

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE FÍSICA, INSTITUTO DE QUÍMICA, INSTITUTO DE  
BIOCIÊNCIAS E FACULDADE DE EDUCAÇÃO

A Ótica dos Corpos em Movimento sob a Visão do  
Realismo Estrutural: Questões não Consensuais de  
Natureza da Ciência na Formação de Professores

Felipe Prado Corrêa Pereira

São Paulo

2021

**FICHA CATALOGRÁFICA**  
**Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação**  
**do Instituto de Física da Universidade de São Paulo**

Pereira, Felipe Prado Corrêa

A ótica dos corpos em movimento sob a visão do realismo estrutural: questões não consensuais de natureza da ciência na formação de professores. São Paulo, 2021.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. Faculdade de Educação, Instituto de Física, Instituto de Química e Instituto de Biociências.

Orientador: Prof. Dr. Ivã Gurgel  
Área de Concentração: Ensino de Física.

Unitermos: 1. Física – Estudo e ensino; 2. Ensino; 3. História da Ciência; 4. Filosofia da Ciência; 5. Realismo (Filosofia)

USP/IF/SBI-049/2021

FELIPE PRADO CORRÊA PEREIRA

A Ótica dos Corpos em Movimento sob a Visão do  
Realismo Estrutural: Questões não Consensuais de  
Natureza da Ciência na Formação de Professores

Orientador: Prof. Dr. Ivã Gurgel

Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Física, ao Instituto de Química, ao Instituto de Biociências e à Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ivã Gurgel (IF-USP) (Presidente)

Prof. Dr. Breno Arsioli Moura (UFABC)

Prof. Dr. André Ferrer Pinto Martins (UFRN)

São Paulo

2021



## **Declaração de responsabilidade**

As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do(s) autor(es) e não necessariamente refletem a visão da FAPESP.



*“Quero desejar, antes do fim  
Pra mim e os meus amigos  
Muito amor e tudo mais  
Que fiquem sempre jovens  
E tenham as mãos limpas  
E aprendam o delírio com coisas reais”*

Belchior





# Agradecimentos

Ao meu orientador, Ivã Gurgel. É um enorme privilégio ter a oportunidade de trabalhar com ele e participar e contribuir com o TeHCo. Considero que conhecer o Ivã foi um ponto de inflexão em minha vida.

Aos meus colegas do TeHCo (da “velha” e da “jovem guarda”!), que há anos têm sido fundamentais para meu crescimento e para a manutenção da minha inquietude. Agradeço especialmente ao Professor André Noronha, que contribuiu muito para a concepção do projeto de pesquisa do qual floresceu esta dissertação.

As minhas queridas e meus queridos amigos, tanto “santacruzenses” quanto “cabritos” e “uspianos”, cujo companheirismo tem sido fundamental em meio à todas as dificuldades e alegrias da vida.

Aos alunos da turma de Gravitação que toparam participar deste trabalho. A contribuição de vocês foi de inestimável valor. Espero que esta pesquisa lhes retribua de alguma forma.

A todos os docentes que, desde o ensino básico até o superior, contribuíram para minha formação.

À minha querida e amada companheira, Caroline Guandalin, por todo o suporte e carinho nesses últimos anos. Sem seu apoio, nada disso teria sido possível.

À toda minha família, especialmente aos primeiros educadores da minha vida, que me ensinaram o que sei de mais valioso e a quem devo tudo: à Professora Ana Scintilla Martins de Almeida Prado e ao Professor Manuel Carlos Mesquita Corrêa Pereira, meus queridos pais.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de financiamento concedida ao projeto de pesquisa, processo 2018/04779-6, no período de dezembro de 2018 a janeiro de 2021.



# Sumário

**Agradecimentos**

**Resumo**

**Abstract**

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>18</b>
1.1	História e Filosofia da Ciência no Ensino de Ciências . . . . .	19
1.2	O estabelecimento das Visões Consensuais da Natureza da Ciência . . . . .	22
1.3	Em busca de uma atualização do discurso sobre a Natureza da Ciência: Visões Consensuais de Natureza da Ciência e o relativismo epistêmico . . . . .	28
1.4	Delineando o problema da continuidade do conhecimento científico e seu domínio ontológico . . . . .	34
1.5	O Realismo Científico é desejável ao Ensino de Ciências? Revisitando a querela Construtivismo x Realismo . . . . .	39
1.6	Síntese . . . . .	46
<b>2</b>	<b>Debate sobre o realismo científico e o realismo estrutural</b>	<b>48</b>
2.1	Introdução ao debate Realismo/Antirrealismo . . . . .	48
2.2	Teses do Realismo e alguns de seus contrapontos . . . . .	50
2.2.1	Realismo metafísico (ontológico) . . . . .	50
2.2.2	Realismo Epistemológico . . . . .	52
2.2.3	Realismo Semântico . . . . .	54
2.2.4	Realismo metodológico . . . . .	56
2.2.5	Realismo científico crítico: uma reflexão geral . . . . .	58
2.3	O argumento do Milagre e a Meta Indução Pessimista . . . . .	61

---

2.3.1	A Virada Realista . . . . .	62
2.3.2	O Argumento do Milagre . . . . .	65
2.3.2.1	Refinando o argumento: novidades preditivas . . . . .	69
2.3.2.2	Continuidade teórica e alguns problemas . . . . .	74
2.3.3	O Argumento da Meta-indução pessimista . . . . .	77
2.4	Realismo Estrutural . . . . .	81
2.4.1	John Worrall e o melhor dos dois mundos . . . . .	84
2.4.2	O convencionalismo e relacionismo de Poincaré e o progresso da ciência . . . . .	87
2.4.2.1	O Convencionalismo . . . . .	88
2.4.2.2	O Relacionismo e a objetividade da ciência . . . . .	91
2.4.3	Uma visão estruturalista sobre o progresso da ciência . . . . .	94
2.4.4	Continuidade Estrutural e seus limites . . . . .	95
2.5	Síntese: o que o Realismo Estrutural nos oferece? . . . . .	97
<b>3</b>	<b>Episódio histórico: o coeficiente de arraste de Fresnel</b> . . . . .	<b>101</b>
3.1	Introdução: teorias da luz . . . . .	103
3.2	Aberração estelar e a explicação de James Bradley . . . . .	108
3.3	Telescópio cheio de água . . . . .	114
3.4	Experimento de Arago de 1810 . . . . .	118
3.5	As teorias do éter de Young e Stokes para a aberração estelar . . . . .	123
3.6	O coeficiente de arraste de Fresnel e o éter parcialmente arrastado . . . . .	125
3.7	O experimento de Fizeau . . . . .	134
3.8	“Princípio da relatividade” na ótica: análise teórica do coeficiente de Fresnel . . . . .	136
3.9	O coeficiente de arrastamento e a teoria dos elétrons de Lorentz . . . . .	139
3.9.1	O éter Maxwelliano . . . . .	140
3.9.2	A eletrodinâmica dos corpos em movimento e o movimento do éter . . . . .	143
3.9.3	A teoria dos elétrons de Lorentz . . . . .	146
3.9.4	Crises da visão mecânica de mundo e a visão eletromagnética da natureza . . . . .	155
3.10	A reinterpretação relativística do coeficiente de Fresnel . . . . .	159
3.10.1	A proposição da Teoria da Relatividade Restrita . . . . .	159
3.10.2	A dedução de Max von Laue do coeficiente de arrastamento Fresnel . . . . .	162

---

<b>4</b>	<b>Pesquisa de campo sobre tópicos não-consensuais da Natureza da Ciência na formação inicial de professores</b>	<b>164</b>
4.1	Introdução . . . . .	164
4.2	Campo . . . . .	169
4.2.1	Disciplina de Gravitação . . . . .	169
4.2.2	Exemplificando atividades sobre História da Ciência no Ensino . . . . .	172
4.2.3	A intervenção e as atividades . . . . .	177
4.3	Metodologia e análise de dados . . . . .	184
4.3.1	O referencial metodológico da análise textual discursiva . . . . .	184
4.3.2	Participantes e o <i>Corpus</i> de análise . . . . .	189
4.4	Análise dos dados e Resultados . . . . .	191
4.4.1	Estabelecimento das categorias . . . . .	191
4.4.2	Metatexto . . . . .	196
<b>5</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>212</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>217</b>
<b>A</b>	<b><i>Corpus</i> de análise</b>	<b>II</b>
<b>B</b>	<b>Termo de consentimento livre e esclarecido</b>	<b>XXXIII</b>
<b>C</b>	<b>Aula da Atividade A</b>	<b>XXXVI</b>
<b>D</b>	<b>Aula da Atividade B</b>	<b>XLIX</b>
<b>E</b>	<b>Texto de apoio à Atividade B</b>	<b>LXI</b>

# Resumo

PEREIRA, F. P. C. (2021). **A Ótica dos Corpos em Movimento sob a Visão do Realismo Estrutural: Questões não Consensuais de Natureza da Ciência na Formação de Professores** (Dissertação de Mestrado). Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo.

As discussões teóricas e empíricas realizadas neste trabalho se situam no debate sobre a Natureza da Ciência (NdC) no Ensino de Ciências. Buscamos estudar as contribuições de tópicos não-consensuais da Natureza da Ciência na formação de professores. Os conteúdos das chamadas Visões Consensuais da NdC nos serviram de ponto de partida para a proposição de intervenção didática na formação inicial de professores de Física, na qual foram abordados temas metacientíficos controversos, mais especificamente, questões associadas ao realismo científico. Argumentamos que o ensino de aspectos não-consensuais da NdC pode ser uma ferramenta para se combater tanto visões científicas e “positivistas-ingênuas” sobre a ciência, quanto noções exageradamente relativistas frente ao empreendimento científico. Advogamos que debates acerca do realismo científico tem muito a contribuir na construção de discursos metacientíficos que ponderem tanto o caráter objetivo e realista da ciência, quanto seus aspectos subjetivos e contingentes. Com esse dilema epistemológico em mente, foram estudadas as implicações filosóficas do chamado problema da mudança científica e da ocorrência de revoluções científicas ao longo do desenvolvimento histórico da Física. Com o emprego do referencial teórico do Realismo Estrutural, buscamos identificar aspectos de continuidade e descontinuidade entre teorias sucessivas de uma determinada área da Física. Esse referencial nos permite distinguir continuidades no domínio estrutural e matemático de uma teoria, ao passo que acusa rupturas no domínio ontológico. A fim de tornar menos abstratas as discussões filosóficas mobilizadas nesta dissertação, realizamos o estudo de um episódio histórico a respeito do desenvolvimento da ótica dos corpos em movimento enquanto antecedente histórico da proposição da Relatividade Restrita. Nele, mostramos que a teoria da arrastamento parcial do éter, formulada por

Augustin Fresnel em 1818, representa um elo de continuidade estrutural entre a ótica do século XIX e Teoria da Relatividade, apesar da referência teórica ao éter não ter se mantido ao longo da revolução einsteiniana. Tais estudos serviram de base para a intervenção didática realizada em uma disciplina de enfoque histórico-filosófico. Realizada a análise dos dados coletados, concluímos que os alunos foram capazes de se apropriar das querelas filosóficas centrais desta pesquisa. Constatamos que os estudantes se posicionaram de maneira diversa a respeito do estatuto cognitivo e ontológico da ciência, e dos elementos de continuidade e descontinuidade do desenvolvimento científico.

**Palavras-chave:** ensino de ciências; história e filosofia da ciência; natureza da ciência; ótica; realismo estrutural.

# Abstract

PEREIRA, F. P. C. (2021). **The Optics of Moving Bodies under the View of Structural Realism: Non-consensual Issues of Nature of Science in Teacher Training** (Dissertação de Mestrado). Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo.

The theoretical and empirical discussions carried out in this work are situated in the debate on the Nature of Science (NOS) in Science Teaching. We seek to study the contributions of non-consensual topics from the Nature of Science in teacher education. The contents of the so-called Consensual Views of the NOS served as a starting point for the proposition of a didactic intervention in the initial training of physics teachers, in which controversial metascientific topics were addressed. More specifically, issues associated with scientific realism. We argue that the teaching of non-consensual aspects of NOS may be a tool to combat both scientific and “naive-positivist” views about science, as well as exaggeratedly relativistic notions regarding the scientific enterprise. We advocate that debates about scientific realism have a lot to contribute to the construction of metascientific discourses that consider both the objective and realistic character of science, as well as its subjective and contingent aspects. With this epistemological dilemma in mind, we studied the philosophical implications of the so-called problem of scientific change and the occurrence of scientific revolutions throughout the historical development of Physics. Using the theoretical framework of Structural Realism, we sought to identify aspects of continuity and discontinuity between successive theories in a given area of Physics. This framework allows us to distinguish continuities in the structural and mathematical domain of a theory, while it reveals ruptures in its ontological domain. In order to make the philosophical discussions developed in this dissertation less abstract, we carried out the study of a historical episode regarding the development of the optics of bodies in motion as a historical antecedent of the Special Relativity proposition. In it, we show that the theory of partial ether entrainment, formulated by Augustin Fresnel in 1818, represents a link of structural continuity between the



19th century optics and the Theory of Relativity, despite the theoretical reference to the ether which has not been maintained throughout the Einsteinian revolution. Such studies served as a basis for the didactic intervention carried out in a discipline with a historical-philosophical approach. After analyzing the collected data, we concluded that the students were able to seize the central philosophical quarrels of this research. We found that the students took different stands regarding the cognitive and ontological status of science, and the elements of continuity and discontinuity of scientific development.

**Keywords:** science teaching; history and philosophy of science; nature of science; optics; structural realism.

# Capítulo 1

## Introdução

Há décadas, pesquisadores e educadores envolvidos com o Ensino de Ciências diagnosticam problemas educacionais que evidenciam uma crise acerca do sucesso em atingir seus objetivos educacionais. A necessidade de mudanças nas abordagens, estratégias e metodologias de ensino abriu caminho para uma série de linhas de pesquisa que buscam dar respostas a essa crise. Dentre elas, a inserção da História, Filosofia e, mais recentemente, Sociologia da Ciência se mostrou uma profícua área de investigação, sendo reconhecida como uma abordagem com potencial de renovação educacional. Conteúdos metacientíficos são comumente encarados como socialmente relevantes e fazem avançar debates a respeito do ensino *sobre as ciências*.

Contudo, o ensino com abordagem histórico-filosófica é alvo de importantes disputas e dúvidas na literatura, principalmente quando se trata do ensino de tópicos controversos sobre a Natureza da Ciência. A falta de consenso entre especialistas de disciplinas metacientíficas, que permeia esses tópicos, traz algum grau de desconfiança, ou insegurança, a respeito da possibilidade e desejabilidade de se abordar tais temas em sala de aula.

Esta dissertação busca estudar um desses temas controversos sobre a Natureza da Ciência, a saber, o debate acerca do realismo científico. Essa temática foi tratada por meio de um estudo de um episódio histórico da Física associado ao papel do éter nas pesquisas sobre a ótica dos corpos em movimento, bem como seu eventual abandono com o advento da Teoria da Relatividade Restrita. Em um segundo momento, realizamos uma pesquisa empírica na qual investigamos de que maneira alunos de Licenciatura em Física compreendiam o episódio histórico sob a ótica de questões epistemológicas associadas ao realismo científico e ao abandono de entidades teóricas. Em outras palavras, nosso objetivo foi investigar como os alunos se posicionavam frente a debates sensíveis ao realismo, por meio do episódio histórico em questão.

## 1.1 História e Filosofia da Ciência no Ensino de Ciências

A relação dos alunos nos níveis fundamental e médio com o ensino e aprendizagem das Ciências Naturais é notavelmente marcada pela apatia, falta de interesse e de identificação cultural, tornando, em geral, vazio o ensino dessas disciplinas (BAGDONAS et al, 2014; GURGEL & WATANABE, 2017). Há décadas tais sintomas são amplamente relatados e denunciados tanto por professores quanto por pesquisadores da área de ensino, mostrando que grandes mudanças nas práticas e nas ideologias – explícitas e implícitas – no Ensino de Ciências são tão necessárias quanto desafiadoras. Docentes e investigadores procuram atacar os problemas e propor soluções por diversos flancos: Formação de Professores, Divulgação Científica, Produção de Materiais Didáticos, Ensino Investigativo, Inserção da História e Filosofia da Ciência no Ensino, entre muitos outros. Como será justificado a seguir, a presente pesquisa terá este último como linha condutora.

Não pretendemos argumentar que a inserção da história, da filosofia e da sociologia da ciência no ensino seja a panaceia para a profunda crise em que este se encontra, como já nos alertaram Zanetic (1989) e Matthews (1992). Entretanto, a adoção dessa abordagem oferece interessantes potencialidades para o ensino das disciplinas de ciências naturais, como comentaremos brevemente. Seus defensores advogam que o conhecimento das origens e desenvolvimento dos conceitos e da cultura científica é parte essencial de sua aprendizagem (LEDERMAN, 2007; PÉREZ, et. al, 2001). Como sinaliza o historiador da ciência Roberto Martins (2006), os livros-texto e livros didáticos - elementos importantes na constituição e perpetuação da imagem de ciência de professores e alunos - ocupam-se em expor os resultados científicos, como os conceitos que hoje são aceitos pela comunidade científica, as explicações de fenômenos naturais segundo as teorias consolidadas, os modelos explicativos melhor estabelecidos pela ciência atual, etc. Não surpreendentemente, professores, de nível básico e superior tendem a utilizar um tipo de “retórica de conclusões”, limitada a uma apresentação dos produtos da pesquisa científica, sem terem na devida conta os processos de construção do conhecimento” (EL-HANI, 2006, p.3). Em outras palavras, podemos afirmar que, de maneira geral, são tratados apenas os aspectos da ciência que se localizam na ponta de uma longa e complexa cadeia que representa o seu desenvolvimento, deixando de fora questões e aspectos pertinentes à construção de um entendimento mais profundo do impacto das ciências naturais no conhecimento humano, sua dinâmica própria, seu desenvolvimento histórico, social e filosófico, suas relações mais amplas com o mundo social, suas metodologias específicas, suas dimensões éticas, a maneira como se relaciona com

outras áreas do conhecimento, entre outras inquietações concernentes ao empreendimento científico. História e a Filosofia da Ciência (HFC) complexifica tanto o caráter da ciência como produto, i.e., sua síntese ou seu estado atual solidificado como paradigma científico, quanto seu caráter processual, i.e., seu desenvolvimento histórico. (ROBILOTTA, 1988).

Michael Matthews (1992, p. 12) alega que a abordagem histórico-filosófica pode ser o caminho para responder questões importantes à crise do ensino de ciências no nível básico da educação acima referida provendo: a humanização das ciências naturais as conectando com dimensões “éticas, pessoais, culturais e políticas”; aulas mais desafiadora de maneira a estimular o pensamento crítico; maior compreensão dos assuntos da ciência; possível superação da falta de significado associado às fórmulas e equações que são “recitadas” no contexto sala de aula, porém pouco refletindo sobre seu significado mais profundo e sua conexão com os edifícios conceituais que formam o corpo do conhecimento científico. Já no contexto da formação de professores, pode-se desenvolver uma imagem mais rica e autêntica da epistemologia da ciência. Concordamos com Matthews que o letramento histórico-filosófico dos professores em formação pode complexificar e tornar mais aberta sua concepção de ciência, bem como suas dinâmicas de desenvolvimento e suas relações com o mundo real, estimulando a valorização do contraditório, inerente ao pensamento filosófico, histórico e científico.

Podemos dizer que há certo consenso entre a comunidade de pesquisadores em Ensino de Ciências (EC) sobre as potencialidades positivas da abordagem histórico-filosófica e de estudos metacientíficos tanto no nível básico quanto superior. Investigações sobre sua inserção e implicações no ensino se estabeleceu como um dos grandes ramos da pesquisa em EC. Um dos motivos desse consenso são as persistências de concepções distorcidas e ingênuas de professores e alunos sobre a ciência e sua construção, como aquelas revisadas e sintetizadas por Gil-Pérez e colaboradores (2001), Lederman (1992) e McComas (1998).

Ao reduzir o ensino de ciências nos cursos universitários à “apresentação de conceitos previamente elaborados” (PÉREZ, et. al, 2001), se constrói implícita e acriticamente um tipo de epistemologia espontânea frente à construção das ciências naturais. Esta epistemologia tacitamente recebida pelo professor em formação se refletirá posteriormente em sua prática em sala de aula, como sugerem Gil-Pérez e colaboradores (2001).

