalho de Kepler. **[Resposta contida no texto]**; Estabeleça uma relação entre as críticas de Brahe ao trabalho de Kepler e a sua mudança de atitude metodológica, frente à prática da nova astronomia. **[Resposta margeando o texto]**; Exemplifique os caminhos metodológicos trilhados por Kepler para solucionar o problema empírico da órbita de Marte. **[Resposta contida no texto]**; Expresse o significado da mudança de atitude metodológica de Kepler frente à constituição da nova astronomia. **[Resposta margeando o texto]**; Identifique os principais problemas empíricos e problemas conceituais enfrentados por Kepler em seus trabalhos astronômicos. **[Resposta contida no texto]**; Localize o principal objetivo de Kepler em sua obra *Astronomia nova*. **[Resposta contida no texto]**; Relate sobre as principais dificuldades encontradas por Kepler, ao elaborar suas três leis empíricas do movimento dos planetas. **[Resposta margeando o texto]**.

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (entender: discutir, distinguir, diferenciar, exprimir, explicar, ilustrar, representar).

Discuta sobre a passagem do texto, a seguir, considerando os papéis da matemática na estruturação dos conhecimentos da nova astronomia de Kepler, em comparação com a astronomia de Platão à Copérnico: “Ao ter colocado os limites para a metafísica kepleriana, Brahe forneceu a Kepler um arrefecimento da possibilidade de fazer astronomia supondo apenas a estrutura matemática subjacente aos fenômenos celestes”. **[Resposta para além do texto]**; Que distinções podem ser feitas comparando a nova astronomia de Kepler com a astronomia de Copérnico e de Ptolomeu? **[Resposta margeando o texto]**; Diferencie os principais aspectos metodológicos e ontológicos presentes na prática da astronomia por Kepler, em comparação com a prática da astronomia de Ptolomeu e Copérnico. **[Resposta margeando o texto]**; Diferencie o conceito de gravidade apresentado por Copérnico, Galileu e Gilbert. **[Resposta contida no texto]**; Explique como Kepler conseguiu chegar à elaboração empírica das suas três leis do movimento dos planetas. **[Resposta contida no texto]**; Que tipo de representação científica as leis três leis de Kepler, inicialmente, obtiveram frente ao julgamento dos astrônomos de seu tempo? **[Resposta margeando o texto]**.

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (aplicar: esboçar, estruturar, organizar, ordenar, extrapolar, generalizar, interpretar, comparar, relacionar, selecionar, etc.).

Estruture os passos astronômicos de Kepler em direção à suas explicações sobre a causa do movimento dos planetas. **[Resposta contida no texto]**; Intérprete a passagem do

*texto, a seguir, considerando possíveis motivos que levaram Kepler a abandonar sua ideia: “Kepler buscou uma relação de dependência da força atrativa do Sol com a distância dos planetas, supondo que a intensidade dessa força pudesse variar com o inverso do quadrado da distância média do planeta ao Sol. Uma ideia brilhante, mas que foi abandonada, devido às consequências que ele não acreditava serem possíveis: “uma força do tipo  $(1/r^2)$  deveria se estender em todas as direções através do espaço, como ocorre com a luz, e não restringir sua ação ao plano das órbitas planetárias, como acreditava”. [Resposta margeando o texto]; Compare a explicação da causa do movimento dos planetas apresentadas por Galileu, Gilbert e Kepler. [Resposta margeando o texto]; De que maneira os principais aspectos do trabalho de Gilbert estão relacionados com as explicações de Kepler para a causa do movimento dos planetas? [Resposta margeando o texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (analisar: criticar, correlacionar, debater, sistematizar etc.).

*Que tipo de críticas foram feitas ao trabalho de Kepler por seus pares? [Resposta contida no texto]; Correlacione os principais aspectos do trabalho de Gilbert com o trabalho de Kepler. [Resposta contida no texto]; Debata sobre a passagem do texto, a seguir, considerado, em sua concepção, que imagem sobre a natureza da ciência ela transmite: “Suas [de Kepler] exposições físicas possuem uma mensagem especial para os cientistas que sentiram a necessidade de indagar os primeiros princípios da explicação mecânica da natureza. É válido destacar que, embora seu estudo transmita essa mensagem, alguns comentários de seus pares, físicos e astrônomos alemães, materializaram-se na aversão da comunidade científica, à época, para com a aceitação de suas leis empíricas do movimento planetário”. [Resposta margeando o texto]; Sistematize as perguntas investigadas por Kepler para explicar a causa do movimento dos planetas juntamente com suas respostas. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (criar/sintetizar: comunicar, construir, documentar, escrever, esquematizar, formular, produzir, propor, etc.).