Com esta problemática em vista, os defensores de abordagens histórico-filosóficas no ensino apontam para a superação das visões ingênuas mediante adequada apropriação dos conhecimentos metacientíficos em questão. Contudo, a concepção do que seriam tais apropriações

adequadas por parte de professores e alunos é muito sensível ao que se concebe como um retrato fidedigno do desenvolvimento e da atividade científica. Ou seja, as questões que se colocam são: *o que é a ciência, como ela se desenvolve e como estes conteúdos devem guiar o discurso sobre a natureza da ciência no ensino?* Décadas de estudos e debates sobre a natureza da ciência e como ela se desenvolve resultaram em um mosaico de concepções e teorias do conhecimento científico. Podemos nos referir a uma grande variedade de correntes e tradições filosóficas que se estabeleceram na literatura ao longo do século passado, desde os positivistas lógicos do Círculo de Viena; o racionalismo crítico de Gaston Bachelard; o historicismo de Thomas Kuhn e Paul Feyerabend; o Programa Forte da sociologia do conhecimento, representado por David Bloor, entre tantas outras correntes e autores bastante reconhecidos na área. A pluralidade de visões e abordagens histórico-filosóficas e sociológicas nos mostra que a imagem da ciência é um tema em constante disputa entre concepções muitas vezes mutuamente incompatíveis. Desse modo, questões sobre a natureza da ciência, fundamentais caso se intente mudanças do discurso científico escolar, são altamente controversas e de certa maneira perenes.

Um dos desafios que se empreende no campo da História e Filosofia da Ciência no ensino é justamente a construção de uma visão internamente coerente e fidedigna da ciência e seu desenvolvimento histórico que dê bases a uma educação científica filosoficamente informada e que combata as concepções ingênuas associadas à indisciplinada epistemologia recebida. Como será comentado na próxima seção, esses esforços culminaram no estabelecimento das listas das Visões Consensuais de Natureza da Ciências (LEDERMAN, 2002, 2007; MCCOMAS, 1998, 2008), que consistem na enunciação de uma lista de princípios razoavelmente pacificados sobre aspectos da ciência e seu desenvolvimento que formaria um conjunto de conteúdos metacientíficos essenciais à educação científica escolar.

Nas próximas seções, discutiremos o estabelecimento dessas Visões Consensuais, tendo em vista algumas problemáticas às quais eram endereçadas, em particular o combate às visões ingênuas da epistemologia recebida. Em seguida faremos menção a algumas fragilidades dessas listas de princípios e debateremos a necessidade de se atualizar os discursos sobre a Natureza da Ciência em face das atuais problemáticas relativas à desvalorização da ciência e a banalização de visões relativistas à ela associada. Segundo argumentamos, os conteúdos de Natureza da Ciência devem fazer frente tanto às demandas que motivaram a emergência das Visões Consensuais, quanto ao relativismo exagerado que tem ganhado força atualmente.

## 1.2 O estabelecimento das Visões Consensuais da Natureza da Ciência

Estudos e debates sobre a NdC costumam se referir às dimensões histórico-epistemológicas e sociológicas das ciências naturais, suas implicações no Ensino de Ciências (EC) e tendem a jogar luz sobre os conhecimentos *sobre as ciências*, com o objetivo de tornar mais rico, crítico e significativo os conhecimentos específicos das ciências. Pode-se traçar as origens das defesas do ensino do “método científico e dos processos da ciência” no início do século XX, e do ensino da “investigação científica” aos meados do mesmo século (LEDERMAN, 1992, p. 331-2), como pôde-se observar em projetos de ensino de ciências que marcaram a época, como o PSSC (Physical Science Study Committee).

Entre os anos de 1950 e 1960 se iniciou uma tradição de pesquisa que objetivava avaliar as visões e entendimentos acerca da natureza do conhecimento científico de professores e alunos de ciências naturais por meio de testes e questionários. Em detalhados estudos de revisão, Lederman (1992; 2007) sintetizou os resultados gerais de mais de vinte testes e questionários, desde os mais antigos até os mais recentes, dentre estes as várias versões de suas propostas com colaboradores, os Views of Nature of Science (VNOS). Analisando de maneira retrospectiva, esta tradição de pesquisa buscou: “(a) avaliar as concepções de estudantes sobre a natureza da ciência; (b) desenvolver, usar e avaliar currículos feitos para ‘melhorar’ as concepções dos estudantes; (c) avaliar e tentar ‘melhorar’ as concepções de natureza da ciência dos professores; (d) identificar as relações entre as concepções dos professores, sua prática em sala de aula e as concepções dos estudantes.” (LEDERMAN, 1992, p. 332).

Estas frentes de avaliações e pesquisas foram importantes para estabelecer resultados que orientaram novas pesquisas e tomadas de decisões associadas a políticas curriculares, bem como tentativas de estabelecer conjuntos das posteriormente denominadas Visões Consensuais de Natureza da Ciência. A frente (d) revelou dois aspectos importantes sobre o nível de instrução histórico-filosófica dos professores e suas práticas em sala de aula. A primeira é mais imediata: não é possível que professores ensinem sobre a NdC com poucos conhecimentos sobre a área. Para que o ensino desses conteúdos seja exequível é imprescindível que os professores tenham formação mínima em história, filosofia e sociologia dos conhecimentos científicos, seja por meio da formação inicial ou continuada. A segunda é que não há relação direta entre a concepção de NdC dos professores e suas práticas em sala de aula, ainda que estes professores detivessem concepções adequadas sobre a NdC, não necessariamente as mesmas se refletiam

em suas práticas. Por mais que uma instrução metacientífica adequada interfira no discurso filosófico implícito à retórica do docente (LEDERMAN, 2007, p. 858-9, citando MUNBY, 1976) é necessário que o ensino dos conteúdos metacientíficos seja realizado explicitamente. Isso significa que não basta que os docentes detenham este conhecimento. A apreensão desse pelos alunos não emerge naturalmente do discurso, mas só é estimulado quando a NdC é tratada de maneira explícita e contextualizada. Estes dois aspectos, sugere Lederman, deixaram clara a necessidade de tornar a Natureza da Ciência um conteúdo integrante dos currículos de ciências, com o mesmo status dos conhecimentos específicos de cada disciplina.

Outra classe de resultados que contribuiu de maneira essencial para posteriores propostas de VCNdC está associada ao mapeamento de concepções e visões sobre a natureza e desenvolvimento do conhecimento científico de alunos e professores de ciências. A maioria das pesquisas constataram a presença de concepções consideradas inadequadas e ingênuas, muitas delas recorrentes e algumas correlacionadas entre si: supervalorização das dimensões empíricas das ciências, considerando seu corpo de conhecimento como uma coleção de fatos, observações ou explicações necessariamente verdadeiras sobre a natureza; o desenvolvimento científico seria essencialmente cumulativo e fruto de um método universal a ser empregado passo a passo; teorias científicas seriam retratos fiéis da realidade; indistinguibilidade entre observações dos fenômenos e explicações sobre os mesmos, como se as teorias e explicações indutivas emergissem necessariamente daquelas observações.

Esta tradição de pesquisa notabilizou a persistências de visões ingênuas nas dimensões metodológicas (observação ou experimentação mediados por um método rígido resulta em conhecimento confiável); epistemológico (o corpo de conhecimento da ciência é a acumulação de fatos verdadeiros); e ontológicos (teorias são “espelhos” da realidade externa). Mais por conveniência do que por precisão conceitual vamos batizar este conjunto de visões como “positivismo ingênuo”, devido ao exagerado peso atribuído à dimensão empírica e cumulativa da ciência.

Estes entendimentos metacientíficos próximos a este tipo de positivismo caricato foram denunciados à exaustão na literatura sobre Natureza da Ciência e Ensino de Ciências. Podemos, por exemplo, identificar muitas delas no conhecido artigo “Dez mitos da Ciência” de McComas (1996). O extenso trabalho de revisão feito por Gil Pérez e colaboradores (2001) elencam em detalhes as mais frequentes e comentadas “visões deformadas” sobre a ciência reportadas na literatura, acusando grande concordância com os resultados sintetizados por Lederman (2007; 1992).

- Concepção empírico-indutivista e atórica da ciência. Segundo os autores uma das visões ingênuas mais estudadas e comentadas na literatura, consiste na concepção de que as observações e experiências científicas são neutras e livres de hipóteses ou suposições teóricas. Atribui excessiva importância à atividade empírica, como se essa consistisse em uma série de “descobertas” que se acumulam ao longo de um processo de contínua evolução.
- Visão de que a ciência é feita, em termos práticos, a partir de um inflexível e infalível “método científico”. Este seria definido por etapas rígidas e algorítmicas, que garantiriam o sucesso, o rigor quantitativo e a infalibilidade de conclusões ou descobertas científicas. Se conduzidas de maneira mecânica, os resultados seriam aporéticos e suas conclusões estariam acima da dúvida ou de reconsideração.
- Muito associada às duas anteriores, emerge uma visão aporética e ahistórica da ciência. Se o “método científico” é infalível e suas conclusões indubitáveis, o conhecimento científico se torna fechado e dogmático. Essa distorção é frequentemente reforçada em situações de ensino, em que o conhecimento científico é apresentado omitindo os problemas que motivaram sua construção. Dessa maneira, as teorias, leis e modelos científicos se assemelhariam a respostas sem perguntas, sem que algo as justifique. Tal apresentação omite o caráter falível e limitado da ciência.
- Visão exclusivamente analítica dos campos dos saberes científicos, que valoriza demasiadamente a divisão e o caráter parcelar dos estudos científicos, em detrimento dos esforços de unificação entre diferentes domínios (os autores citam o exemplo da mecânica newtoniana que unificou as mecânicas terrestres e celestes). Esta visão também ignora a existência de problemas que se situam na borda entre diferentes áreas das ciências naturais, chamado também pelos autores de “problemas-ponte”.
- Visão de crescimento exclusivamente acumulativo, configurada, de certa forma, como uma consequência das duas primeiras visões comentadas. Esta concepção ignora os momentos de crises, revisões, reformulações e, eventualmente, revoluções pelas quais a ciência passa. Esta visão simplista da evolução dos conhecimentos ignora também os frequentes confrontos entre teorias científicas, as controvérsias científicas e a falibilidade das ciências.



- A visão individualista e elitizada é uma das mais comentadas na literatura. Esta considera a ciência como resultado do trabalho individual de alguns poucos “gênios isolados”, desconsiderando o caráter colaborativo entre cientistas e comunidades e equipes científicas. Do ponto de vista epistemológico e social, uma das consequências é minar a compreensão da ciência como um empreendimento humano construído socialmente e coletivamente. Um dos problemas dessa distorção para o ensino de ciências é transmitir, involuntariamente, às alunas e alunos uma sensação de pessimismo e exclusão, uma vez que reserva o trabalho e entendimento científico mais profundo a uma parcela privilegiada e especialmente dotada, geralmente identificada como masculina e branca.
- Por último, os autores se referem à visão deformada que propaga uma imagem descontextualizada e socialmente neutra da ciência, como se esta fosse desenvolvida em uma “torre de marfim”, ignorando suas relações com a sociedade e a tecnologia, ao invés de ser construída por cientistas inserido de um contexto histórico, social, econômico e geopolítico.

A notável recorrência das mesmas visões ingênuas sobre a ciência sugeriam que seria possível formar um discurso metacientífico consensual capaz de corrigir tais posições inadequadas, baseados em um conjunto de conteúdos razoavelmente pacificados entre autores da literatura especializada. Uma das mais comentadas listas de Visões Consensuais de Natureza da Ciência (VCNdC) foi proposta por Lederman e colaboradores (2002) e é sintetizada a seguir:

- **A natureza empírica do conhecimento científico:** a ciência é, pelo menos parcialmente, baseada em observações do mundo natural, e a validade ou falsidade de asserções científicas está em última instância amparada nas observações científicas. As observações, entretanto, não são diretas. É importante para a ciência a distinção entre observação e inferência. As observações são diretamente acessíveis aos sentidos, ou à extensão dos sentidos (aparatos experimentais e instrumentos de medidas). Já as inferências são asserções não diretamente acessíveis aos mesmos.
- **Teorias e leis científicas:** as teorias científicas são sistemas conceituais de explicações de observações, comumente baseadas em um conjunto de suposições ou axiomas. Assim, teorias não podem ser diretamente testadas. O acordo entre previsões teóricas e evidências empíricas não atestam, então, a validade das teorias, mas sim seu nível de confiabilidade. Leis científicas são, em geral, descrições de regularidades entre fenômenos observados.

Estas considerações se opõem à visão de que teorias podem se tornar leis caso sejam suficientemente comprovadas por evidências.

- **Criatividade e imaginação do conhecimento científico:** embora o conhecimento científico dependa decisivamente de observações e experiências empíricas, envolve também a imaginação e criatividade dos cientistas. A invenção de conceitos e modelos científicos é uma parte importante da ciência.
- **O conhecimento científico é carregado de teoria:** Comprometimentos teóricos, crenças e conhecimentos prévios influenciam o trabalho dos cientistas, pois estes elementos são determinantes e diretivos na construção de problemas e investigações científicas.
- **O conhecimento científico é social e culturalmente situado:** a ciência é uma atividade praticada no contexto de uma cultura humana mais ampla que que influencia e é por ela influenciada. Entre seus elementos figuram estruturas de poder, fatores socioeconômicos, religião, filosofia, entre outros.
- **O mito do método científico:** não há qualquer método que conduza o cientistas a conhecimentos infalíveis. O conhecimento científico não é formulado por uma sequência de etapas bem definidas que garantem indutivamente a certeza desse corpo de conhecimento.
- **O caráter tentativo do conhecimento científico:** a ciência está sempre sujeita a mudanças e não é um corpo de conhecimento absoluto e infalível. É possível que explicações, teorias e afirmações científicas mudem à luz de novas evidências.

Semelhantemente, McComas, Almazroa e Clough (1998) elencaram oito documentos com recomendações curriculares oficiais sobre o ensino de NdC e buscaram reconhecer nestes documentos uma série de aspectos convergentes sobre o empreendimento científico. Segundo os autores, a análise dos documentos acusavam tais aspectos consensuais sobre a NdC:

- O conhecimento científico é durável, mas tem um caráter tentativo.
- O conhecimento científico depende fortemente, mas não inteiramente, de observações, evidências experimentais, argumentos racionais e ceticismo.
- Não há maneira única de se fazer ciência.

- A ciência é uma tentativa de explicação dos fenômenos naturais.
- Leis e teorias desempenham papéis diferentes na ciência, então, os estudantes devem notar que teorias não se tornam leis mesmo com evidências adicionais.
- Pessoas de todas as culturas contribuem para a ciência.
- Novos conhecimentos deve ser relatados clara e abertamente.
- Cientistas precisam manter registros acurados, revisão de pares e replicabilidade.
- Observações são carregadas de teoria.
- A história da ciência apresenta tanto caráter evolucionário quanto revolucionário.
- A ciência é parte de tradições sociais e culturais.
- Ciência e tecnologia se impactam mutuamente.
- As ideias científicas são afetadas pelo meio social e histórico.

A uniformidade dos discursos metacientíficos adjacentes às listas de Visões Consensuais é explicada pela constância dos problemas que motivaram suas elaborações. Os repetidos diagnósticos sobre as visões espontâneas de ciência em professores e alunos, implicitamente estimularam a noção que estas concepções inadequadas seriam, portanto, constantes do tempo e, logo, ahistóricas. Em outras palavras, se consolidou que o problema a ser combatido, por não mostrar um caráter dinâmico no tempo, seria devidamente corrigido com um arsenal estanque e também constante de soluções. No entanto, observamos que nossos tempos fizeram emergir novas visões inadequadas sobre a ciência na opinião pública, dessa vez não associadas ao “positivismo ingênuo”, mas a exageradas relativizações do saber científico ou ao total descrédito e ceticismo frente aos métodos e resultados da ciência.

Reconhecendo a urgência de se combater estas novas visões inadequadas, percebemos a necessidade de dinamizar o que entendemos como visões adequadas, reformando-as ou adicionando ponderações que nos permitam fazer frente às atuais necessidades educacionais, políticas e sociais. Embora as antigas visões deformadas ainda persistam, é necessário o debate e proposições de novos referenciais epistemológicos que permitam opor-nos ao que chamaremos de “relativismo ingênuo”, que tem ganhado força atualmente.

### 1.3 Em busca de uma atualização do discurso sobre a Natureza da Ciência: Visões Consensuais de Natureza da Ciência e o relativismo epistêmico

As listas das Visões Consensuais, por mais que representem contribuições importantes aos estudos de Natureza da Ciência no ensino, são alvos de constantes críticas motivadas tanto por disputas acerca de seus conteúdos quanto por fragilidades de sua forma. Comentaremos brevemente as primeiras e nos ateremos mais às segundas.

Uma das mais relevantes críticas ao conteúdo das VCNdC foi formulada por Irzik e Nola (2011) ao sugerirem a abordagem de *semelhança de família* para uma definição mais rica e dinâmica de ciência, inspirada no conceito criado por Wittgenstein no contexto da filosofia da linguagem. Segundo os autores, seria impossível caracterizar a atividade científica por meio de uma lista de características fazendo justiça às mais diversas áreas e disciplinas que a compõe. “A ideia básica da semelhança de família reside no fato de que membros de uma família podem se parecer uns com outros em alguns aspectos, mas não em outros” (ibid. 595). Assim, a caracterização por semelhança de família permitiria identificar a unicidade da ciência em meio a sua multiplicidade. Não será nosso objetivo expor em detalhes como este modelo realiza tal tarefa, mas nos interessa frisar uma das fragilidades dos conteúdos das VCNdC indicadas pelos autores. Eles apontam que Lederman deixa deliberadamente de lado os processos, valores e métodos de investigação científica, alegando que a NdC se refere apenas aos fatores epistemológicos subjacentes à atividade científica (ibid, p. 536). As metodologias para criação de hipóteses, modelos e teorias, bem como as regras metodológicas de testagem de hipóteses, comparação e escolha de teorias são, segundo defendem os autores, aspectos cruciais que caracterizam a ciência como um empreendimento de investigação crítica, sem as quais é impossível explicar sua objetividade (ibid. 601-2).

Ainda mais comuns na literatura são críticas acerca da forma como os conteúdos de NdC são apresentados, a saber, no formato de listas de tenets (princípios, em uma tradução direta), ou seja, um conjunto de sentenças declarativas. Como comentaremos a seguir, as limitações na forma escolhida para expressar estas VC implicam também em fragilidades acerca de seu conteúdo.

Matthews (2012, p. 11) aponta que, a despeito das intenções de seus formuladores, a lista pode se tornar uma espécie de dogma ou mantra a ser ensinado nas salas de aula, ao invés de serem um meio para atingir um pensamento crítico e próprio sobre a ciência por parte

dos alunos e professores, que sempre foi, em primeiro lugar, o objetivo da inserção das História e Filosofia no Ensino de Ciências e no currículos. Buscando reforçar a importância dessa abordagem, Matthews argumenta que os tópicos da VC precisam ser histórica e filosoficamente refinados para que seu ensino seja desejável e útil a professores e estudantes, uma vez que a forma declarativa dos tenets oculta muitos detalhes e sutilezas. Dessa maneira, cada um deles não deveria ser um conteúdo por si só, mas sim gerador de toda uma classe de discussões epistemológicas ou sociológicas. Para além dos tópicos contemplados nas listas de VCs, o autor sinaliza para a importância do debate de outras características da ciência: explicações científicas; escolha de teorias e racionalidade; matematização; idealização; modelos; valores e assuntos sociocientíficos; feminismo; realismo científico e construtivismo, entre outros.

A necessidade de aprofundamento acerca dos temas levantados pelas Visões Consensuais e o risco de supersimplificação de assuntos metacientíficos complexos estimulou Clough (2007) a elaborar uma abordagem em forma de “questões ao invés de princípios”, favorecendo tratamentos mais detalhados e refinados. Argumentando em uma linha semelhante à de Matthews, o autor afirma que uma lista de ideias chave sobre a ciência pode facilmente ser distorcida por pesquisadores, professores e alunos. Pensando em uma aprendizagem mais problematizadora e potencialmente mais crítica sobre a Natureza da Ciência, o autor propõe que estas questões sejam objeto de investigação e debate ao invés de uma transmissão de conteúdos estanques. Na formulação de Clough, o princípio “O conhecimento científico é durável, mas tem um caráter tentativo”, que figura na lista de McCommas, p. ex., ganharia a formulação: “Em que sentido o conhecimento científico é durável? Em que sentido ele é tentativo?”. É razoável esperar que este tipo de abordagem facilite a emergência de nuances sobre o desenvolvimento e formulação da ciência e nos permitiria levantar uma série de questões correlatas a este tópico. Tomando o exemplo anterior, poderia-se questionar: uma vez validada pelos pares, uma explicação científica permanece sempre verdadeira?, o que é necessário ou pode acontecer para que algum tipo de resultado ou conclusão científica seja revista e posta em questão?, todo o conhecimento científico está sujeito a revisão?; indagações dessa natureza podem ser formuladas à exaustão, partindo de qualquer um dos *tenets*.

Com o intuito de propor uma alternativa ao formato declarativo das VC's, Martins (2015) elaborou uma interessante abordagem orientada por temas e questões. Nesta proposta, o autor divide aspectos da NdC em dois grandes eixos temáticos: um sociológico e histórico, e outro epistemológico (este último dividido em outros três sub-eixos: origens do conhecimento, méto-

dos e procedimentos e natureza do conhecimento produzido). Cada um desses eixos é composto por temas geradores de questões abertas. No eixo histórico e sociológico, p. ex., cabem temas como: intersubjetividade; questões morais, éticas e políticas; ciência e tecnologia, para citar apenas alguns. Cada um desses temas podem ser explorados por uma série de questões. No caso do tema *intersubjetividade*: “Há espaço para a subjetividade na ciência? É possível afastar a subjetividade do conhecimento construído pela ciência? Que procedimentos a comunidade científica utiliza para evitar isso? Tais procedimentos foram sempre os mesmos ao longo da história? Como evitar vieses pessoais? Conhecimento coletivo é conhecimento objetivo?” (ibid. p.721). A lista de temas ou de questões para cada tema não pretende ser exaustiva. Novos tópicos podem ser adicionados aos eixos temáticos, e novas questões formuladas para cada tema, deixando em aberto os temas relevantes a serem tratados em diferentes contextos educacionais. A principal contribuição deste trabalho, pensamos, é uma nova maneira de organizar e abordar os conteúdos e objetos de investigação de NdC, seja em sala de aula, seja em discussões curriculares.

Nenhum desses autores negam a importância do estabelecimento das listas de visões consensuais, ou diminui a produção acadêmica e os pesquisadores nelas envolvidos. Muito pelo contrário, a formulação dessas listas foram o ponto de partida para estas discussões, além de facilitarem a introdução de discussões metacientíficas no ensino e nos currículos. O que é problematizado, em geral, é como a forma de apresentação e investigação desses conteúdos pode refletir na qualidade de seu ensino. Para além disso, também estão em jogo as possíveis interpretações das VCNdC e as visões de ciência que elas podem estimular, seja explícita ou implicitamente, intencionalmente ou não. Comentamos anteriormente que estes estudos objetivavam combater visões ingênuas sobre a ciência, e nos referimos a um conjunto delas como visões positivistas ingênuas. Entretanto, é possível que novas visões pouco ponderadas emergam a partir do ensino de NdC e das VCs, a saber, posições associadas a formas de relativismo epistêmico, o que tem sido motivo de alerta de alguns pesquisadores. Forato, Pietrocola e Martins (2011) apontaram como uns dos desafios associados ao ensino de História e Filosofia da Ciência não fomentar o relativismo e a percepção inadequada da falta de parâmetros objetivos na construção do conhecimento científico. O combate a visões empírico-indutivistas pode ser facilitado pela apresentação de conteúdos históricos, tomando o cuidado de não se desvalorizar desmedidamente a dimensão empírica, a racionalidade, incentivando o ceticismo excessivo. A busca de um equilíbrio frente a este dilema em sala de aula é relatado por Clough (ibid):

Os princípios da Natureza da Ciência podem ser facilmente mal interpretados e abusados. Frequentemente estudantes enxergam as coisas em 'preto ou branco'. Por exemplo, quando me referia sobre o caráter histórico e tentativo da ciência anos atrás enquanto ensinava no ensino médio [high school], meus estudantes pulavam de um extremo de verem a ciência como conhecimento absolutamente verdadeiro para outro extremo de um conhecimento não confiável. Muito esforço foi necessário para movê-los a uma posição moderada.

Todo conhecimento altamente especializado precisa passar por processos de generalizações e simplificações para que possa se tornar um conhecimento escolar. É o que sinalizam McComas e Almazroa ao recordar que a NdC deva ser direcionada a estudantes do ensino básico, e não a futuros filósofos da ciência (ibid, p.512), justificando a busca pelas Visões Consensuais. No entanto, simplificações excessivas sem debates e aprofundamentos ulteriores podem gerar resultados adversos, como relata Clough.

A respeito do mesmo *tenet* citado por Clough, Allchin (2011, p.528) também tece comentários sobre a incompletude desse tópico ao ser expressado de maneira declarativa, afirmando que se oferece o risco de se desacreditar em consensos científicos particularmente importantes, como no caso das ciências climáticas e do já estabelecido entendimento da importância de fatores antropogênicos nas causas das mudanças climáticas. Evitar este tipo de risco é uma tarefa especialmente relevante em nossos tempos, nos quais a descrença com o discurso científico parece pulverizado na opinião pública, e além disso ações a fim de reduzir os danos ambientais da atuação humana no planeta se tornam cada vez mais urgentes.

Preocupação semelhante é externada por Martins (ibid, 712-8). Segundo o autor, as visões consensuais flertam com posicionamentos relativistas moderados, embora os *tenet* não sejam exclusivamente coerentes com alguma posição filosófica específica. Em outras palavras, os princípios eleitos como consensuais por aqueles autores, ao serem conjugados não nos levam a adoção de nenhum tipo específico de relativismo, ou de qualquer outra posição filosófica bem definida e monolítica. Mas seu conteúdo sugere posições mais próximas ao relativismo, seja ele epistêmico, metodológico ou ontológico, do que as diagnosticadas “visões ingênuas”. Ora, neste sentido pode-se argumentar que as Visões Consensuais são bem sucedidas, pois tem o potencial de diluir crenças mais próximas a versões caricatas de positivismo ou do realismo ingênuo ao relativizar, p. ex., a existência de um método científico rígido ou o caráter exclusivamente objetivo da atividade científica. No entanto, parafraseando Bachelard (1996 [1938], p.

10) , pode existir uma imensa distância entre o conteúdo ensinado e o conteúdo aprendido. O objetivo do ou da docente pode ser mirar no relativismo moderado intentado pelos proponentes das listas, mas a ideia compreendida pelos alunos pode ser muito diferente, flertando com posições relativistas extremadas, ou, como chamaremos, *relativismo ingênuo*.

Neste sentido, é possível identificar possíveis concepções exageradamente relativistas que podem ser estimuladas por asserções das Visões Consensuais. Tomemos um exemplo.

Afirmar que não existe o chamado método científico, ou que não é possível garantir o sucesso da ciência por um único método são afirmações praticamente de lugar comum entre filósofos ou historiadores da ciência, ou para cientistas e professores de ciências filosoficamente instruídos. O aprendizado adequado desse aspecto da ciência é desejável para uma educação básica mais crítica, mas a mera transmissão desse conhecimento pode ser enganosa para os alunos, podendo levá-los a pensar que não há quaisquer métodos característicos das ciências que permitam a construção de conhecimentos que sejam em boa medida objetivos. Pode-se minar também a ideia de que atividade científica não goza de sérios critérios de avaliação e validação, criando a percepção de “qualquer coisa vale”. Em suma, é justo buscar o entendimento de que não há o método científico, desde que busque também entender melhor quais as limitações e potencialidades de métodos recorrentes nas ciências, como métodos hipotéticos-dedutivos, métodos indutivos (no caso de produção de hipóteses, modelos, teorias, etc), ou como isolamento de variáveis em um experimento, análises de dados, simulações computacionais, etc (no caso de checagem de hipóteses, testes de adequação de modelos, e investigações empíricas de maneira mais ampla).

Martins (ibid. p. 713) delinea um caso que considera problemático na afirmação de McComas (2008): “A ciência tem um elemento subjetivo. Em outras palavras, ideias e observações em ciência são ‘carregadas de teoria’”. É bastante razoável afirmar que teorias, modelos, ou explicações científicas não são realidades objetivas inerentes ao mundo natural, mas sim uma produção intelectual criada socialmente. Contudo, estes construtos não podem ser considerados subjetivos. É claro que um dos intuitos por trás, digamos, da construção de um modelo científico por parte de um cientista ou grupo de cientistas é representar, explicar ou teorizar sobre algo de maneira a transmitir aos pares uma mensagem objetiva acerca de seu significado e da relação desse modelo com um objeto de estudo. Em outras palavras, o debate sobre esta produção intelectual entre a comunidade científica só será possível caso todos os envolvidos estejam completamente cientes do que seus colegas estão falando, ou a que aquele modelo se refere,



quais problemas ele pretende atacar e como se propõe a fazê-lo. Se isso acontecer, a comunicação entre estes pares é em grande medida objetiva. Mas a conquista dessa objetividade só é viabilizada por meio de acordos, regras, métodos e conhecimento prévios *intersubjetivos*, o que é muito diferente de ser um elemento subjetivo. Matthews (ibid. p 9-10.) critica o fato de que por vezes conhecimentos sociológicos e epistemológicos aparecem de maneira confusa nos *tenet*. Ao identificar ou confundir, dessa maneira, subjetividade com intersubjetividade corre-se o risco perder de vista as virtudes epistêmicas particularmente presentes na ciência, como a busca da objetividade e do rigor. Não seria um engano afirmar que, por vezes, preferências pessoais, estéticas, filosóficas, contextos históricos e sociais e até idiossincrasias possam desempenhar certos papéis na construção do conhecimento científico. Talvez estes elementos sejam inescapáveis, dada a natureza humana e social da ciência, mas também não significa que a ciência não disponha de mecanismos intersubjetivos para atenuá-los ou incorporá-los sem que isso implique na suspeição de seus resultados e produtos. Ao incentivar o entendimento superficial de uma suposta dimensão subjetiva da ciência, é oferecido o risco de se desvalorizá-la ou concebê-la como indistinta de opinião pessoal, o que é comum no embate entre criacionistas e darwinistas, para citar um exemplo marcante em que este tipo de objeção desarrazoada é comumente evocada.

Para Romero-Maltrana e colaboradores (2017) um dos riscos de interpretações exageradamente relativistas a respeito das Visões Consensuais é o fato de elas serem tão gerais e tão apromblemáticas que alguns dos elementos das listas podem ser identificados em várias atividades humanas, não apenas nas ciências. Por exemplo, afirmar que a ciência é uma atividade criativa não nos diz muito sobre este tipo de conhecimento, uma vez que esta característica também é compartilhada pelas artes, pela publicidade, pelo design ou por essencialmente quase toda atividade intelectual humana. O mesmo se pode dizer ao afirmar, mesmo que corretamente, que a ciência influencia e é influenciada pelo contexto histórico, cultural e social no qual é produzida. Essa abordagem dificultaria a compreensão da ciência como um conhecimento em boa medida objetivo, e cultiva demasiadamente os seus lados subjetivos. Caso o objetivo dos estudos educacionais sobre a Natureza da Ciência seja o ensino de suas características essenciais, argumentam os autores, uma melhor abordagem seria jogar luz às características que a diferencia de outros empreendimentos humanos. Eles não sugerem, no entanto, que haja uma clara distinção entre a ciência e outros tipos de conhecimento, reconhecendo que o chamado problema da demarcação tem uma longa história na filosofia e tem se mostrado insolúvel, ou até um pseudo-problema.

Apesar dessas ponderações, salientam que é possível identificar aspectos bastante marcantes e presentes nas ciências, cuja identificação pode se beneficiar da abordagem de *semelhança de família* de Irzik e Nola.

Considerando as críticas e recomendações a respeito das Visões Consensuais e ao ensino de Natureza da Ciência de maneira mais geral, direcionaremos a discussão para um problema mais específico dentro da epistemologia da física e do debate educacional. Concordando com os autores citados até aqui, defendemos que visões relativistas, embora sejam importantes para a construção de visões mais críticas sobre a ciência, devem ser encorajadas somente mediante importantes ponderações para que os alunos, ou até mesmo professores, fiquem alerta e cientes dos possíveis exageros e distorções à elas associadas. Porém, não podemos deixar de lado os objetivos iniciais de parte considerável das pesquisas sobre ensino de NdC realizados, isto é, combater as visões positivistas ingênuas que ainda persistem no imaginário de professores e alunos.

Em suma planejamos nos colocar frente ao dilema epistemológico e educacional de encontrar um equilíbrio entre o *positivismo* e o *relativismo ingênuos*, buscando atualizar o debate sobre a Natureza da Ciência, o trazendo mais próximo para os desafios próprios de nossos dias, a saber, aqueles associados à resistência da desvalorização do conhecimento científico. Para tal discutiremos temas da filosofia e história da ciência diretamente relacionados a alguns dos princípios das VCs aqui expostos: “a história da ciência apresenta tanto caráter evolucionário quanto revolucionário” e “O conhecimento científico é durável, mas tem um caráter tentativo.”

Problematizaremos estes tópicos por meio de debates filosóficos sobre o estatuto cognitivo da ciência, sobre a mudança científica e possibilidade de continuísmo e progresso da ciência. Nossa análise nos levará a conclusões particularmente presentes nas ciências físicas e ciências altamente matematizadas, a saber, a identificação de estruturas matemáticas que se acumulam através de episódios de mudanças radicais da perspectiva científica, que por vezes são referidas como *revoluções científicas*.

## **1.4 Delineando o problema da continuidade do conhecimento científico e seu domínio ontológico**

Como já comentado, uma das visões inadequadas sobre a Natureza da Ciência mais reportadas na literatura está associada à falta do entendimento das limitações do conhecimento científico, mas especificamente sobre a sua falibilidade e provisoriedade. É pacificado o fato

de que as conclusões científicas e os produtos da ciência de maneira geral (como teorias, modelos, consensos científicos sobre qualquer objeto de estudos, entre outros), podem sempre ser reavaliados, reconsiderados ou até rejeitados mediante descobertas e evidência até então desconhecidas, por exemplo. Esse é um benéfico efeito colateral da dinamicidade da pesquisa científica e da alta mutabilidade desse empreendimento, seja por meio do desenvolvimento de novas tecnologias associadas a técnicas de análise experimental ou de dados, seja novas evidências empíricas, seja pela mudança de olhar da comunidade frente a algum problema científico específico. Não à toa a falibilidade é um dos tópicos presentes nas listas de Visões Consensuais.

O diagnóstico de visões ingênuas que remetem a algum tipo de caráter definitivo ou inquestionável dos conhecimentos científicos justificam a necessidade de ser debatido em sala de aula, qualquer que seja o nível de instrução, básica ou superior, a possibilidade de reexames de resultados até então considerados corretos pela ciência e sua eventual retificação. De maneira geral, conclusões locais de qualquer disciplina podem ser postas em dúvida, p. ex., a eficácia de um remédio contra uma doença; a estimativa da idade de uma espécie de ser vivo baseada em evidências fósseis; a quantidade de planetas no Sistema Solar; a idade do Universo estimada por teorias cosmológicas baseadas em observações disponíveis; outros exemplos poderiam ser citados indefinidamente.

Para além de reconsiderações e reorganizações de resultados e conclusões locais, a ciência é capaz de sofrer mudanças muito mais amplas e profundas, levando à necessidade de grandes reestruturações conceituais e alterações de visões de mundo. Este tipo de mudança é referido pelo princípio de McComas (1998) sobre o caráter por vezes revolucionário da ciência, e será nosso objeto de interesse. Muito menos frequentes do que o primeiro tipo comentado de mudança, episódios de alterações mais radicais do pensamento científico foram demasiadamente importantes e estudados na história da ciência para serem ignorados, caso se objetive o ensino historicamente e filosoficamente instruído.

O termo *revolução científica*, como um conceito referente à epistemologia histórica da ciência, ganhou notoriedade na literatura com o famoso ensaio de Thomas Kuhn, *A Estrutura das Revoluções Científicas* (2013 [1962]). Em linhas gerais, Kuhn descreve esses processos históricos como grandes revoluções dos paradigmas científicos, alterando principalmente compromissos teóricos, metodológicos e a maneira como as questões científicas são formuladas, pensadas e interpretadas pelos coletivos científicos. São citados diversos exemplos nos quais, segundo Kuhn, este tipo de transformação foi evidente: as revoluções quântica e relativística na

física; a revolução de Lavoiser na química; a darwiniana na biologia evolutiva; a lyelliana na geologia; entre outros.

Kuhn argumenta que ao se estabelecer novos alicerces teóricos, padrões de evidências e racionalidade em uma disciplina específica, é criada uma nova visão de mundo totalmente incompatível com aquela do velho paradigma. Assim, a nova teoria ou conjunto de teorias associadas ao novo paradigma são conceitualmente e axiomaticamente inconciliáveis com as antigas teorias, fazendo com que seus conceitos sejam mutuamente intradutíveis. Esta inconsistência profunda entre sucessivas teorias agregadas a diferentes paradigmas é chamada de *incomensurabilidade*. Duas teorias que podem versar sobre a mesma classe de fenômenos (p. ex., gravitação clássica e gravitação relativística) são formalmente incomparáveis, pois se referem a objetos estranhos uma à outra. Enquanto a gravitação newtoniana faz referência a forças à distância, espaço e tempo absolutos, massas invariantes, a relatividade se refere à curvatura do espaço-tempo para explicar a trajetória dos corpos, massas variáveis, quebra de simultaneidade, entre outras diferenças fundamentais entre ambas as teorias. Buscando justificar a incomensurabilidade entre paradigmas, Kuhn (2013 [1962], p. 188-92) argumenta que tentativas de recuperar o formalismo da mecânica newtoniana pela teoria da relatividade apesar de matematicamente possível é um esforço demasiadamente artificial do ponto de vista conceitual. Em outras palavras, por mais que seja possível recair nas equações de Newton pelo formalismo relativístico, admitindo, por exemplo, que a velocidade da luz seja infinita, os conceitos e concepções de mundo de cada uma das perspectivas teóricas não são retomados. Por mais que as equações se aproximem, feitas as manipulações de parâmetros e variáveis adequadas, a ação à distância de uma força não se aproxima de uma geometrização não-euclidiana no espaço; a independência entre tempo e espaço não se aproximam do *continuum* tempo-espaço einsteiniano, e assim por diante. Assim, a incomensurabilidade se impõe como um dos conceitos kuhnianos mais importantes para entender em que sentido as revoluções acusam descontinuidades do conteúdo cognitivo das ciências, justificando o aspecto “revolucionário” da ciência evidenciado pela sua história, como reza o *tenet* de McComas.

O modelo epistemológico proposto por Kuhn antagoniza a tradição historiográfica positivista caracterizada, segundo Gravroglu (2007, p. 19), pelo “desenvolvimento cumulativo da ciência, bem como a relação dialética entre teoria e a experimentação, segundo a qual as propostas e previsões teóricas são experimentalmente verificadas e os eventuais desvios conduzem à reformulação das teorias”. Apesar de se admitir o caráter tentativo da ciência, a acumulação

de conhecimentos positivos era vital para o entendimento positivista do progresso cognitivo, inclusive quando se buscava dar respostas ao problema das mudanças científicas (LAUDAN, 1996, p. 21).

Desafiando as doutrinas positivistas e visões espontâneas que podem ser consideradas como “positivistas ingênuas”, a existência de revoluções científicas implica na descontinuidade das metodologias de investigação, em contraponto à ideia de método científico rígido e atemporal. Além disso, noções ainda mais estranhas ao positivismo e o realismo ingênuos são admitidas, como descontinuidades em aspectos centrais dos próprios conteúdos cognitivos das teorias, como seus princípios mais básicos e as entidades teóricas nelas postuladas e admitidas. Este aspecto da natureza da ciência coloca em perspectiva o significado e a existências das entidades teóricas inobserváveis (sejam aquelas que não se apresentam *diretamente* aos sentidos, ou aquelas que não o fazem de maneira alguma), parte relevante tanto da ciência enquanto conhecimento especializado quanto como conhecimento escolar, afinal de contas, professores de ciência invariavelmente fazem referência a objetos abstratos como campos elétricos, moléculas, genes, vírus, elétrons, e assim por diante. A sujeição da ciência a passar por grandes revoluções conceituais coloca sob suspeição o conteúdo de verdade das teorias científicas atuais no que diz respeito aos referentes nelas utilizados para criar uma imagem científica do mundo natural. Em outros termos, o desenvolvimento por vezes descontínuo da ciência põe em debate o estatuto ontológico das entidades teóricas, sejam estas associadas teorias do passado ou teorias correntes.