*Que mensagem filosófica sobre a ciência do século XVII pode ser comunicada a partir da passagem do texto: “Suas exposições astrofísicas possuem uma mensagem especial para os cientistas que sentiram a necessidade de indagar os primeiros princípios da explicação mecânica da natureza”. [Resposta para além do texto]; Produza uma síntese sobre os principais aspectos do trabalho de Kepler, que auxiliaram no estabelecimento de uma nova astronomia. [Resposta contida no texto]; Esquematize as relações entre os*

*aspectos metodológicos e ontológicos do trabalho de Kepler com a constituição de uma nova astronomia e o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia. [Resposta margeando o texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (avaliar: argumentar, contrastar, julgar, valorizar, validar etc.).

*Argumente sobre as implicações das leis de Kepler para a constituição da nova astronomia e, conseqüentemente, para o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia. [Resposta contida no texto]; Argumente sobre a importância científica do trabalho de Gilbert tanto no desenvolvimento da nova astronomia de Kepler quanto na elaboração da gravitação universal newtoniana. [Resposta margeando o texto]; Contraste os argumentos dos astrônomos, cosmólogos e físicos lançados contra a nova astronomia de Kepler, com seu julgamento a respeito da relevância científica do trabalho de Kepler, frente ao crescimento cognitivo da ciência. [Resposta para além do texto]; Em face da ideia empírico-indutivista ingênua, pela qual o conhecimento científico é fruto direto da observação dos fatos, julgue o aspecto de Kepler ter generalizado a trajetória da órbita de Marte para os outros planetas, sem analisar seus dados, levando em consideração também às críticas de seus pares contemporâneos. [Resposta para além do texto].*

**TEMA/AULA TEXTO XIV.** *A explicação mecânica da gravidade por René Descartes e os problemas empíricos e conceituais na gênese da gravitação universal newtoniana.*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (conhecer: apontar, citar, definir, descrever, numerar, enunciar, especificar, estabelecer, exemplificar, expressar, identificar, localizar, relatar, etc.).

*Aponte as principais características da filosofia mecanicista de Descartes. [Resposta contida no texto]; Qual definição Descartes apresentou para o conceito de movimento. [Resposta contida no texto]; Descreva as principais características da nova visão cosmológica de Descartes. [Resposta contida no texto]; Enuncie a “lei da inércia” concebida por Descartes. [Resposta contida no texto]; Especifique como Descartes concebia o papel da matemática na construção de conhecimentos científicos. [Resposta margeando o texto]; Estabeleça relações entre a visão de mundo cartesiana e a visão de mundo aristotélica. [Resposta margeando o texto]; Exemplifique os principais aspectos ontológicos dos conceitos de movimento e repouso apresentados por Descartes. [Resposta contida no*

**texto**]; *Cite quais foram os principais problemas empíricos e problemas conceituais implicados na gênese da teoria da gravitação universal newtoniana.* [**Resposta contida no texto**]; *Identifique a principal opinião de Descartes sobre a infinitude do universo.* [**Resposta contida no texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (entender: discutir, distinguir, diferenciar, exprimir, explicar, ilustrar, representar).

*Discuta sobre as principais ideias de universo cheio e pleno de Descartes.* [**Resposta contida no texto**]; *Que principais distinções podem ser feitas entre a visão cosmológica de Descartes e a visão aristotélica?* [**Resposta margeando o texto**]; *Explique a ideia da matéria e do movimento na visão de mundo cartesiana.* [**Resposta contida no texto**]; *Que tipo de representatividade a nova cosmologia cartesiana possui no estabelecimento da tradição de pesquisa europeia?* [**Resposta margeando o texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (aplicar: esboçar, estruturar, organizar, ordenar, extrapolar, generalizar, interpretar, comparar, relacionar, selecionar, etc.).

*Esboce o movimento dos planetas no modelo cosmológico de Descartes.* [**Resposta contida no texto**]; *Interprete a seguinte passagem do texto: “a filosofia da natureza de Descartes preconizava uma visão de mundo mecanicista, pela qual todos os fenômenos naturais deveriam ser explicados pelas leis da matéria em movimento, diferentemente das ideias aristotélicas”.* [**Resposta margeando o texto**]; *Compare a explicação da gravidade apresentada por Descartes e Newton.* [**Resposta margeando o texto**]; *Relacione a “lei da inércia” enunciada por Descartes com as ideias de Galileu acerca do mesmo tema.* [**Resposta margeando o texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (analisar: criticar, correlacionar, debater, sistematizar etc.).