Exposto este elemento da NdC, faz-se necessário esclarecer uma série de questões sobre o status de existência das entidades não observáveis e sobre estatuto cognitivo da ciência de maneira mais geral: se sucessivas teorias são realmente incomensuráveis, como confiar que qualquer uma delas atingiu, em algum nível, “a verdade” sobre seus objetos?; se o conteúdo de verdade das teorias científicas está sempre sob suspeição, é possível atribuir algum sentido ao progresso científico?; há algum tipo de acumulação de conhecimento?; o que se mantém verdadeiro após uma mudança científica?

Não pretendemos, obviamente, lançar soluções únicas para tais questões, tarefa que não pode ser realizada satisfatoriamente com o emprego de uma só perspectiva teórica. Buscamos, entretanto, contribuir com a reflexão dessa classe de problemas epistemológicos, propondo um possível tratamento teórico do dilema acerca da continuidade do conhecimento científico ao mesmo tempo em que o sugerimos como um discurso metacientífico educacional frutífero e po-

tencialmente desejável para nossos tempos. Para tal, consideramos as contribuições do realismo estrutural.

O dilema associado às discontinuidades e rupturas da ciência sugere que para que seja possível defender a continuidade do conhecimento científico e seu progresso, é necessário nos tornarmos seletivos aos aspectos teóricos aos quais atribuímos verdade ou realidade. Em outras palavras, podemos questionar como se pode adotar uma postura otimista frente à imagem de natureza e de mundo que a ciência é capaz de tecer tendo em mente a provisoriedade de seus grandes esquemas teóricos e a provisoriedade da referência que se faz a objetos teóricos, como as entidades inobserváveis centrais a tais teorias.

O realismo estrutural busca diluir estas tensões sinalizando para elementos de continuidade através dessas profundas mudanças científicas, preservando tanto quanto possível o realismo científico (PSILLOS, 1995). A fim de superar essas contradições, essa postura deve admitir a discontinuidade referencial dos termos teóricos e adotar o relativismo ontológico dos referentes centrais das teorias científicas. Em termos menos formais, pode-se dizer que o realista estrutural adota certa humildade frente entidades inobserváveis consideradas reais pelas atuais teorias científicas. Isso é justificado pelo histórico de abandono de entidades ligadas a teorias refutadas ou obsoletas do passado da ciência (WORRALL, 1989), dentre as quais podemos citar diversos exemplos, como o flogisto na química, o calórico no campo da termodinâmica e calorimetria, o éter luminífero na óptica e no eletromagnetismo, as esferas celestes na astronomia aristotélico-ptolomaica, entre outras entidades tomadas como fundamentais e centrais em antigas teorias científicas. Então, segundo o realismo estrutural, devemos selecionar quais elementos dos sistemas teóricos atribuímos realidade, considerando prudente suspeitar da ontologia dos referentes. Assim, a continuidade entre sucessivas teorias supostamente incomensuráveis se encontra nas estruturas formais e matemáticas que as teorias tecem entre os objetos inobserváveis, de maneira que não se atribui realidade aos objetos em si, mas sim às relações formais entre eles, cuja referência é, muito provavelmente, sempre putativa. Estas peculiaridades resultam de que o realismo estrutural se compromete mais com a dimensão epistemológica do que ontológica do realismo científico, no sentido de que é possível construir conhecimento (estrutural) da ordem natural no mundo, sem que conheçamos a natureza última de seus objetos (POINCARÉ, 1995 [1905], p. 164-70).

Considerando que a ciência é capaz de capturar corretamente a estrutura objetiva do mundo natural, o realismo estrutural pode amenizar percepções excessivamente relativistas

possivelmente estimuladas pela provisoriedade do conhecimento científico agravada pela existências de grandes rupturas em seu desenvolvimento ao indicar a continuidade estrutural das ciências matematizadas.

## **1.5 O Realismo Científico é desejável ao Ensino de Ciências? Revisitando a querela Construtivismo x Realismo**

Discussões acerca da realidade dos objetos teóricos, do estatuto ontológico e cognitivo da ciência e do mapeamento das relações estruturais das teorias científicas podem, à primeira vista, parecer demais abstratas e com implicações apenas indiretas no Ensino de Ciências. Contudo, o realismo científico não é um debate estranho às pesquisas educacionais, tampouco irrelevante.

Não é raro nos depararmos com a defesa de posturas metacientíficas realistas ou objetivistas no campo da pesquisa em ensino de ciências, ou de posições marcadamente relativistas ou construtivistas. A oposição entre tais visões filosóficas protagonizaram relevantes debates sobre qual seria a fundamentação epistêmica e ontológica mais desejável ao ensino de ciências, como marcadamente se verificou entre os anos de 1990 e 2000. As discordâncias, acirradas pela hegemonia e falta de polarização em favor do construtivismo enquanto referência teórica educacional (MATTHEWS, 2000), abarcavam um amplo espectro de temáticas, desde a fundamentação epistêmica e ontológica das ciências, concepções de verdade e objetividade, até a entendimentos acerca da aprendizagem do alunos e do papel do professor nesse processo (MATTHEWS, 2014).

Correntes construtivistas no ensino se tornaram uma das mais influentes na área a partir do anos de 1980 (MATTHEWS, 1998). Em termos gerais, podemos dizer que as várias correntes construtivistas compartilham algumas interessantes críticas a valores fundamentais cientificistas e Iluministas como a possibilidade de conhecimento de uma realidade objetiva apartada do sujeito cognoscente, ou de representação dessa realidade, que merecem exames e reflexões filosóficas. Tais temas são centrais também no debate sobre o realismo científico. Mas, do ponto de vista pedagógico, o construtivismo se origina como uma teoria da aprendizagem sobre como as crenças e sistemas conceituais são desenvolvidos pelo aprendiz, e não como uma teoria geral sobre o conhecimento humano.

Historicamente, o construtivismo como prática e método de ensino e aprendizado se opõe a duas correntes que dominaram as reformas curriculares no ensino de ciências nos anos de

1960 e 1970 (LABURÚ *et. al*, 2001). A primeira é muitas vezes identificada como concepção bancária de ensino. Segundo esta visão, os alunos seriam como tábulas rasas, ou recipientes vazios que podem ser preenchidos pela transmissão direta do conhecimento do professor. O discurso lógico e bem encadeado do professor, aliado à passividade do aluno e sua capacidade de escutar, memorizar e repetir garantiria a correta retenção do conteúdo escolar (*ibid*). A segunda, que buscava se opor a este tipo de ensino mecânico, explorava o modelo pedagógico de investigação-descoberta. Esta metodologia incentiva os alunos a assumir o protagonismo do processo de aprendizagem fazendo uso de debates, investigação experimental, testagem de hipóteses e outras estratégias características do ato de inquirir (*ibid*).

Não será nosso objetivo discorrer sobre as críticas das correntes construtivistas a estas concepções de ensino, mas podemos afirmar que sua emergência se associava à proposição de uma alternativa educacional e epistemológica a estes modelos. No limite, desconsidera-se em ambas as visões e conhecimentos prévios dos estudantes, tomando-os como agentes fundamentalmente atóricos (OSBOURNE, 1996). A segunda, apesar de reavaliar o ensino por recepção, cai em equívocos epistemológicos ao considerar que os alunos são capazes de reconstruir o conhecimento científico reduzindo sua formulação a um conjunto de passos rígidos de investigação, desconsiderando todos os aspectos criativos da ciência, reproduzindo uma visão empirista ingênua da atividade científica e do aprendizado (PÉREZ, 1996).

De maneira geral, as correntes construtivistas na pedagogia salientam que o conhecimento não pode ser transmitido de uma mente a outra, nem pode ser extraído direta e objetivamente do mundo exterior. Ao invés disso, o conhecimento é uma construção ativa da mente pensante mediante a experiência e a interação com o mundo externo. Seja a vertente focada no desenvolvimento do indivíduo, que remonta a Piaget, ou a vertente que ressalta a importância do grupo e da interação social que encontra suas origens em Vygotski, a máxima do construtivismo pedagógico pode ser expressa como: “Conhecimento não é adquirido pela internalização de algo dado de fora, mas construída de dentro” (OGBORN & FREYBERG, 1985, *apud* MATTHEWS, 1998, p.5).

Como relata Matthews (*ibid.*), alguns defensores do construtivismo estão estritamente interessados em suas contribuições pedagógicas, percebendo seus fundamentos epistemológicos como periféricos. Outros autores advogavam pelo construtivismo como uma epistemologia que se pudesse se posicionar como alternativa ao tradicional objetivismo (MATTHEWS, 1998; NOLA, 1997), sinalizando para um papel mais profundo a ser desempenhado do que mera



prática educativa.

A variante do construtivismo que mais se notabiliza pela sua oposição às concepções objetivistas e realistas sobre o conhecimento científico é o Construtivismo Radical, advogado principalmente por Ernst von Glasersfeld como uma teoria geral do conhecimento e da aprendizagem. Von Glasersfeld (2003 [1995]) define que o conhecimento é construído dentro da mente do sujeito com base em suas experiências e que este não seria uma representação do mundo real, mas sim uma função adaptativa da mente. O conhecimento e a cognição não estariam associados a descobertas sobre o mundo, mas a uma organização conceitual ativa do mundo sensível pela mente. Em suas palavras, von Glasersfeld (ibid., p. 1):

O que é o construtivismo radical? É uma abordagem inconven-  
cional ao problema do saber e do conhecimento. Ele começa com  
a suposição de que o conhecimento, não importa como for de-  
finido, está na cabeça das pessoas, e o sujeito pensante não tem  
alternativa a não ser construir o que ele ou ela sabe com base em  
sua própria experiência.

Apesar de não negar a premissa ontológica fundamental, isto é, a existência do mundo exterior, o conhecimento só pode ser formulado individualmente a partir da experiência sensível e sua reflexão (QUALE, 2007). Longe de configurar o construtivismo como uma corrente anti-intelectualista, não julga impossível a construção de conhecimentos sobre o mundo. Contudo, não se compromete com o valor de verdade desse conhecimento. O construtivismo radical é epistemicamente relativista, no sentido em que rejeita a ideia de que o conhecimento cognitivo conta com uma ontologia subjacente, de modo que essa corresponda, mesmo que de maneira bastante indireta ou aproximada, àquela (ibid, p. 235).

Os critérios segundo os quais o conhecimento ou sistema de crenças possa ser avali-ado não fazem, então, referências a quaisquer parâmetros caros à visões objetivistas ou realistas. Glasersfeld defende que não é possível avaliá-lo como bom ou ruim, certo ou errado, verdadeiro ou falso. Os termos utilizados fazem referência a adequabilidade e viabilidade do conhecimento construído. Um dado conhecimento deve ser viável em respeito às “regras do jogo” (aspectos metodológicos e epistêmicos inscritos em certa comunidade científica ou tradição de pensa-mento) (ibid.), que implica no relativismo epistêmico. Em outras palavras, a viabilidade depende de um conjunto de valores, sejam eles inscritos a uma dada comunidade de pensamento, ou a crenças individuais. Quale (ibid., p. 237) expõe que a noção de verdade não é totalmente banida dentro do Construtivismo Radical, mas se propõe uma noção relativista de verdade, em

contraponto a concepções objetivistas. Uma afirmação, ou conhecimento cognitivo, só podem, no limite, serem considerados verdade em um dado contexto, seja esse um esquema conceitual, grupo ou prática social que definem as “regras do jogo”.

Manifestando ainda mais divergências em relação a posições realistas e inspirado na psicologia cognitiva de Piaget, Glasersfeld defende que o conhecimento não é uma representação do mundo real, mas sim uma função adaptativa da mente ao mundo experiencial. O conhecimento e a cognição não estariam associadas a descobertas sobre o mundo, mas a uma organização conceitual do *mundo sensível*. Assim, uma estrutura conceitual metalmente construída será tão *mais viável* quanto *melhor se adapte* à variedade experiencial do indivíduo (VAN GLASERSFELD, 1998), conferindo fortes traços subjetivistas ao Construtivismo Radical.

Segundo von Glasersfeld, não é possível confrontar o conhecimento com o objeto que ele representa (SLEZAK, 2014, p. 1027). Podemos apenas conhecer o que a mente constrói, enquanto que o mundo real permanece desconhecido, sem que possamos saber se algum conhecimento sobre o real foi realmente atingido. Portanto, o construtivismo cultiva relações agnósticas com a realidade, “considerando-a além do nosso horizonte cognitivo” (MATTHEWS, 2014, p. 303), evitando referências ao real. Este aspecto agnóstico, por sinal, é comum à todas as formas de construtivismo (ibid., p. 302), não pertencendo apenas à sua forma radical.

Segundo esse raciocínio, se mudam as lentes cognitivas, muda-se também a realidade. A confiabilidade e a validade dos conhecimentos sobre a realidade são incomensuráveis. Mas também abre brechas para versões radicais de relativismo epistêmico, devido a falta de critérios para avaliar essas “realidades”. É imposta, por princípio, uma barreira que torna impossível a avaliação da teoria em vista de evidências (MATTHEWS, 2000).

Quale (ibid, p. 246-255), defensor do construtivismo, explica de maneira bastante didática em que sentido se dá a incomensurabilidade entre diferentes concepções de mundo usando como exemplo o antagonismo entre a biologia evolutiva e o criacionismo. Segundo o autor, a interpretação evolucionista das evidências fósseis só pode ser considerada uma explicação viável sobre o passado das espécies e da vida no planeta Terra de acordo com os critérios de cientificidade previamente estabelecidos pela comunidade científica em questão. Assim, um construtivista não colocaria em dúvida o fato de a ciência darwiniana ser, de fato, boa ciência. Contudo, sinalizaria que esse fato não nos permite afirmar que a teoria da evolução é uma explicação verdadeira, ou aproximadamente verdadeira sobre o que realmente aconteceu no passado. Uma vez que a adequação à experiência sensível é o critério de maior peso para julgar a viabili-

dade de uma explicação, uma explicação criacionista pode ser formulada de maneira a também se adequar às evidências. Assim, tanto o criacionismo quanto a teoria da evolução produziriam explicações viáveis, porém incomensuráveis, uma vez que a comunidade de biólogos e os seguidores do Velho Testamento utilizam réguas diferentes para julgar a viabilidade de suas explicações. Quale conclui que a escolha entre uma ou outra forma de interpretar a realidade é uma questão “preferência pessoal” (ibid, 252), e a teoria darwiniana é tida como boa ciência não por se aproximar mais da realidade do que o criacionismo, mas simplesmente porque a maioria dos biólogos assim a julgam.

Esse exemplo mostra de maneira inequívoca o antagonismo epistêmico entre realismo científico e construtivismo. Enquanto posições realistas costumam defender que a ciência apreende, de alguma forma, a realidade e que o conhecimento científico tem algum valor de verdade, esses critérios objetivistas de julgamento são totalmente estranhos ao construtivismo radical. Questionamentos sobre realidade e verdade são considerados irrelevantes, o que pode ser encarado como um posicionamento pouco desejável do ponto de vista educacional, principalmente em momentos históricos como o atual, no qual a ciência passa por uma profunda crise de credibilidade e a noção de verdade parece cada vez mais fluída. É compreensível que correntes relativistas, como o construtivismo e, em especial, sua versão radical busquem se distanciar de posições científicas e procurem apontar os limites do conhecimento científico. Afinal, como aponta von Glasersfeld (1998), visões tradicionais associadas ao positivismo começam a ser subvertidas dentro das disciplinas metacientíficas principalmente a partir do impacto causado pela clássica obra de Thomas Kuhn, *A estrutura das Revoluções Científicas*. A emergência de novas visões de ciência, representadas, por exemplo, pelos *Science Studies* contribuem para a complexificação e riqueza das disciplinas metacientíficas, e nos instigam a superar concepções idealizadas sobre a ciência. Nesse sentido, endossamos o instinto subversivo de von Glasesrsfeld e muitos outros pensadores que se dedicam a romper com o cientificismo. Contudo, como já argumentado anteriormente, nosso atual momento histórico coloca em dúvida a desejabilidade de visões excessivamente relativistas, como as defendidas em versões radicais do construtivismo, em benefício de visões que reconheçam criticamente as virtudes epistêmicas das ciências.

Para além dessas justificadas críticas acerca da concepção de verdade no construtivismo e do relativismo epistêmico, Matthews (2014, p. 304), por exemplo, sinaliza que muitas tradições construtivistas colapsam a epistemologia em psicologismo, confundindo a aquisição de

conhecimento com aquisição de crenças. Tal efeito se mostra evidente principalmente em correntes individualistas como a defendida por von Glasersfeld, ao radicalizar o entendimento de que nenhum aspecto do conhecimento por ser transmitido, mas apenas construído individualmente e encerrado intransigentemente no domínio subjetivo da experiência. Tal concepção de conhecimento, segundo Matthews, é demasiadamente vaga e permissiva para fundamentar propostas e conteúdos curriculares. Posições relativistas como essa podem parecer sedutoras e soarem democráticas aos incautos, ao colocar diferentes entendimentos sobre o mundo em pé de igualdade. Mas, na verdade, oferece risco à legitimidade dos conhecimentos científicos ao flertar com a indistinguibilidade entre opinião e conhecimento técnico e socialmente validado.

Além de pouco desejável de um ponto de vista educacional mais geral, o construtivismo radical, tomado em todas suas consequências epistemológicas, é inviável sob a ótica do ensino. A ideia de que o conhecimento é construído apenas por meio das experiências do sujeito está em desacordo com conteúdos básicos da física. Tomemos como exemplo o fato de que referenciais inerciais não podem ser acessados pelos sentidos. Por mais que experimentos científicos justifiquem, dentro de certos limites, a fertilidade desse conceito para a investigação e criação de sentido no domínio da mecânica, não é possível que um aluno capture as sutilezas desse conceito simplesmente julgando o mundo por meio de suas experiências, ou por aprendizagem baseadas em problemas, pois essas abstrações não são derivadas ou induzidas diretamente da experiência, mas são criadas pelo intelecto, e assim devem, ser ensinadas pelo professor. Considerar que os alunos são capazes de recriar os conceitos da ciência por meio da experiência ou da problematização em sala de aula é um equívoco epistemológico, tanto no contexto do ensino quanto na tentativa de se compreender a atividade científica, sendo enganosa do ponto de vista do que se deseja atingir com o ensino de Natureza da Ciência. Desse modo, a transmissão da tradição científica é componente essencial para a manutenção e desenvolvimento do conhecimento científico, em detrimento da intuição construtivista de que esse é reinventado em cada geração, confundindo a cognição privada do aluno com o caráter público dos conceitos já estabelecidos (ibid. p. 308-9).

Matthews continua sua crítica, afirmando que o professor é um agente mediador entre os alunos e os conhecimentos públicos. Sem o reconhecimento da dimensão pública e compartilhada desses saberes, em detrimento da concepção excessivamente subjetivista e individualista, a fronteira entre conhecimento e mera crença se esvai. Isso traria, segundo o autor, o efeito deletério de se esvaziar debates sobre o que, afinal, constitui o conhecimento, em especial, o

científico. Nos alinhando com Matthews e estendendo sua crítica, consideramos que a epistemologia construtivista, tomada em suas mais profundas consequências, esvazia também os debates acerca das relações entre teoria e realidade. Ao reduzir o conhecimento a uma ideia vaga de adequação à experiência e preterir julgamentos baseados em critério de verdade em benefício à noção de viabilidade segundo “regras do jogo” de determinado paradigma, fica interdita reflexões mais profundas sobre o realismo científico, parte integrante do desenvolvimento histórico das ciências.

Em outro texto, Matthews (1998) reconhece valiosos aspectos comuns às correntes construtivistas na educação, como o alerta aos professores à relevância dos conhecimentos prévios dos alunos e a importância do engajamento ativo desses no processo de aprendizagem. Contudo, ressalta que são antigos e bons senso-comuns pedagógicos que remetem a diversos pensadores, como “Sócrates, Montaigne, Locke, Mill e Russell [...] que uniram engajamento [dos alunos], pedagogias semelhantes à construtivista, porém com epistemologia não construtivista” (ibid, p.7). Complementa ao sinalizar que o construtivismo enfatizou a dimensão falível da ciência, suas conexões com os contextos sociais e culturais, sua historicidade, o caráter convencional de suas teorias, entre muitos outros aspectos relevantes, especialmente para o ensino de Natureza da Ciência. Entretanto, Matthews, acertadamente, nos lembra que tais compreensões não são monopólio de correntes construtivistas e podem ser reivindicados por filosofias realistas.

É compreensível que correntes relativistas, como o construtivismo e, em especial, sua versão radical busquem se distanciar de posições científicas e procurem apontar os limites do conhecimento científico. Afinal, como aponta von Glasersfeld (1998), visões tradicionais associadas ao positivismo começam a ser subvertidas dentro das disciplinas metacientíficas principalmente a partir do impacto causado pela clássica obra de Thomas Kuhn, *A estrutura das Revoluções Científicas*. A emergência de novas visões de ciência, representadas, por exemplo, pelos *Science Studies* contribuem para a complexificação e riqueza das disciplinas metacientíficas. Contudo, como já argumentado anteriormente, nosso atual momento histórico coloca em dúvida a desejabilidade de visões excessivamente relativistas, como as defendidas em versões radicais do construtivismo, seja psicológico ou social, em benefício de visões que reconheçam criticamente as virtudes epistêmicas das ciências.

Consideramos, como antecipamos anteriormente, que o realismo estrutural tem importantes contribuições no debate epistemológico e educacional, tendo em vista o momento histórico no qual vivemos, e a necessidade da construção de discursos metacientíficos ponderados.

Tanto os problemas filosóficos que motivaram sua proposição, quanto a visão que proporciona sobre a relação entre teoria e realidade têm potencial para a construção de visões realistas críticas sobre a ciência, como, inclusive, já foi defendido por nós (PEREIRA & GURGEL, 2020), e será melhor desenvolvido ao longo deste texto de dissertação. As motivações e implicações filosóficas dessa modalidade de realismo científico têm muito a contribuir para o desenvolvimento de questões associadas tanto aos tópicos das Visões Consensuais de Natureza da Ciência discutidos anteriormente, quanto para tópicos controversos.

## 1.6 Síntese

Em suma, buscamos argumentar neste capítulo que o realismo científico é desejável tanto do ponto de vista da construção de um discurso metacientífico e educacional, quanto como conteúdo a ser levado às salas de aula. Abordar essa importante frente da filosofia da ciência pode servir como meio de complexificar e enriquecer os conteúdos de Natureza da Ciência.

Pensando que o realismo estrutural, especificamente, tem a potencialidade de contribuir com reflexões sobre as querelas educacionais e epistemológicas expostas acima, buscaremos discutir com mais detalhes como ele aborda o problema da mudança científica e como foi inserido no debate acerca do realismo científico. Para tal resgataremos, mais adiante, suas raízes no pensamento filosófico de Henri Poincaré. Desejamos mostrar que o realismo estrutural é capaz de nos dar condições mínimas para reconhecer elementos de continuidade através de importantes rupturas conceituais de forma a facilitar a defesa do realismo epistemológico crítico e posturas otimistas frente a possibilidade de progresso e crescimento do conhecimento científico.

Sob a luz do realismo estrutural, apresentaremos o estudo de um episódio histórico da Física com o objetivo de evidenciar traços de continuidade entre a Física do século XIX, marcada pelo mecanicismo newtoniano, e a Física relativística. Para tal, utilizamo-nos do estudo da ótica dos corpos em movimento, em particular, da teoria de Fresnel a respeito da interação entre o éter e corpos transparentes em movimento. Interpretamos o chamado coeficiente de arraste parcial do éter, idealizado por Fresnel para explicar experiências óticas que buscavam evidenciar o movimento da Terra em relação ao espaço absoluto, como um elo estrutural entre a ótica do século XIX, que se baseava em uma visão de mundo mecânica, e a Relatividade Restrita. Apesar desta última representar uma ruptura com a visão de mundo newtoniana, que inclui o abandono da referência ao éter, consideramos que a retenção e reinterpretção do coeficiente de arraste pela cinemática relativística suscita reflexões sobre a validade da teoria de Fresnel e

sobre as relações entre teoria e realidade.

Tal estudo nos instrumentaliza para enriquecer as reflexões sobre aspectos específicos das Visões Consensuais de Natureza da Ciência, a saber, o caráter por vezes revolucionário da ciência e a provisoriedade dos conteúdos cognitivos das ciências. Esse estudo também nos dará ferramentas para pensar questões não-consensuais sobre a Natureza da Ciência que permeiam os debates sobre o realismo científico.

Com isso em mente, o objetivo desta pesquisa é investigar potencialidades de ensino de temas não-consensuais e do realismo científico. Para isso, realizamos uma investigação com estudantes do curso de Licenciatura em Física, no qual buscamos entender como os professores em formação inicial se posicionam frente a questões que envolvem eixos epistemológicos associados ao realismo científico e às rupturas e descontinuidade representadas pela existência de revoluções científicas na história da ciência. O debate epistemológico em questão foi apresentado aos estudantes por meio do episódio histórico por nós escolhido.

## Capítulo 2

# Debate sobre o realismo científico e o realismo estrutural

O objetivo deste capítulo é discutirmos em mais detalhes tanto questões centrais do debate sobre o realismo científico quanto explicar o significado do realismo estrutural e por que ele nos interessa em nossas reflexões sobre o problema da mudança científica e sobre a Natureza da Ciência. Em primeiro momento, introduziremos alguns aspectos fundamentais do realismo científico, buscando mostrar ao leitor algumas das diversas frentes disciplinares da filosofia da ciência nas quais o realismo científico se coloca. São elas as dimensões ontológica; epistemológica, semântica e metodológica. Realizada essa introdução, encaminharemos a discussão para o desenvolvimento histórico dos problemas filosóficos que motivaram a proposição do realismo estrutural. São eles o problema do significado dos termos teóricos, que em meados do século XX causou divergências entre filósofos instrumentalistas e realistas, e o problema da mudança científica e da descontinuidade das referências teóricas. Nessa segunda parte procuramos deixar claro como o realismo estrutural fornece vias de soluções para esses problemas e quais suas contribuições para uma visão realista e crítica sobre os objetos teóricos da ciência e sua relação com a continuidade e progresso do conhecimento científico.

### 2.1 Introdução ao debate Realismo/Antirrealismo

Apesar das diversas variações de realismo científico e das diversas maneiras de conceituá-lo, podemos, em primeira aproximação, afirmar com alguma cautela que seja uma posição filosófica “otimista em relação aos resultados da investigação científica, que abrangem os aspectos dos mundos tanto observável e inobservável” (SOUZA, 2015, p.10). Adjunto a este otimismo racionalmente justificado frente ao conhecimento científico, o realista geralmente carrega noções de progresso e de adequação representacional da ciência em relação ao mundo (SAATSI,



2017). Em outras palavras, pode-se dizer que o realismo científico defende que há uma relação de correspondência, mesmo que indireta e imperfeita, entre a ciência e a realidade objetiva que existe independente do pensamento. É fundamental ao realista entender que “o mundo precede a mente (e, naturalmente as teorias por ela produzida) de modo que essa se adapta ao caráter objetivo daquela” (SILVA, 1998).

Uma formulação mais forte do realismo científico, por vezes referido como *realismo de entidades*, concebe as entidades e processos teóricos inobserváveis como parte da realidade. O filósofo Ian Hacking, a quem geralmente se atribui o termo, define que “o realismo de entidades afirma que muitas das entidades teóricas realmente existem” (HACKING, 2012 [1983]). Em uma de suas obras mais referenciadas, *Representar e Intervir* (2012 [1983]), Hacking faz uma defesa do realismo de entidades bastante balizada pela física experimental contemporânea. Segundo ele, se o físico experimental consegue manipular uma entidade (como o elétron), e causar efeitos com ele, então essa entidade existe. Hacking traduz este pensamento com a máxima “se podemos bombardeá-los, então eles existem”. Em oposição a este tipo de postura, Hacking expõe também a atitude filosófica contrária, o antirrealismo de entidades, que as encara apenas como construtos lógicos, ou ficções úteis, adotando ceticismo acerca de sua existência, mas que servem como instrumentos intelectuais que amparam a investigação e racionalização do mundo.

O realismo de entidades não deve ser confundido com o realismo ingênuo, uma espécie de pensamento realista acrítico pouco reflexivo que, em linhas gerais, assume de maneira muito direta a correspondência entre teoria e realidade, tomando como valor de face as afirmações geradas por teorias científicas e a existência das entidades teóricas. O realismo ingênuo encara as teorias científicas como se fossem um espelho da realidade. Para pontuar a diferença entre o realismo de entidades e o realismo ingênuo, tomemos o exemplo dos elétrons. Esses objetos já foram concebidos de diversas formas e modelos, seja como uma singularidade do éter eletromagnético, como uma partícula que orbita o núcleo atômico, ou como uma partícula com propriedades quantizadas. O realista de entidades não pensa necessariamente que o elétron é exatamente como descreve a teoria. Eles podem e devem ser diferentes dos modelos, mas existem. Independente da maneira como as teorias os representam, todas elas se referem ao mesmo objeto, cuja realidade independe de nossos esforços para apreendê-lo.

O realismo de teorias, para Hacking, seria a concepção de que uma teoria científica pode ser verdadeira ou falsa e que seu objetivo é alcançar, ou se aproximar da verdade, ou ser candidata a representá-la. É possível adotar uma postura realista em relação a uma teoria,

mesmo se mantendo céticos em relação às entidades às quais a teoria se refere. Para exemplificar essa posição, Hacking apresenta o caso do filósofo Bertrand Russell, pioneiro da filosofia analítica, frente à teoria dos quarks: segundo ele, Russell interpretava as referências “quarks” como construções lógicas, “uma abreviatura, por meio da lógica, para uma expressão complexa que faz referência apenas a fenômenos observados.” (ibid, p.88). Dessa maneira, Russell seria um realista de teorias e um antirrealista de entidades, segundo a interpretação de Hacking. Já o antirrealismo de teorias diria que as teorias são construtos intelectuais que ajudam o cientista a investigar o mundo, mas não nos dizem nada sobre a realidade ou sobre a estrutura do mundo externo.

Como podemos notar, o realismo científico não é uma posição filosófica homogênea e possui uma variedade de formulações e maneiras de com ela se comprometer. A fim de detalhar com um pouco mais de profundidade no que consiste o realismo científico, apresentaremos na próxima seção, algumas de suas diversas dimensões e significados.

## **2.2 Teses do Realismo e alguns de seus contrapontos**

Para além das definições mais generalizantes – e das caricaturas – a respeito do realismo científico, essa doutrina filosófica se apoia em um conjunto de teses de diferentes naturezas que nos ajudam a complexificar e entender mais profundamente os seus principais motes: as teses metafísicas, epistemológicas, semânticas e metodológicas. Comentaremos brevemente suas principais características e contrapontos.

### **2.2.1 Realismo metafísico (ontológico)**

A tese realista metafísica traça a distinção mais fundamental acerca da existência, ao afirmar que o mundo exterior existe independente da existência do ser cognoscente, ou seja, sua existência é independente da mente de quem o percebe. Posturas críticas a essa tese costumam adotar ceticismo em relação à existência de uma realidade externa, ou se admitem algum tipo de realidade advogam que essa não é independente da mente.

Como expõe Niiniluoto (1999) as principais correntes da metafísica são o materialismo, que assume a primazia ontológica da matéria em relação à mente, e o idealismo, corrente segundo a qual a mente goza de um status ontológico mais fundamental do que a matéria.

De acordo com o materialismo, todos os componentes do mundo têm origem material, e a matéria é a causa de todos os fenômenos da natureza. Uma posição tipicamente materialista

seria, por exemplo, *o monismo material*, a redução da mente a causas materiais, negando então a existência de uma alma, ou da existência extra-corpórea, de maneira que a mente parece junto ao corpo do indivíduo (PESSOA JR., 2006). Não à toa, posições como essa são frequentemente atreladas ao ateísmo. Como explica Pessoa Jr, o materialismo encara a natureza como “desprovida de alma ou racionalidade intrínseca”, sendo sempre inerte e sem propósito ou finalidade. Isto está associado à valorização das *causas eficientes*, ou seja, os fenômenos naturais seriam causados pelas ações naturais da matéria, em detrimento da noção de causas finais. Este tipo de posição remete ao atomismo greco-romano, sugerido por Leucipo (séc. V a.C.), desenvolvido por Demócrito (séc. V-IV a.C.) e difundido por Lucrécio (séc. I a.C.) (ibid), que considerava que o universo se reduzia a átomos (componentes irreduzíveis da matéria) que se movem no espaço vazio. Essa postura é coerente com o realismo metafísico científico, uma vez que considera que a existência de átomos ou campos é indiferente à nossa existência, além de serem os agentes causais de diversos fenômenos e efeitos do interesse da ciência. Neste sentido, estamos estendendo o conceito de matéria e assumindo sua existência para todos os objetos relevantes indiretamente inobserváveis da física e das ciências naturais, sejam eles materiais (DNA, moléculas, etc.) ou imateriais (campo eletromagnético, espaço-tempo curvo, etc.).

De acordo com o idealismo, tudo é composto ou determinado pela mente, ou seja, é no pensamento que se busca a dimensão ontológica, e dele que depende o conhecimento, seja objetivo ou subjetivo (NIINILUOTO, 1999). Um dos exemplos mais emblemáticos de filosofia idealista se encontra em Platão, cujo pensamento conferia primazia às “formas ideais” e ao “mundo das ideias”, considerando o mundo perceptível pelos sentidos como projeções distorcidas de objetos abstratos perfeitos. As correntes idealistas podem ser discriminadas entre idealismo subjetivo e objetivo. A primeira se refere sempre a objetos da “vida mental de indivíduos humanos” (NIINILUOTO, 1999), ou seja, a realidade se reduz a processos mentais subjetivos, abrindo caminhos para doutrinas como o *solipsismo*, que encara o mundo como criações individuais do ser pensante (MOREIRA, 2014, p. 59), acarretando em grande ceticismo sobre a existência de uma realidade objetiva e independente da mente. Posições solipsistas nos fazem refletir sobre a confiança que podemos conferir aos nossos sentidos, o que foi levado às últimas consequências pelo filósofo René Descartes ao conjecturar sobre a possível existência de um gênio maligno que interviria em nossos sentidos, de maneira a sempre nos enganar a respeito das relações entre o mundo e nossas percepções (SOUZA, 2015, p.86). Apesar de Descartes não ser identificado como um idealista, sua dúvida hiperbólica exemplifica bem o tipo

de questão metafísica que envolve o idealismo. Segundo Niiniluoto (1999, p. 22), Platão, por exemplo, se enquadra como um idealista objetivo ao fazer referência às formas ideais e universais que habitam o mundo das ideias. Já o solipsismo de Berkeley seria um bom exemplo de idealismo subjetivo, ao assumir que a existência está condicionada às percepções e experiências subjetivas. Niiniluoto categoriza também o fenomenalismo sensualista de Mach como um tipo de idealismo subjetivo.

Via de regra, idealistas ou materialistas não estão sempre associados à formas de realismo ou antirrealismo científico. O que os diferencia é o comprometimento com uma ou outra hierarquia ontológica. Porém, não é raro essas diferentes doutrinas metafísicas divergirem sobre o estatuto ontológico subjacente às teorias científicas. Formas de fenomenalismo, como o de Mach, costumam adotar posicionamentos agnósticos ou céticos sobre a realidade de entidades inobserváveis, como o átomo, por exemplo. Tradições construtivistas, como o Construtivismo Radical de von Glasersfeld, já comentada no capítulo anterior, apesar de não necessariamente negarem a existência do mundo exterior, assumem que as teorias científicas, bem como suas entidades teóricas, são apenas construções da mente, sem se comprometerem com qualquer tipo de correspondência com a realidade. O construtivismo individual e subjetivo, assim como o fenomenalismo, consideram a experiência como base da construção do conhecimento, não se comprometendo com a realidade associada à especulações e criações mentais. Já o materialismo, costuma ser mais solidário a posições realistas perante a ciência, como é o caso Mario Bunge (2010 [2006]), que considera o mundo material existe independente e nossas vontades, conhecimentos, e representações e estruturas mentais, e que a defesa do realismo científico se fragiliza sem o materialismo. Nesse sentido o realismo de entidades, que entende como existentes as entidades inobserváveis de uma teoria científica, deve tomar como premissa a existência da matéria, independente e anterior à mente, se distanciando do idealismo. Os realistas científicos costumam assumir tanto a existência do mundo externo quando a sua inteligibilidade. As diferentes posições sobre a relação entre existência e conhecimento empreendida por diversas formas de materialismo e idealismo nos levam a pensar sobre o domínio epistemológico do debate acerca do realismo científico.

### 2.2.2 Realismo Epistemológico

A tese epistemológica do realismo científico afirma que o mundo pode ser conhecido mediante um empreendimento intelectual. Niiniluoto (ibid.) apresenta a definição clássica de

conhecimento de uma proposição  $h$ , de maneira que um ser pensante  $X$  a conhece, se e somente se: i)  $X$  acredita em  $h$ ; ii)  $h$  é verdade; iii)  $X$  tem uma justificativa de  $h$ . Para um sujeito que tenha uma noção *infallibilista* (muitas vezes associado ao realismo ingênuo e ao positivismo), aceitar a condição iii) é aceitar que a justificativa da proposição  $h$  implica em ter *certeza* de  $h$ . (ibid, p. 80). Para escapar do infalibilismo, é necessário adicionar algumas considerações sobre a natureza deste conhecimento sobre o mundo: “todo o conhecimento dos fatos é incompleto e falível, e boa parte dele é indireto” (BUNGE, 2010 [2006], p.58). Bunge endossa o vínculo entre o infalibilismo e o realismo ingênuo. Segundo ele, uma forma de realismo considerada não-ingênuo - referido como *realismo crítico* - não reivindica certeza sobre o conhecimento científico, mas tem como uma de suas principais características a provisoriedade e a possibilidade de aperfeiçoamento, fazendo com que as teorias científicas sejam aproximadamente, ou parcialmente verdadeiras, e que as “falsidades no nosso conhecimento possam finalmente ser detectadas e corrigidas” (ibid, p. 60). Essa concepção *fallibilista e melhorista* do conhecimento confere um caráter, em certa medida, cético ao realismo epistemológico que falta ao realismo ingênuo, sendo uma importante marca do realismo crítico (ibid, p.358). Levando estas ressalvas em consideração, a definição clássica ganha outra formulação: i’)  $X$  acredita que  $h$  seja aproximadamente verdade; ii’)  $h$  é aproximadamente verdade; iii’)  $X$  tem razões ao propor que  $h$  esteja mais próxima da verdade do que suas proposições rivais, baseado nas evidências disponíveis (NIINILUOTO, 1999, p. 84).

Outra marca importante do realismo epistemológico é seu nível de confiança no conhecimento *indireto* sobre o mundo. Bunge afirma que o conhecimento indireto é o mais profundo, se distanciando de posições empiristas, que costumam afirmar que o conhecimento mais seguro acerca do mundo é o conhecimento fornecida pela experiência sensível, direta, ou seja, um conhecimento *a posteriori*, em detrimento do conhecimento *a priori*, fornecido pela razão e abstração. A defesa do conhecimento abstrato e indireto está presente na influente obra do epistemólogo francês Gaston Bachelard, *A formação do Espírito Científico*. Nela, Bachelard afirma que o pensamento abstrato “desobstrui o espírito” (a palavra *espírito* é tomada aqui no sentido das faculdades mentais, ou do intelecto), e que este deve substituir o pensamento associado às “experiências primeiras” e às geometrizações solidárias às intuições ligadas às aparências mais imediatas. Neste sentido, teorias como a Relatividade de Einstein e a mecânica quântica de de Broglie, Heisenberg e Dirac seriam exemplares de boa ciência, justamente pela suas audaciosas abstrações (BACHELARD, 1996 [1938]).

Destoando dos realistas científicos, os empiristas radicais restringem o conhecimento confiável sobre a realidade às suas entidades fenomênicas, como impressões, sensações e dados sensíveis. Quaisquer construções lógicas que extrapolem o domínio da experiência devem ser vistas com ceticismo, não assumindo qualquer relações de correspondência entre estruturas conceituais e a realidade do mundo (NIINILUOTO, 1999). No caso dos construtivistas radicais, as relações entre conhecimento e realidade são dadas apenas por sua viabilidade (ver seção 1.5) frente às evidências da experiência, mantendo fora de alcance a possibilidade de se saber sobre a realidade do mundo que não se apresenta aos sentidos.

A questão das relações entre conhecimento construído e realidade do mundo natural, fundamentais para se pensar a dimensão epistemológica do realismo científico está imbricada com a questões associadas à qualidade da correspondência entre conhecimento e realidade, e o significado dos termos abstratos que ocorrem em uma teoria científica. As relações semânticas entre as referências de teoria e realidade em relação a seus referentes serão brevemente comentadas a seguir.

### 2.2.3 Realismo Semântico

Em linhas gerais, a semântica é a área do conhecimento que estuda a relação entre os significantes de uma dada linguagem (palavras, símbolos, proposições) com os seus referentes, os objetos aos quais eles se referem. Nas palavras de Niiniluoto, a semântica trata das “relações entre as expressões linguísticas e a realidade extralinguística” (ibid, p.43). Segundo este autor, a tese semântica do realismo afirma que a verdade é uma relação semântica entre a língua e a realidade.