*Que crítica pode ser feita acerca da defesa de Descartes sobre a não existência do vazio?* [**Resposta margeando o texto**]; *Que correlações podem ser feitas entre as ideias cosmológicas de Descartes e o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia.* [**Resposta margeando o texto**]; *Sistematize os principais aspectos da visão de mundo cartesiana.* [**Resposta contida no texto**]; *Debata sobre a importância da extensão da matéria na visão de mundo de Descartes.* [**Resposta margeando o texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (criar/sintetizar: comunicar, construir, documentar, escrever, esquematizar, formular, produzir, propor, etc.).

*Que mensagem sobre a natureza da ciência, a filosofia mecanicista de Descartes comunica em relação à nova forma de produção de conhecimento científico. [Resposta margeando o texto]; Escreva com as próprias palavras a explicação mecânica da gravidade por René Descartes. [Resposta margeando o texto]; Esquematize os principais problemas empíricos e problemas conceituais que estavam presentes no contexto da nova astronomia, nova cosmologia e nova física nascente nos séculos XVI e XVII. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (avaliar: argumentar, contrastar, julgar, valorizar, validar etc.).

*Argumente sobre a importância da solução dos problemas empíricos e conceituais, no contexto da astronomia, da cosmologia e da física do século XVII, frente ao estabelecimento da tradição de pesquisa europeia. [Resposta margeando o texto]; Que contrastes do disperso “quebra-cabeça” científico intelectual foram encontrados por Newton no século XVII? [Resposta margeando o texto]; Contraste a explicação mecânica da gravidade por René Descartes com a explicação de Newton. [Resposta margeando o texto]; Avalie as principais implicações da filosofia mecanicista cartesiana na prática científica do século XVII. [Resposta para além do texto]; Que valor a filosofia mecanicista de Descartes pode representar para a constituição de uma nova cosmologia, no contexto da nova tradição de pesquisa europeia. [Resposta para além do texto].*

**TEMA/AULA TEXTO XV.** *A teoria da gravitação universal newtoniana e o estabelecimento da nova tradição de pesquisa europeia do século XVII.*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (conhecer: apontar, citar, definir, descrever, numerar, enunciar, especificar, estabelecer, exemplificar, expressar, identificar, localizar, relatar, etc.).

*Aponte por qual ideia central é possível seguir os passos intelectuais newtonianos em direção à teoria da gravitação universal. [Resposta contida no texto]; Cite qual foi o principal objetivo de Newton ao tomar as ideias de Kepler e Galileu para explicar o movimento da órbita da Lua em torno da Terra. [Resposta contida no texto]; Defina a teoria da gravitação universal newtoniana. [Resposta contida no texto]; Descreva o raciocínio de Newton explicar qualitativamente o movimento da órbita de um planeta, utilizando-se das ideias de Kepler e de Galileu. [Resposta contida no texto]; Enuncie todas as perguntas de natureza empírica e conceitual que Newton teve que resolver para chegar à teoria da gravitação universal. [Resposta contida no texto]; Especifique de que maneira Newton deu*

*seu primeiro passo intelectual em direção à teoria da gravitação universal. [Resposta contida no texto]; Estabeleça uma relação da passagem do texto, a seguir, no contexto das tradições de pesquisa grega e europeia: “aos olhos da comunidade científica, construir hipóteses sem submetê-las ao escrutínio da matematização e comparação com os dados empíricos, além de ultrapassado, não era sensato para a construção do conhecimento, dentro da nova tradição de pesquisa”. [Resposta margeado o texto]; Exemplifique, com suas palavras, a resposta de Newton à pergunta: por que a órbita descrita pelo movimento de um planeta é elíptica e não circular? [Resposta contida no texto]; Expresse o significado da solução do problema conceitual interno de incompatibilidade lógica entre a terceira lei de Kepler e gravitação universal newtoniana, para o crescimento cognitivo da astronomia, da cosmologia e da física. [Resposta contida no texto]; Identifique o principal aspecto inerente aos problemas conceituais solucionados por Newton para chegar à teoria da gravitação universal. [Resposta contida no texto]; Localize a hipótese mais importante na gênese da gravitação universal newtoniana. [Resposta contida no texto]; Relate por que as ideias que se propagam sobre Newton ter concebido a teoria da gravitação universal entre os anos de 1665-1666, ou ter deduzido diretamente das leis de Kepler não passam de falácias históricas. [Resposta contida no texto]; Enumere os feitos intelectuais de Newton até a concepção da teoria da gravitação universal. [Resposta contida no texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (entender: discutir, distinguir, diferenciar, exprimir, explicar, ilustrar, representar).