Já Mario Bunge expõe essa tese da seguinte maneira: “(a) algumas proposições referem-se a (são acerca de) fatos; e (b) algumas proposições factuais são verdadeiras em certa extensão” (BUNGE, 2010 [2006], p. 361). O uso que o autor faz da ideia de proposições factuais nos ajuda a entender quais são os tipos de proposições que interessam à ciência e ao realismo científico semântico. São estas proposições, então, que de alguma maneira se amparam no mundo real, como: enunciados de leis, que se referem a padrões reconhecidos na natureza; proposições singulares, que se referem a fatos; atributos de entidades teóricas, que se amparam em propriedades observadas durante experiências, etc. (ibid, p. 362).

Sendo assim, enunciados da matemática pura, por exemplo, não encontram lastros no mundo real, fazendo sentido então, apenas atribuir valor de verdade segundo critérios de coerên-

cia interna à linguagem em questão. Para esse domínio de proposições está reservada a teoria da verdade por coerência, enquanto que as proposições das ciências estão sujeitas à teoria da verdade por correspondência. Bunge define essa como: “uma proposição factual é (factualmente) verdadeira se e somente se for confrontada empiricamente ou for implícita às proposições que passaram pelos testes empíricos” (ibid. p.363). Essa formulação se distancia de definições positivas sobre a correspondência semântica entre as proposições da ciência e o mundo real.

Em uma defesa do *realismo racional e crítico*, o epistemólogo Michel Paty afirma que “as proposições do conhecimento científico não falam do real em termos explícitos, pois se referem a propriedades, traduzidas em linguagem simbólica, dos *objetos pensados*. [...] É, portanto, apenas por referência indireta, e uma transparência aos problemas da disciplina considerada, que a ideia de real se impõe como aquilo em torno do qual se organiza, invisivelmente, a coerência da teoria representativa” (PATY, 1995, p. 264). Paty segue o raciocínio afirmando que a tensão gerada pelo confronto entre o objeto pensado e mundo dos fenômenos resulta na “realidade dos fatos”, em consonância com a definição de Bunge.

Segundo ele, é inadequado atribuir valores binários (verdade ou falsidade) a *todas* as proposições dessa natureza, uma vez que as ciências não se propõe a criar verdades imutáveis, mas sim enunciados que se aproximem mais à verdade do que enunciados rivais. O critério da coerência, que assume somente resposta como “certo” e “errado”, “verdadeiro” e “falso” se aplica às ciências naturais apenas em enunciados puramente teóricos, fora do âmbito empírico, uma vez que é esperada coerência interna de uma teoria científica que se pretende (aproximadamente) verdadeira.

O valor de verdade atribuído a um enunciado científico é a ele conferido, segundo Bunge, após um teste de verdade mais ou menos rigoroso. Por exemplo, afirmar que a Terra é esférica (que não é estritamente verdade) tem maior valor-verdade do que a afirmação de que nosso planeta é plano, uma vez que a primeira passa por testes de verdade mais rigorosos que a segunda.

Em outras palavras, uma teoria da verdade por correspondência “refere-se unicamente a enunciados factuais, como dados empíricos e as hipóteses científicas. Ela captura a intuição de que a verdade factual, ao contrário da verdade formal, consiste na adequação à realidade” (ibid, 365), por mais que essa adequação seja aproximada, essa concepção de realismo semântico se adequa às teorias falibilistas do conhecimento, tão caras ao realismo científico crítico.

Uma vez que as relações de correspondência entre realidade e asserção teórica depen-

dem do que Bunge chamou de “teste de verdade”, se faz necessária uma breve discussão sobre as capacidades e potencialidades de metodologias científicas no processo de apreensão da realidade.

#### 2.2.4 Realismo metodológico

A tese do realismo metodológico afirma que os métodos empregados pelas ciências são os mais eficazes que dispomos para construir conhecimento sobre o mundo. Bunge (2010 [2006]) chama essa tese de *cientismo*, defendendo que “o método científico é a melhor estratégia para atingir as mais objetivas, mais acuradas e mais profundas verdades acerca de fatos de qualquer espécie, naturais ou sociais” (ibid, p. 370). Para este autor, o realismo metodológico se traduz nas “checagens de realidade” associadas aos testes empíricos e sintáticos, que consistem no confronto entre proposições científicas (particularmente hipóteses científicas) com os dados empíricos e as teorias pertinentes (ibid, p. 369). Em outras palavras, essa checagem de realidade tem uma dimensão interna, no sentido de que uma hipótese científica deve ser consistente com as teorias a ela relacionadas; e há também uma dimensão externa, que compara indiretamente a proposição com o fato ao qual ela se refere. Bunge enfatiza este caráter indireto, uma vez que os testes empíricos são confrontos entre uma hipótese com *dados* associados aos fatos.

Para exemplificar, tomemos a famosa experiência de Fizeau de 1851, que buscava checar a realidade da seguinte proposição: a velocidade da luz é modificada pela velocidade da água corrente onde ela se propaga segundo a previsão teórica do éter parcialmente arrastado, formulada por Fresnel. A adequação dessa proposição à realidade não está explícita nos dados do experimento (ou seja, o tipo de padrão de interferência que se estabelece entre os raios de luz que se propagaram a favor e contra a corrente de água), mas emerge do julgamento e interpretação desses dados pelo cientista, ou pela comunidade científica. A metodologia da ciência fornece os meios para que se estabeleçam vínculos entre os dados experimentais e os objetos das proposições científicas.

Não raro, essa tese do realismo científico é justificada pelo sucesso das ciências: a ciência produz resultados (aproximadamente) verdadeiros porque nela são empregados métodos confiáveis (ibid, p.371). Todavia, o otimismo metodológico é desafiado por um dos mais famosos argumentos antirrealistas: a subdeterminação das teorias pelos dados. Este argumento se refere à possibilidade de um mesmo fenômeno, ou uma mesma classe de fenômenos, serem igualmente compatíveis com teorias mutuamente incompatíveis (SOUZA, 2015, p. 36-7).



Considere as teorias  $T$  e  $T'$ , que se propõem a explicar os mesmos fenômenos e a adequação empírica de ambas depende dos mesmos dados, apesar de postularem mecanismos e entidades inobserváveis distintas. Caso ambas as teorias se adequem com igual precisão aos dados, então não há meios empíricos de se decidir entre as duas teorias, tornando impossível o conhecimento sobre os processos e entidades não observáveis.

Por outro lado, um realista pode argumentar que a subdeterminação das teorias pelos dados, exposto dessa maneira, apenas mina o conhecimento teórico segundo critérios empiristas, que negam a possibilidade de obtenção de conhecimento legítimo por outros meios que não a experiência. Se admitirmos que adequação empírica não é o único critério para julgar o valor de uma teoria, o realista pode relativizar o peso da subdeterminação. Tomemos como exemplo a comparação entre a teoria dos elétrons de Lorentz e a teoria da relatividade de Einstein de 1905. Ambas compartilhavam a mesma estrutura matemática e eram igualmente corroboradas pelas evidências experimentais disponíveis à época, diferindo essencialmente pela sua semântica e metodologia. É possível julgar que a teoria de Einstein é preferível em detrimento da teoria de Lorentz, por aquela se apoiar em um número bastante reduzido de princípios básicos, a partir dos quais são derivadas suas equações pertinentes, ao passo que a teoria dos elétrons conta com grande quantidade de hipóteses subsidiárias e *ad hoc*. Em suma, critérios de cientificidade que não se resumem a adequação empírica podem tornar possível a decisão racional entre teorias que compartilhem do mesmo sucesso empírico.

Outro tipo de resistência ao realismo metodológico, a *tese teórica da metodologia científica*, segundo a qual, “a metodologia atual da ciência depende profundamente da tradição teórica” (ibid, p.100). Ou seja, aqueles vínculos que a metodologia científica permite tecer entre os dados empíricos e as proposições submetidas ao teste estão contaminados pelos próprios pressupostos da teoria. Essa tese remonta à influente obra de Thomas Kuhn, *A Estrutura das Revoluções Científicas* (2013 [1962]), na qual o autor defende que os critérios de cientificidade, as perguntas que os cientistas formulam, compromissos teóricos e metodológicos (ibid.) estão fortemente ligadas à “ciência normal”, ou seja, a ciência paradigmática, que guia a prática dos cientistas. Segundo Kuhn, as revoluções científicas, que marcam as mudanças paradigmáticas de uma determinada ciência, geram mudanças profundas na visão de mundo dos cientistas, de forma que “os padrões de evidência, interpretação e entendimento, ditados pela velha teoria, são muito diferentes daqueles ditados pela nova teoria.” (SOUZA, 2015, p. 102)

Essa noção se manifesta na *tese da incomensurabilidade* (ver seção 1.4), que, em linhas

gerais, assevera que as “teorias científicas pertencentes a diferentes paradigmas são incomensuráveis, ou seja, as asserções de uma não podem ser traduzidas na linguagem da outra” (ibid), de maneira que ambas se referem a mundos teóricos distintos. Como o paradigma científico, no sentido kuhniano, orienta fortemente o pensamento e a prática da comunidade científica, é razoável afirmar que os padrões de racionalidade mudam com o tempo, de forma que os métodos de verificação estão sujeitos às mesmas contingências que as teorias científicas e as tradições de pesquisa (ibid). Caso a tese da incomensurabilidade realmente implique nessa relativização dos critérios de cientificidade, objetividade e racionalidade, abre-se espaço para a relativização das metodologias científicas.

Consideramos desejável uma visão não estática da metodologia científica, uma vez que a ciência é um empreendimento epistemológico, mas também social de validação do conhecimento. É esperado que os critérios de cientificidade e os ideais de conhecimento não sejam os mesmos em diferentes contextos históricos e sociais. A considerável plasticidade das práticas e valores científicos representam uma importante evidência de que a ciência não consiste de um empreendimento intelectual dogmático, reforçando seu caráter provisório e autocorretivo. Tais concepções sobre a ciência são desejáveis à construção de uma postura realista e crítica. Complementando esta e as seções anteriores sobre os diferentes domínios do realismo científico, teceremos algumas reflexões sobre o significado de uma visão crítica sobre a ciência, e solidária ao realismo científico, buscando mostrar como estas diferentes dimensões do realismo se imbricam e se opõem a visões ingênuas sobre as relações entre teoria e realidade.

### **2.2.5 Realismo científico crítico: uma reflexão geral**

Pensamos que qualquer defesa arrazoada do realismo científico deve ter uma capacidade argumentativa e explicativa (acerca do sucesso e confiança dos resultados da ciência) muito mais poderosa daquela promovida pelo realismo ingênuo e por noções distorcidas do fazer científico (PÉREZ, et. al, 2001). O realista incauto, considera que a ciência acumula, ao longo de sua história, saberes estanques e imutáveis, formando um mosaico de certezas e de sentenças verdadeiras que se relacionam diretamente com o mundo. O realista ingênuo concebe a ciência como o empreendimento intelectual que minera as verdades, os fatos e as entidades que na natureza se escondem. A tarefa do cientista, segundo essa visão, se resume assumir um suposto papel de descobridor da coleção de fatos naturais.

Outra maneira de caracterizar o pensamento do realista ingênuo é sua interpretação das

entidades postuladas pela ciência. Um olhar acríptico pode levar à concepção de que os elétrons, por exemplo, gozam do mesmo estatuto ontológico de objetos concretos e diretamente perceptíveis, como uma maçã, muito embora não possamos perceber a existência do primeiro. Falta o entendimento de que, ao contrário da maçã, o elétron faz pouco, ou nenhum, sentido fora do esquema abstrato e conceitual dentro do qual ele *existe*. Ou seja, escapa às concepções ingênuas o caráter de *construção* do conhecimento e dos objetos da ciência. A dimensão epistêmica sobre o que significa conhecer o elétron passa pelo entendimento de que a referência ao real se dá de maneira indireta, e seu estatuto ontológico é de diferente qualidade do estatuto de objetos concretos e apreensíveis diretamente pelos sentidos.

Antes de uma realidade externa, o elétron é construído dentro do “espaço de pensamento”, tomado como o “lugar próprio da conceitualização simbólica”, como explica Paty (1995, p. 263). Diferentemente dos objetos ordinários, concretos e macroscópicos (que podem, pelo menos superficialmente serem compreendidos isoladamente), o elétron apenas ganha significado dentro de uma complexa estrutura formal, matematizada de relações, que tecem as qualidades e as maneiras de interação deste objeto com os demais objetos e conceitos abstratos formulados pelos cientistas. “O caráter de realidade (ou de existência) de uma partícula elementar”, como exemplifica Paty, “é a sua inscrição num esquema teórico de explicação” (ibid, 269), de maneira que a realidade física está fortemente associado a “*objetos-pensados*”. Este caráter do conhecimento científico nos remete à tese epistemológica do realismo associado às ciências físicas contemporâneas, que toma como condição necessária a abstração, que gera os “abstratos-construídos” como se refere Paty (ibid. p. 270-1). Este movimento, segundo o autor, faz com que os objetos da ciência, ao mesmo tempo, se aproximem e se distanciem dos objetos do mundo material. A proximidade é entendida no sentido de que as ciências têm obtido êxito em tecer relações cada vez mais complexas acerca deste mundo, fazendo-nos conhecer a “realidade profunda” a ele associado (ibid, p. 268). Paty associa a complexificação deste “aparelho conceitual”, que a ciência se preocupa em construir, com um “movimento em parafuso”, que se aprofunda e toca cada vez mais as camadas mais internas do real (ibid, p.263). Ao mesmo tempo, a ciência distancia seus objetos da nossa percepção mais intuitiva e à “qualificação concreta” (ibid, p. 268). Isso mostra como as relações semânticas entre construtos teóricos e realidade são muito mais complexas do que se espera de conhecimentos do senso-comum.

A discussão do estranho estatuto ontológico das entidades teóricas precisa, necessariamente, refletir sobre como se dá a passagem do pensado, da construção estrutural e simbólica

para o concreto, o real, afinal de contas, a ciência não consiste em uma atividade de livre ou arbitrária invenção, um (*ficcionismo*), no sentido da construção de uma ficção que não tangencia de modo algum a realidade e o concreto (BUNGE, 2010 [2006], p.274). A ciência não pode ser identificada como um discurso meramente ficcional justamente porque seus métodos buscam suporte nos fatos empíricos e os organiza de maneira a correlacioná-los formando domínios de fenômenos cujas teorias lhe dizem respeito. Essa capacidade que a ciência tem de amarrar fenômenos aparentemente dispersos e não correlatos, segundo Paty, “assegura o caráter não gratuito, ou não simplesmente convencional, de um conceito” (PATY, 1995, p.275). A atividade experimental põe à prova as construções teóricas (ibid, p. 276) e também limita as possibilidades dessa construção, ou por vezes, obriga o cientista a reconstruí-lo, alterá-lo, reformulá-lo. Paty identifica este movimento como um processo dialético entre uma ideia, o objeto *abstrato-construído*, com o objeto verdadeiro (este acessado indiretamente, ou tornado manifesto por meio dos dados da experiência), que resulta numa síntese que corresponde a outro abstrato-construído, outro objeto físico, exprimindo “uma conciliação da necessidade lógica e da falha no objeto que não se deixa encerrar pela lógica: é o salto do pensamento que se tornou necessário pela exterioridade da falha” (ibid. 282).

A conjunção das teses do realismo científico dá corpo ao que chamamos de aqui de *realismo científico crítico*: o mundo exterior e independente da mente existe e pode ser conhecido de maneira indireta, aproximada e sempre sujeita a reformulações e melhorias (falibilismo). O progresso da ciência é garantido justamente por este processo dialético de retificação de erros, que só é possível mediante o conflito entre as proposições que emergem do esquema conceitual da ciência, e os testes aos quais elas são submetidas. Este empreendimento intelectual, que por excelência é incompleto, aberto e em permanente mobilização (BACHELARD, 1996 [1938], p.24), nos fornece proposições factuais cada vez mais sujeitas a passar por rigorosas checagens, aumentando seu valor-de-verdade, seguindo a expressão de Bunge, e formando uma rede de relações entre o *pensado* e o *real*. Michel Paty associa a apreensão crítica do real ao *roubo da matéria pela mente*:

Desde que a realidade é apreendida pela consciência, pelo pensamento, de que ela é, no mínimo, representada, tudo ocorre como se alguma coisa em sua totalidade e exterioridade de realidade material lhe fosse roubada para ser transplantada num espaço diferente, o do pensamento conceitual, onde adquire um sentido e uma função: operou-se uma substituição, do pensamento pelo real, do conceito pelo objeto, condição de apropriação, pelo

pensamento, desse real, que o transpõe, e ao qual terá, em consequência de retornar incessantemente. (ibid, p. 287).

## 2.3 O argumento do Milagre e a Meta Indução Pessimista

As últimas seções foram dedicadas a fazer um discurso preliminar e introdutório a respeito de importantes aspectos do realismo científico. Buscamos mostrar que os estudos que pretendem debater as relações entre teorias científicas e a realidade da ordem natural, vão muito além de polêmicas sobre a existência ou não de entidades inobserváveis. Esperamos que essa breve exposição sobre as dimensões ontológicas, epistemológicas, semânticas e metodológicas tenham cumprido o papel de complexificar algumas questões caras ao realismo científico. A partir daqui, buscaremos reconstruir o contexto filosófico pertinente ao nosso problema de interesse antecipado na seção 1.4, a saber, as querelas levantadas a respeito das relações entre ciência e realidade que emergem do problema da mudança científica. O embate entre os chamados argumento do milagre e o argumento da metaindução pessimista criará o terreno para a proposição do realismo estrutural, que se colocará, segundo Worrall (1989), como o melhor dos dois mundos, se pretendendo como uma via do meio para se pensar os problemas associados às descontinuidade do conhecimento científico e suas relações com o mundo real.

A defesa, por um lado, e a oposição crítica ao realismo científico, por outro, têm sido marcados por argumentos muitas vezes tidos como centrais na literatura. Os realistas argumentam que como as teorias científicas vigentes proporcionam resultados de grande precisão e acurácia, tanto no aspecto empírico quanto no aspecto preditivo, seria um milagre caso estas não nos dissessem algo sobre o mundo em si. É o chamado “argumento do milagre”, ou do não-milagre (do inglês, *no miracle argument*). Smart (1982, p.39) diz que seria muito estranho caso teorias tão bem sucedidas fossem apenas instrumentos, sendo muito mais plausível a explicação de que as entidades por elas postuladas realmente existam - ou, em uma formulação mais branda, a teoria deve ser aproximadamente verdade - ao invés de acreditarmos em “coincidências cósmicas”. Sendo assim, aceitar o realismo se mostra uma inferência à melhor explicação para o sucesso da ciência (BRANQUINHO & SANTOS, 2014).

Uma importante e contundente crítica ao realismo, por sua vez, se apoiam em uma análise de caráter histórico da ciência. Se olharmos para o passado podemos constatar que até as mais bem-sucedidas teorias científicas em algum momento se mostraram falsas, então seria mais prudente nos mantermos sempre céticos em relação à realidade das teorias atuais e suas entida-

des, pois nada nos faz crer que as teorias atuais não serão também abandonadas. É o chamado “argumento da metaíndução pessimista”, pois considera que a história se repetirá no futuro, justificando o pessimismo em relação à realidade das teorias. Este argumento foi defendido e bem desenvolvido por Laudan (1981a; 1984), que considera que as noções de verossimilhança e verdade aproximada ainda são muito imprecisas semanticamente e que o sucesso empírico de uma teoria não garante sua proximidade à verdade. O autor lista várias teorias bem-sucedidas que hoje são consideradas falsas, como a teoria do calórico, a teoria do flogisto, os éteres ótico e eletromagnético, a conservação da massa na química e na física do século XIX, a teoria atômica que considerava o núcleo homogêneo, etc. Segundo o autor, essa lista pode continuar indefinidamente. A metaíndução pessimista é um argumento convincente que goza de forte apoio histórico. Afinal, como podemos considerar verdadeira, ou aproximadamente verdadeira, uma teoria obsoleta que se refere a processos ou entidades cuja inexistência é um consenso?

### 2.3.1 A Virada Realista

Durante a primeira metade do século XX, a filosofia da ciência foi marcada fortemente por posições próximas ao antirrealismo. Essas posições são bem exemplificadas pela abordagem semântica do empirismo lógico, que fazia forte diferenciação entre as parcelas “teóricas” e “empíricas” das teorias científicas de maneira que apenas a segunda fosse realmente interpretada, mantendo posições céticas em relação à primeira.

É comum antirrealistas fazerem referência a entidades inobserváveis, no entanto sem atribuir a elas qualquer realidade, as considerando meras ferramentas heurísticas úteis, o que configura uma postura *instrumentalista*. Tal interpretação das teorias científicas remete ao físico Pierre Duhem, para quem as teorias científicas além de não poderem ser consideradas nem falsas nem verdadeiras, buscam simplesmente “salvar os fenômenos”, i.e., dar conta dos fenômenos observáveis da maneira mais satisfatória possível (MOULINES, 2020, p. 43-5).

Essa postura é bastante típica de formas de positivismo, como o *positivismo e o empirismo lógicos*. Hacking (ibid, p. 107-8) faz referência ao que chama de seis instintos positivistas, no que se refere ao estatuto cognitivo e ontológico do conhecimento. São eles: i) *verificacionismo*, segundo o qual proposições só adquirem sentido caso possam ser submetidas a testes de verdade ou falsidade; ii) *pró-observação*, o fundamento do conhecimento (não lógico/matemático) está diretamente associado o que se pode perceber, experienciar por meio dos sentidos; iii) *anticausação*, nega a causalidade perseguida pelos realistas, afirmando de maneira

positiva apenas a existência e possibilidade de conhecimento de eventos regulares sucessivos (correlação entre fenômenos); iv) *antiexplicação*, rejeita a busca por especulações explicativas que vão além do que se pode extrair dos fenômenos v) *antientidades teóricas*, nega a existência de entidades abstratas inobserváveis e seu papel causal nas regularidades fenomênicas; vi) *antimetafísica*, que resulta da articulação dos cinco itens anteriores, a eliminação de qualquer consideração, referência ou proposição metafísica.

O programa filosófico de positivistas lógicos do Círculo de Viena, como Rudolf Carnap, intentavam “reduzir todos os conceitos científicos, por meio de definições estritas e logicamente irrebatíveis, a conceitos muito simples do tipo diretamente observacional” (MOULINES, 2020, p. 71). Buscava-se, por meio de dispositivos lógicos, criar uma linguagem científica que fosse metafisicamente neutra, reduzindo a linguagem científica a combinações de enunciados passíveis de verificação, eliminando qualquer tipo de confusão metafísica desprovida de significado (ibid. p. 70). Este pilar do positivismo lógico é chamado de *reducionismo*.

A partir da década de 1950, a dominância da abordagem empiricista começa a ruir com o surgimento de alternativas realistas, iniciando o que Psillos (2017) chamou de virada realista na filosofia da ciência. Segundo o autor, essa virada começa com o trabalho de 1950 de Herbert Feigl, que, ao contrário dos empiricistas lógicos, utilizava uma abordagem semântica de viés realista, no qual argumentava em favor da separação entre o que faz uma teoria ser verdadeira e suas evidências em favor de sua veracidade. Segundo ele, uma teoria pode gozar de condições de verdade que fazem referência a entidades ou processos inobserváveis, muito embora a própria evidência seja inevitavelmente observável. Então, segundo essa abordagem, se uma teoria científica é bem confirmada por evidências empíricas, há razões para acreditar que as entidades que ela formula realmente existam (ibid.).

Este argumento encontrou resistência por parte de ideias pró-instrumentalistas, como o teorema do lógico William Craig (1956), em que propunha que qualquer teoria pode ser substituída por outra que disponha apenas de seu vocabulário observacional. Putnam (1965) expõe as ideias essenciais por trás deste teorema: a totalidade da “linguagem da ciência” pode ser dividida entre duas classes de sentenças, isto é, as que envolvem termos teóricos (T) e as que envolvem termos observacionais (O). As sentenças dessa segunda classe são deduzidas a partir das sentenças axiomáticas da teoria em questão, mas envolvendo apenas termos com significados diretamente ligados à observação, fazendo com que as sentenças de O correspondam às “predições” de T, formando  $T_o$ , uma subteoria de T expressa apenas pelo seu vocabulário ob-

servacional. Assim,  $T_o$  possui todas as consequências e previsões observacionais de T, sem fazer menção a termos teóricos. Essencialmente, os termos observacionais seriam uma extensão das sistematizações dedutivas tornando todo o vocabulário teórico dispensável. Segundo Psillos, este teorema é tomado como a forma canônica do instrumentalismo, uma que dispensa todo o “excesso de conteúdo” das teorias científicas e as expressa apenas em termos de suas consequências experimentais e observacionais. Tal projeto reducionista foi concomitantemente empreendido por Carnap, que adotou essa ideia por parecer resolver o debate entre o realismo e o instrumentalismo, reduzindo os dois sistemas a uma mera escolha de linguagem, e ao mesmo, salvando o conteúdo empírico de uma teoria sem fazer referência a entidades inobserváveis (PSILLOS, 2017).

A partir da década de 1960, as posições realistas seguiram estratégias diferentes daquela da década anterior, passando de uma abordagem semântica para uma abordagem explicacionista. Psillos destaca as contribuições dos trabalhos de Hilary Putnam e suas objeções ao instrumentalismo baseado no teorema de Craig. Putnam (op. cit.) tece uma crítica a respeito da concepção de ciência geralmente adotada por positivistas ou empiristas (fazendo menção a herança das filosofias de Comte e Mach), segundo a qual o “objetivo da ciência” é dar previsões bem sucedidas dos fenômenos, ou fazer induções e deduções sistematizadas das sentenças observacionais. Nessa crítica, Putnam discorda que seja este o único objetivo da ciência e afirma que a visão sobre o “objetivo da ciência” não é heterogênea entre os cientistas, podendo eles concordar com os motes positivistas e empiristas, mas a maioria deles estão legitimamente interessados em estudar os objetos da ciência, ou seja, aqueles inobserváveis produzidos pelas teorias e pela sistematização de observações e experimentos.

Segundo ele, quando os cientistas se referem a “partículas elementares”, ou “vírus” é porque eles realmente “desejam” se referir a eles para que assim possam aprofundar o conhecimento sobre tais objetos, buscando explicar seus comportamentos e propriedades. Assim, ao eliminar os termos teóricos do vocabulário da ciência, estaria também eliminando quase toda a ciência. Putnam conclui que os termos teóricos não são desprovidos de significado, sugerindo que seja desarrazoada a afirmação de que o termo “partículas elementares” seja sem significado, assim como a palavra Deus, apenas por não poderem ser expressadas por meio de um vocabulário observacional. Estas críticas marcam uma posição bastante distinta daquelas associadas às correntes de pensamento antirrealistas, mais precisamente, descritivistas e fenomenalistas, ao ousar afirmar que os termos sem contrapartida diretamente observáveis ou perceptíveis pelos



sentidos não apenas gozam de significado, mas são o foco da atividade científica. O objeto de estudo das ciências não são, então, os fenômenos puramente tomados, mas sim as entidades teóricas e inobserváveis postuladas pelas teorias a fim de explicá-los.

Contra a doutrina empirista, Putnam formulou outro argumento que envolvia a relação entre as sentenças observacionais e as teorias que as produzem (PSILLOS, 2017). Segundo ele, as teorias são necessárias para o estabelecimento de conexões indutivas entre afirmações observacionais aparentemente não relacionadas. Para tecer tais conexões, os termos teóricos carregam propriedades particulares que são irreduzíveis a sentenças observacionais. Dentro deste quadro de pensamento, as entidades inobserváveis têm a função de causar os fenômenos captados pelos sentidos, de maneira que o cientista se esforça para conhecer em maior profundidade as propriedades destas entidades. Assim, “as categorias conceituais e linguísticas usadas pela ciência para se referir ao mundo são ajustadas de maneira a acomodar a estrutura causal do mundo” (ibid), posição radicalmente diferente dos positivistas e empiristas que evitam conferir qualquer valor de verdade, ou significado, às causas por trás dos fenômenos.

### 2.3.2 O Argumento do Milagre

A negação do instrumentalismo herdado das tradições do empirismo lógico é por vezes expressa como um dos principais motes dos realistas científicos (muito embora este não se resuma à negação daquele, sendo uma posição filosófica autônoma), como encontrado em Smart (1982) ao levantar a questão “O que é o realismo [científico]?” e respondendo que seria aceitar sem reservas, por exemplo, a existência de elétrons, postulados por uma teoria bem sucedida que verse sobre elétrons. As entidades inobserváveis às quais as teorias científicas se referem realmente existem e não podem ser reduzidas por afirmações sobre os efeitos sensíveis e observáveis que ocorrem nos fenômenos de interesse dessa teoria. Os realistas, afirma Smart, geralmente argumentam contra o instrumentalismo ao defenderem que o realismo é a única visão filosófica sobre a ciência que explica seu sucesso empírico, ao invés de apenas aceitá-lo como um “fato bruto”, como supostamente fariam os instrumentalistas. A objeção ao instrumentalismo pode ser formulada da seguinte forma (ibid): “Por que as coisas deveriam acontecer no nível macroscópico [i.e. observacional] como se existissem elétrons, neutrinos, e assim por diante, se realmente não existisse nenhum nível microscópico e se o discurso que aparentemente é sobre entidades microscópicas inobserváveis não fosse para ser tomado como verdadeiro?”. Seguindo essa ótica, as entidades inobserváveis são essenciais para a *explicação*

dos fenômenos, configurando o realismo científico (pelo menos aquela concepção defendida por estes autores em suas respectivas obras) como uma filosofia *explicacionista*.

Para além da visão de ciência que extrapola o mero descritivismo, o realismo científico reivindica não apenas o sucesso referencial (*genuinely refers*) das teorias (ou seja, as entidades inobserváveis postuladas pelas teorias encontram correspondência no mundo real), mas também alega explicar o inelutável sucesso empírico da ciência. Frequentemente este argumento é invocado pelos realistas (PUTNAM, 1975a,b; SMART, 1963; BOYD, 1984; MAXWELL, 2001 [1962]), afirmando que o realismo científico é a única filosofia que não torna o incrível sucesso da ciência um milagre, daí o nome “argumento do milagre” (ou, *no miracle argument*). A formulação mais referenciada do argumento do milagre é aquela desenvolvida por Putnam:

O argumento positivo para o realismo é o de que é a única filosofia que não faz do sucesso da ciência um milagre. Os termos em teorias científicas maduras tipicamente têm sucesso referencial (essa formulação é tributária a Richard Boyd), as teorias aceitas em uma ciência madura tipicamente são aproximadamente verdadeiras, Os mesmo termos tem a mesma referência mesmo quando ocorrem em teorias diferentes - essas afirmações são vistas não como verdades necessárias, mas como parte de uma teoria científica para o sucesso da ciência e, então, como parte de qualquer descrição adequada da ciência e sua relação com seus objetos. (Putnam, 1975 in (PSILLOS, 2005 [1999], p. 69).

Assim, o realismo científico pretende se apresentar como a única posição possível para entender o sucesso de teorias “maduras”, ou bem-sucedidas, julgando que elas descrevem verdadeiramente (ou aproximadamente) o mundo tanto em seus aspectos observáveis como inobserváveis. O sucesso da ciência em prever resultados e manipular a natureza, em diversas escalas (desde o uso das leis da mecânica clássica para manter em pé edifícios, pontes e toda sorte de produtos da engenharia, até a manipulação genética ou da microeletrônica no domínio submicroscópico) é tão espantoso, que este fato em si mesmo exige uma explicação (científica). O argumento do milagre, formulado dessa maneira, é uma inferência à melhor explicação para o *explanandum* (i.e. sucesso científico), tornando o realismo acerca das teorias e suas entidades uma *inferência à melhor explicação*, ou, um argumento abduutivo.

Formulando um argumento semelhante, Smart (1963), diferentemente da formulação Putnam-Boyd (como Psillos se refere), não utiliza o termo “milagre”, mas a “coincidências cósmicas”:

Não é estranho que os fenômenos do mundo são tais que fazem verdadeiras nossas teorias puramente instrumentais? Por outro lado, se interpretarmos uma teoria de maneira realista, então não há necessidade para tal coincidência cósmica: não é surpreendente que os galvanômetros e as câmeras de nuvens se comportam tal como o fazem caso realmente haja elétrons, etc., isso é justamente o que se deveria esperar. (SMART, 1963 in *ibid*).

Segundo Psillos, a diferença entre os dois argumentos vai além de uma mera escolha de palavras (milagres ou coincidências cósmicas). O argumento desenvolvido por Smart, faz apelo à *plausibilidade* do realismo científico, dado o sucesso preditivo das ciências, se mostrando a explicação mais intuitiva (SOUZA, 2015). É mais provável que as teorias bem sucedidas sejam, pelo menos, aproximadamente verdadeiras e que suas entidades teóricas realmente existam. Em relação ao instrumentalismo, uma visão realista é preferível por deixar menos coisas a serem explicadas, tornando-a pelo menos mais plausível e persuasiva intuitivamente. Em outras palavras, “a força desse argumento está em considerações intuitivas sobre o que é mais e o que é menos plausível. Ao passo que a do argumento do milagre na versão Putnam-Boyd está no reconhecimento de que ele é uma instância de um esquema de inferência: a inferência para a melhor explicação” (SOUZA, 2015, p. 114).

Semelhantemente, Maxwell (MAXWELL, 2001 [1962], p. 19-20) afirma que o fantástico sucesso empírico das ciências naturais é algo que pede uma explicação, e que considerar as teorias como “caixas pretas” ou “máquinas de prever resultados” torna o empreendimento científico incompleto, já que os cientistas se preocupam em descobrir as propriedades da natureza, da matéria e seus processos causais, não apenas prever e sistematizar os fenômenos observáveis por meio de ficções úteis, ou instrumentos calculatórios. Segundo o autor, a principal preocupação de um físico teórico, por exemplo, envolve as propriedades reais de partículas subatômicas, ao invés de meras predições sobre a intensidade de linhas espectrais. Neste sentido Maxwell concorda com Putnam (1965) ao endossar que os termos teóricos não podem ser eliminados uma vez que é realmente o desejo dos cientistas se referirem a eles. Para Maxwell, é indispensável que o esforço científico explique o porquê de os fenômenos serem como são (a partir da postulação de entidades e processos teóricos causais), assim como se faz igualmente necessária uma explicação de porquê estas teorias funcionam. Sua conclusão é a de que as teorias bem sucedidas já foram tão bem comprovadas a ponto de acreditarmos que as entidades às quais elas se referem realmente existem.

Não raro filósofos com atitudes realistas frente à ciência enfatizam a importância de mecanismos explicativos (processos subjacente aos fenômenos e dependentes de leis e sistemas conceituais) para os fenômenos naturais, sem os quais não há explanação. Estes mecanismos, segundo Bunge (2010 [2006], p. 178-211), seriam os processos que acontecem “atrás da telas”, ou seja, para além dos dados sensíveis que os instrumentalistas desejam apenas sistematizar e correlacionar. Para Bunge, o “carimbo da ciência moderna” é a *desvelação* dos mecanismos que se escondem atrás dos efeitos observados ou medidos. Para destacar a importância deste critério de cientificidade, o autor lança mão de vários exemplos de mecanismos explicativos: a evolução das espécies biológicas, cuja existência já se suspeitava desde antes de Darwin, é explicada por dois mecanismos explicativos, a herança modificada (associada às mutações genéticas em uma população) e a seleção natural (associada a fatores ambientais e de interação com outros organismos); a curvatura da luz ao passar perto de um corpo massivo *explicada* pela curvatura do espaço-tempo causado pela presença deste último; a emissão da luz foi *explicada* por Bohr a partir de mecanismos de desexcitação de átomos de níveis mais energéticos para menos energéticos; Descartes explicou o arco-íris por meio da refração da luz solar por gotículas de água suspensas no ar. Todas estas explicações, segundo essa linha de pensamento realista, sugerem que existe um mundo imperceptível pelos sentidos onde ocorrem os mecanismos (causais ou estocásticos). Em outras palavras, não conseguimos acessar diretamente a mudança das frequências de certos alelos em uma população, nem a curvatura no espaço-tempo, e assim por diante, mas todos estes mecanismos permitem que o cientista ou o técnico preveja fenômenos ou manipule estas entidades inobserváveis (pensemos, por exemplo, na engenharia genética, nas vacinas, no bombardeamento de elétrons em amostras laboratoriais, etc.) de maneira a alterar o mundo sensível. Essa linha de raciocínio remete ao já referenciado realismo de entidades de Ian Hacking, segundo o qual se é possível causar efeitos pela manipulação de entidades inobserváveis, então estas entidades existem. Bunge associa a falta de conhecimento sobre um domínio de fenômenos ou correlação de fenômenos justamente com a falta de mecanismos explicativos com um tipo de declaração comum em publicações científicas: “Infelizmente, não se encontrou nenhum mecanismo subjacente ao fato em questão” (ibid, p.184). Indo além e se opondo ao instrumentalismo, o descritivismo e o fenomenalismo, Bunge afirma que a mera correlação - estatística, por exemplo, entre o consumo de alguma substância específica e uma doença - entre dados não tem qualquer poder explicativo, mas indicam que é necessária uma explicação subjacente aos dados. Não basta, nem é seguro afirmar que tal substância *causa* certa doença, mas é

preciso chegar a um mecanismo que explique *como* essa substância causa a dada enfermidade.

Em concordância com Putnam, Maxwell, Boyd e outros filósofos que marcam a “virada realista” na filosofia da ciência, Bunge afirma que a ciência e a tecnologia moderna são atividades intrinsecamente realistas. Por trás dessa defesa da importância de mecanismos explicativos repousa o argumento do milagre, uma vez que o sucesso preditivo, de manipulação, e de transformação da realidade perceptível conta como forte indício de que estes processos e entidades que participam do mecanismo sejam pelo menos aproximadamente reais e desempenham de fato os papéis previstos pelos modelos explicativos. Reforçando essa visão, Bunge chega a afirmar que o realismo não é opcional para um físico experimental, um engenheiro eletrônico, ou um diretor de um acelerador de partículas. Todos eles confiam na existência de elétrons, fótons e outras entidades teóricas mesmo quando estas não estão sendo observadas, ou medidas, desafiando a lógica empirista (ibid. p. 113), justamente porque tudo ocorre como se eles existissem e além disso, desempenhando o papel que as teorias lhes atribuem.

### 2.3.2.1 Refinando o argumento: novidades preditivas

Com o intento de refinar o argumento do milagre e tornar mais convincente a defesa do realismo científico, Musgrave (1988) e (1997) Leplin argumentam que a maneira mais promissora de formular uma visão explicacionista do sucesso da ciência seria focar em qual tipo de sucesso empírico realmente reforça essa posição filosófica. Segundo eles, o realismo científico é fortalecido pelo fato de que, ao longo da história, algumas teorias científicas previram fenômenos novos, derivados de consequências da teoria. Estas classes de fenômenos correspondem a resultados inesperados e desconhecidos no contexto de formulação da teoria, cujas explicações não eram seu objetivo. Essa novidade preditiva goza de independência em relação à gênese da teoria, de maneira que este sucesso empírico não foi “encomendado” em seu desenvolvimento, ganhando o status de *descoberta*. Assim, um realista pode argumentar que este fato necessita de uma explicação especial que seja mais satisfatória do que uma interpretação instrumentalista dessa teoria. Se um esquema teórico consegue prever com sucesso um fenômeno até então impensado, então essa teoria deve nos dizer algo positivo sobre a realidade.

Para entendermos melhor o valor deste argumento, invocaremos agora a comparação entre duas teorias: a teoria do calórico, que buscava explicar os fenômenos térmicos, e a teoria ondulatória de Fresnel que, apoiada na ideia de éter luminífero, buscava explicar, entre outros fenômenos, a difração da luz.

A teoria do calórico foi largamente utilizada entre os séculos XVIII e XIX para explicar fenômenos térmicos, tendo se consagrado como uma das mais importantes teorias de fluidos imponderáveis, que marcaram a visão de mundo da época. Muitos estudos de caso deixam claro sua ampla aceitação e sucesso em explicar os fenômenos a ela pertinentes, bem como suas propriedades e como foi aos poucos sendo abandonada (FOX, 1974; MORRIS, 1972; BROWN, 1950; CHANG, 2014; KUHN, 1958). O calórico, como foi chamada por Lavoisier a substância que carregaria a qualidade do calor, seria um fluido elástico, imponderável, autorrepulsivo cujas partículas seriam muito menores e mais sutis que as partículas que comporiam a matéria comum (ponderável), e por ela seria fortemente atraída por meio de forças centrais à distância. Sem entrar em muitos detalhes, as propriedades do calórico eram ajustadas de forma a dar conta de um grande domínio de fenômenos térmicos, explicando: a lei fundamental da calorimetria, o equilíbrio térmico, transições de fases, dilatação dos corpos aquecidos, expansões adiabáticas, os calores específicos dos gases, entre outros. Em suma, as propriedades do calórico eram articuladas de maneira a dar explicações passíveis de serem aceitas dentro dos padrões de cientificidade da época e dos programas de pesquisa em voga <sup>1</sup>.