*Discuta sobre a importância conceitual da hipótese Hooke para a gênese da gravitação universal newtoniana. [Resposta margeando o texto]; Que distinções ontológicas existem entre os diversos conceitos de força encontrados por Newton em seu tempo. [Resposta margeando o texto]; Diferencie o significado ontológico do conceito de peso na concepção newtoniana, em relação às concepções de Aristóteles, Copérnico e Galileu. [Resposta margeando o texto]; Explique como a hipótese de Hooke implicou na gênese da teoria da gravitação universal newtoniana. [Resposta margeando o texto].*

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (aplicar: esboçar, estruturar, organizar, ordenar, extrapolar, generalizar, interpretar, comparar, relacionar, selecionar, etc.).

*Que tipo de generalização Newton fez para com a ação da força da gravidade. [Resposta contida no texto]; Interprete o significado da visão de mundo newtoniana no contexto da tradição de pesquisa europeia. [Resposta margeando o texto]; Compare os principais elementos da visão de mundo newtoniana com a visão de mundo aristotélica.*

[**Resposta margeando o texto**]; *Relacione os principais aspectos metodológicos e ontológicos inerente aos passos intelectuais newtonianos em direção à teoria da gravitação universal, com o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia representada pela astronomia, cosmologia e física no contexto do século XVII.* [**Resposta contida no texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (analisar: criticar, correlacionar, debater, sistematizar etc.).

*Se posicione criticamente frente aos aspectos éticos e morais que cercam a controvérsia entre Hooke e Newton inerente à hipótese da lei de força ( $1/r^2$ ).* [**Resposta para além do texto**]; *Correlacione os principais aspectos que levaram Newton a abandonar seus estudos da mecânica celeste por mais de vinte anos, contrastando-as com as falácias que giram em torno dos *annus mirabilis*.* [**Resposta contida no texto**]; *Debata sobre a importância da contribuição de outros personagens da história da astronomia, da cosmologia e da física, no contexto da construção newtoniana da teoria da gravitação universal, bem como do caráter coletivo da produção do conhecimento científico.* [**Resposta para além do texto**]; *Sistematize os principais passos intelectuais dados por Newton em direção a sua teoria da gravitação universal.* [**Resposta contida no texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (criar/sintetizar: comunicar, construir, documentar, escrever, esquematizar, formular, produzir, propor, etc.).

*Que tipo de mensagem sobre a natureza da produção do conhecimento científico pode ser comunicada frente à controvérsia envolvendo Hooke e Newton e a concepção intelectual da lei da força ( $1/r^2$ )?* [**Resposta para além do texto**]; *Produza uma síntese acerca dos principais ideias newtonianas que permitem estabelecer finalmente a tradição de pesquisa europeia inerente à prática da nova astronomia, nova cosmologia e nova física.* [**Resposta margeando o texto**]; *Documente com as próprias palavras sobre os diversos aspectos, características e princípios da natureza da ciência, que podem ser implicitamente encontrados no texto.* [**Resposta margeando o texto**]; *Escreva uma síntese sobre os principais passos intelectual de Newton em direção à concepção da teoria da gravitação universal.* [**Resposta contida no texto**]; *Esquematize as soluções dos problemas empíricos e conceituais apresentadas por Newton mediante sua teoria da gravitação universal.* [**Resposta contida no texto**]; *Proponha uma possível solução para a controvérsia entre Hooke e Newton, observando, em seu ponto de vista, os aspectos éticos e morais que acredita serem fundamentais para a prática científica.* [**Resposta para além do texto**].

**Perguntas, ações verbais do domínio cognitivo** (avaliar: argumentar, contrastar, julgar, valorizar, validar etc.).

*Argunte sobre a importância das leis de Kepler para a concepção de Newton da sua teoria da gravitação universal. [Resposta margeando o texto]; Que contrastes do disperso “quebra-cabeça” científico intelectual foram encontrados por Newton no século XVII? [Resposta margeando o texto]; Julgue criticamente a atitude de Newton de não ter reconhecido a importância das ideias de Hooke para a concepção da teoria da gravitação universal. [Resposta para além do texto]; Que tipo de valor científico pode ser observado na teoria da gravitação universal newtoniana, no estabelecimento da tradição de pesquisa europeia? [Resposta para além do texto]; Avalie a pertinência do trabalho de Newton e sua relação com o estabelecimento da tradição de pesquisa europeia astronômica, cosmológica e física, no século XVII. [Resposta para além do texto].*