Apesar de, em boa medida, se adequar aos fenômenos térmicos já conhecidos e aos fenômenos e experimentos em pleno desenvolvimento e investigação (como as medidas dos calores específicos dos gases, Chang (2014)), provendo uma imagem e intuição minimamente convincente sobre boa parte seu domínio de relevância, a teoria do calórico nunca teve o poder preditivo de se antecipar aos efeitos já conhecidos. Utilizando a terminologia de Lakatos (1970), a teoria calorista seria parte de um programa de pesquisa degenerativo (ao invés de progressivo, ou seja, aquele programa que se antecipa à ciência experimental, prevendo novidades teóricas) estando sempre “correndo atrás” dos fenômenos já conhecidos.

Este caráter degenerativo da teoria do calórico é contraposto pelo caso da progressividade da óptica de Fresnel, que é comumente referenciada como um exemplo de sucesso empírico e por ter, de alguma maneira, capturado algum nível de realidade sobre a natureza da luz.

Entre o final do século XVIII e o início do XIX, a ótica era, junto à mecânica celeste, a área das ciências naturais que mais despertava o interesse dos cientistas franceses (principalmente os parisienses) (PIETROCOLA, 1995). Neste contexto, a teoria gravitacional de Newton,

---

<sup>1</sup>Sobre a física dos fluidos imponderáveis, o programa Laplaciano de forças centrais ver, respectivamente, Pancaldi, (2014) e Fox (2014)

baseada no conceito de forças centrais que agem à distância entre os corpos celestes, era entendida como modelo de cientificidade, pelo seu sucesso empírico e rigor matemático sem precedentes. Sob a liderança de Laplace, a Academia de Ciências de Paris dedicou grandes esforços para a expansão do domínio de aplicabilidade da visão newtoniana de mundo (ou visão astronômica da natureza, como referido por Abrantes, 1998). O programa laplaciano (FOX, 1974, 2014) buscava estender os métodos da mecânica celeste aos fenômenos naturais associados às áreas ainda pouco desenvolvidas das ciências naturais (em comparação com a astronomia e a mecânica), como o magnetismo, os fenômenos térmicos, as reações químicas, a capilaridade, entre outros (ABRANTES, 1998). Foi na ótica que o programa laplaciano rendeu suas contribuições mais frutíferas, se tornando a área da física que mais se desenvolveu, tanto em termos teóricos quanto experimentais. Além do mais, a ótica era de especial interesse por viabilizar a pesquisa astronômica, de maneira que as próprias questões relacionadas à astronomia por vezes faziam suscitar questões sobre a natureza da luz (PIETROCOLA, 1995), como veremos no capítulo seguinte no caso das observações da aberração estelar.

Antes da teoria ondulatória se tornar a mais bem sucedida teoria da luz, a ótica corpuscular laplaciana gozava de grande prestígio no meio da ciência parisiense. Entretanto, essa teoria enfrentava problemas ao explicar os efeitos de difração e interferência, que ganharam certa notoriedade pelos trabalhos de Young, na primeira década do século XIX, que fizeram, em alguma medida, ressuscitar o interesse por uma teoria vibracional da luz, baseada no meio etéreo que permitiria a propagação da luz (BASSALO, 1988). Naquele contexto, a falta de explicação à interferência luminosa não era considerada um grande empecilho à teoria corpuscular, uma vez que era o único fenômeno que lhe escapava quantitativamente, mas em 1817, a Academia ofereceu publicamente um prêmio ao trabalho que explicasse a difração de maneira bem-sucedida. Augustin Fresnel, engenheiro civil da École Polytechnique que já se dedicava há alguns anos a desenvolver a teoria ondulatória da luz, concorreu ao prêmio com seu trabalho no qual propunha uma teoria matemática para a difração, com o uso das *integrales de Fresnel*, como se convencionou chamá-las nos livros textos. Poisson era um dos membros do comitê de Julgamento, juntamente com outros importantes cientistas, Biot, Arago, Gay-Lussac, além do influente Laplace (BASSALO, 1989). Por meio de cálculos deriváveis da teoria de Fresnel, Poisson mostrou que, caso aquela formulação da teoria ondulatória estivesse correta, deveria ser formado um ponto brilhante no centro da sombra formada pela iluminação de um pequeno disco opaco e circular. Tal fenômeno jamais havia sido observado, ou teorizado até então. Algumas

reconstruções históricas afirmam que Poisson, que era partidário da teoria corpuscular da luz, desejava mostrar que tal previsão era um absurdo (ibid.), ou pelo menos, extremamente improvável e que não se concretizaria mediante experiência. Arago, que mantinha correspondências e boa relação com Fresnel, se comprometera a realizar o experimento, de maneira a dar razão ou não à suposta objeção de Poisson. O resultado experimental favorecia a teoria fresneliana, ao fazer aparecer o ponto luminoso teorizado por Poisson, garantindo o prêmio à Fresnel.

O sucesso da teoria fresneliana do éter luminífero permitia que seus defensores alegassem que essa era uma evidência impressionante em seu favor (LAUDAN, 1981b), algo que os defensores da teoria do calórico jamais puderam reivindicar, por essa última ter tido apenas a capacidade de “salvar os fenômenos”.

Segundo Laudan, a epistemologia Iluminista, que remonta ao triunfo da física newtoniana, foi marcada por uma crescente antipatia por hipóteses e especulações, advogando pela exclusão de quaisquer entidades ou processos teóricos, em favor dos aspectos estritamente observacionais, seguindo correntes empiricistas de Hume, Berkeley e a máxima newtoniana “*hypothesis non fingo*”. Essa epistemologia recebida entrava em choque com a crescente teorização dos fluidos imponderáveis e as teorias de éter. Alguns filósofos falhavam em perceber a tensão entre a tradição teórica do éter e a epistemologia dominante, mas alguns advogavam contra a supostamente inócua inclinação a postular hipóteses, defendendo uma espécie de filosofia natural empírico-indutivista, enquanto outros afirmavam que essa não esgotava as possíveis metodologias de investigação da natureza, defendendo o método das hipóteses, alegando inclusive sua inevitabilidade dentro da prática científica (ibid.). Durante os anos de 1820 e 1830, proponentes do método hipotético articularam uma distinção entre hipóteses “artificiais” e legítimas, marcada pelo critério de que essa deva explicar não apenas o que já sabido, mas deve ir além do alcance experimental dentro do qual ela foi arquitetada. Caso a hipótese prediga resultados não usuais ou surpreendentes, então ela perde sua artificialidade e ganha razões para a crença justificada.

Laudan afirma que este critério foi particularmente desenvolvido por John Herschel e William Whewell, e minou o mote empiricista de que o método hipotético era logicamente falacioso. Herschel se referia a teoria ondulatória de Fresnel como um exemplo de uma teoria sólida, capaz de explicar todos os fenômenos óticos relevantes e ainda antecipar fenômenos desconhecidos, como o efeito previsto por Poisson. Para Whewell, a teoria de Fresnel, ao lado da gravitação de Newton seriam casos exemplares de teorias que contemplam o critério da no-



vidade preditiva, conferindo a elas a *probabilidade* de serem teorias verdadeiras. Whewell faz apelo à implausibilidade de coincidências frente aos resultados novos e positivos, se assemelhando à abordagem de Smart:

Nenhum acidente poderia dar origem a tal extraordinária coincidência. Nenhuma falsa suposição poderia, mesmo que depois de ser ajustada a uma classe de fenômenos, representar exatamente uma classe diferente, na qual a concordância era imprevista e inopinada (Whewell, 1837, apud MUSGRAVE, 1988, p. 232).

Neste breve estudo de caso, vemos que a relevância das novidades preditivas é muito mais antiga do que os trabalhos de Lepin e Musgrave, e foi pedra angular para a defesa de uma visão epistemicamente otimista e próxima a atitudes realistas, uma vez que rejeitava posições estritamente empírico-indutivista e defendia a criação de hipóteses. A teoria do calórico foi substituída em benefício de uma visão mecânica, ou vibracional do calor, ao passo que a teoria ondulatória continua válida (muito embora hoje em dia não se acredite na existência do éter). De acordo com a visão de Herschel e Whewell, é bastante razoável afirmar que a teoria de Fresnel é mais *poderosa* do que a teoria substancialista do calor, dado que aspectos mais importantes da primeira foram mantidos em teorias posteriores do que a segunda. A forma de propagação da luz (propagação ondulatória) foi mantida nas teorias que sucederam a teoria fresneliana, bem como alguns princípios utilizados para articular a teoria de maneira a explicar os fenômenos de reflexão e refração, a saber, o princípio da conservação de energia, ou *vis-viva*, como se referia Fresnel (PSILLOS, 2005 [1999]), conferindo a essa teoria maior confiança do que a teoria calorista. Estes pontos, bem como a questão da qualidade dos elementos de continuidade que atravessam as mudanças científicas serão discutidos mais adiante.

Revisitando o argumento do milagre, os realistas pensam que seja bastante razoável defender que a teoria de Fresnel capturou de alguma maneira elementos da realidade intrínseca da natureza da luz, dada sua adequação empírica e capacidade de predizer efeitos até então impensados. Esse otimismo se estende a várias teorias da ciência moderna, como a relatividade geral, que previu a curvatura da luz baseando-se na curvatura do espaço-tempo nas proximidades de corpos massivos; a teoria de Dirac que previu a existência de anti-partículas; a teoria heliocêntrica de Copérnico previa as fases de Vênus; entre muitas outras.

Entretanto, o argumento do milagre e o realismo científico, de maneira geral, continuam enfrentando importantes contrapontos, como o famoso argumento da metaindução pessimista, cuja formulação mais referenciada é a de Laudan em sua confutação do realismo convergente

(1981a). Mas, antes de examinarmos estes argumentos, vamos discorrer um pouco sobre algumas consequências do argumento do milagre na versão de Putnam-Boyd e encaminhar alguns problemas em sua concepção e dificuldades enfrentadas por essa visão do realismo científico.

### 2.3.2.2 Continuidade teórica e alguns problemas

A concepção de realismo científico, como sistematizado por Putnam e Boyd, incorporam três teses (PSILLOS, 2017): i) termos teóricos se referem a entidades inobserváveis; ii) teorias são (aproximadamente) verdadeiras; iii) há continuidade referencial através de mudanças teóricas.

A tese i) implica no realismo semântico bem como no realismo ontológico (metafísico), uma vez que aceita como real a imagem de mundo proposta por tais teorias. Ao aceitar sua existência, assume-se que os termos teóricos *genuinamente se referem* (“*theoretical terms genuinely refers*”, *ibid.*).

A tese ii) envolve o conceito de verdade das teorias científicas, mais precisamente o conceito de verdade por correspondência, isso é, as asserções teóricas, suas entidades e processos inobserváveis *correspondem* à realidade externa. Mais precisamente, os realistas atribuem às teorias científicas uma *aproximação à verdade* e essa aproximação deve explicar o seu sucesso empírico. Como já dito anteriormente, os realistas não esperam que as teorias científicas sejam estritamente verdadeiras. Pelo contrário: para o realista científico crítico todas as teorias são estritamente falsas, entretanto isso não significa que as teorias não sejam altamente verossimilhanças (NIINILUOTO, 1999, p. 139). O apelo à verossimilhança é um argumento recorrente para os realistas e pode ser definida de várias maneiras, mas por questões de brevidade vamos utilizar a “abordagem intuitiva” de (PSILLOS, 2005 [1999], p. 266-9). Ela nos diz que a verdade deve ser interpretada em termos de adequação, ou ajuste, de uma teoria, lei, afirmação ou descrição aos fatos, sob condições específicas de aproximação. Em suas palavras: “Uma descrição  $D$  se ajusta aproximadamente a um estado  $S$  (i.e.  $D$  é uma verdade aproximada de  $S$ ) se há um outro estado  $S'$ , de maneira que  $S$  e  $S'$  estão ligados por condições específicas de aproximação, e  $D$  se ajusta a  $S'$  ( $D$  é uma verdade de  $S'$ )” (pp. 268). Niiniluoto (1999, p. 141-2) ilustra essa abordagem comparando a lei da queda livre de Galileu e a lei da gravitação universal de Newton. Partindo das equações de movimento newtonianas e fazendo uma série de aproximações (como por exemplo, a altura da queda do corpo ser muito menor que o raio da

Terra) recaímos na equação de Galileu  $y(t) = -gt^2/2$ . Se tais aproximações forem adequadas ao problema, a equação se ajusta satisfatoriamente à verdade. Caso o problema envolva alturas comparáveis ao raio da Terra, as leis de Newton se mostrarão mais verossímeis do que a lei de Galileu.

A tese iii), que diz respeito à continuidade referencial, implica na convergência progressiva da adequação das teorias físicas aos seus objetos. Isso significa que teorias que sucedem umas às outras se referem aos mesmos objetos e, através da mudança teórica, se conquista uma melhor explicação sobre aquele objeto (PUTNAM, 1975a). Putnam exemplifica essa posição com a mudança teórica da gravitação de Newton para a gravitação da relatividade geral. A primeira alcança uma explicação parcialmente correta/parcialmente incorreta dos mesmos objetos de estudo da segunda, isto é, “o campo gravitacional ou a métrica do espaço-tempo”. Entretanto, segundo Putnam, a teoria de Einstein provê melhores explicações para estes mesmos objetos, ou seja, o percurso histórico e conceitual entre as duas teorias resultam em uma convergência a explicações e descrições *mais reais* sobre os objetos alvo do discurso teórico.

A ideia de que a ciência converge cada vez mais para descrições mais verdadeiras sobre o mundo foi abalada pela já comentada obra de Thomas Kuhn, *A Estrutura das Revoluções Científicas*. Nela o autor defende que a ciência avança descontinuamente, por meio de mudanças radicais da visão de mundo científica, as mudanças paradigmáticas. A introdução do conceito de incomensurabilidade, que diz que termos de diferentes paradigmas não podem ser formalmente comparados, pois operam com ideias e conceitos inconcebíveis um para o outro. Ou seja, “o mesmo termo não pode ter o mesmo referente em diferentes paradigmas” (PUTNAM, 1975a). Em certo ponto de seu livro, Kuhn (2013 [1962], p. 188-92), assim como Putnam, usa o caso da mudança científica entre a mecânica newtoniana e mecânica relativística para argumentar que, em casos limite, a primeira não é recuperada pela segunda, ou é recuperada apenas de “maneira espúria”. Para justificar, considerou que a teoria da relatividade possa ser expressa por um conjunto de proposições  $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ . Para obter a mecânica newtoniana a partir da relatividade, deve-se adicionar às proposições a condição  $(v/c)^2 > 1$ , ou seja, restringindo o “âmbito dos parâmetros e variáveis”. Com essa limitação, segundo o autor, gera-se um novo conjunto de proposições,  $N_1, N_2, N_3, \dots, N_m$ , cuja forma é idêntica às leis no movimento e da gravitação de Newton e foram, aparentemente derivadas da mecânica einsteiniana. Kuhn defende que essa derivação é apenas aparente, pois não são, de fato, as leis de Newton, mas no máximo reinterpretações delas sob a ótica relativística, inconcebíveis dentro do sistema teórico

newtoniano. Embora os parâmetros como massa, posição, tempo, etc., ocorram tanto em  $E_i$  quando  $N_i$ , os “referentes físicos destes conceitos não são de modo algum idênticos”. Kuhn dá a entender que a “derivação espúria” apenas mostra que as leis de Newton são aplicáveis em seu domínio de pertinência. Uma vez que a teoria relativística opera com conceitos impensáveis dentro do esquema teórico de sua antecessora, seus conceitos são radicalmente intraduzíveis, incomparáveis, *incomensuráveis*. As revoluções científicas, como defende Kuhn, trazem mudanças de *gestalt* sobre a visão de mundo dos cientistas, de maneira que os sucessivos paradigmas são radicalmente irreconciliáveis no que diz respeito a interpretações dos conceitos físicos e das causas dos fenômenos. Assumindo essa visão, não poderíamos dizer que forças de ação à distância *convergem* para a curvatura do espaço-tempo, uma vez que ambas as explicações para os efeitos gravitacionais estão associadas a diferentes visões de mundo e de ciência, principalmente no domínio ontológico.

Segundo Hacking (2012 [1983], p. 66) essa obra levou a uma crise da racionalidade científica, e a dúvidas sobre o realismo. Se sistematicamente nossa visão de mundo muda, será que vivemos em um mundo diferente? Se as revoluções trazem mudanças radicais, será que não há progresso em direção à verdade? Há um mundo real?<sup>2</sup>

O realismo convergente e a teoria da verdade por correspondência encontram outros desafios, como o “*principle of no privilege*” (traduzindo livremente, princípio do não-privilégio) defendido por Mary Hesse (1976, p. 264), segundo o qual “as teorias correntes são tão suscetíveis a sofrerem mudanças radicais quanto as teorias do passado”. Segundo Hesse (ibid. p. 266), toda teoria científica se baseia em um sistema conceitual que envolve entidades e processos fundamentais, isto é, uma “ontologia fundamental” cuja formulação e articulação intenta responder a pergunta “do que o mundo é feito”. O desafio ao realismo consiste no fato de que essa base ontológica é o aspecto teórico mais suscetível a passar por mudanças teóricas radicais. Hesse não tem interesse em assumir o “velho positivismo”, sob o qual a ciência avança pela acumulação de sentenças observacionais que mantêm seu valor de verdade através de mudanças teóricas. Pelo contrário, a autora busca, entre outros objetivos, uma defesa do realismo científico e do progresso cognitivo da ciência mesmo assumindo o princípio do não privilégio. Não será nosso objetivo nos aprofundar nas teses de Hesse, mas voltaremos a este problema sob outra lente filosófica, a do realismo estrutural. No momento vamos nos ater a objeções

---

<sup>2</sup>Todas as questões levantadas por Hacking são de fundamental relevância caso se queira pensar o significado do *tenet* de McCommas sobre processos revolucionários na ciência.

ao realismo convergente e a continuidade referencial, mais especificamente o argumento da metaindução pessimista como sistematizado por Larry Laudan.

### 2.3.3 O Argumento da Meta-indução pessimista

O argumento do milagre sugere que o realismo científico é uma hipótese empírica para explicar o sucesso da ciência. Segundo Laudan, uma vez que doutrinas epistemológicas podem ser testadas, é possível que certas teorias epistêmicas sejam refutadas, em vez de confirmadas. Assim, o objetivo do autor em seu famoso artigo foi mostrar que o realismo convergente não é corroborado, nem adquire sentido via uma avaliação histórica da ciência. O autor utiliza um argumento de cunho histórico para criticar certas posições epistêmicas, que, segundo ele, os realistas tendem a adotar. Para precisar sua crítica, e evitar a luta contra moinhos de vento, Laudan (1981a, p. 20-1) expõe as teses realistas que pretende criticar:

- “R1) Teorias científicas (pelo menos nas ciências ‘maduras’) são, tipicamente, aproximadamente verdadeiras e as mais recentes estão mais perto da verdade do que teorias mais antigas do mesmo domínio;
- R2) Termos observacionais e teóricos das ciências maduras genuinamente se referem (em linhas gerais, há substâncias no mundo que correspondem a ontologia presumida pelas nossas melhores teorias);
- R3) Teorias sucessivas em qualquer ciência madura preservarão as relações teóricas e os aparentes referentes das teorias mais antigas (ou seja, teorias antecessoras serão ‘casos limite’ de suas sucessoras);
- R4) Novas teorias aceitáveis devem explicar por que sua predecessoras foram bem sucedidas”

A conclusão que o realista obtém a partir destas quatro teses é a de que “as teorias científicas ‘maduras’ devem ser bem-sucedidas” e “essas teses constituem a melhor, e talvez a única explicação para o sucesso da ciência” (ibid.). Assim, o sucesso empírico da ciência é uma confirmação empírica para o realismo. Laudan nomeia este conjunto de teses e a conclusão de realismo epistemológico convergente, de maneira que o progresso do sucesso da ciência se torna um milagre caso este sistema de afirmações seja falso. Em suma, os conceitos de “referência” e “verdade” adquirem o papel de explicação causal na epistemologia realista, formando seus conceitos chave. O objetivo de Laudan é lançar dúvidas sobre estes alicerces.

As primeiras críticas de Laudan são dirigidas mais diretamente ao realismo científico de Putnam, que valoriza o suposto sucesso referencial das teorias, à época, atuais. O autor deseja pôr em dúvida a estreita relação entre referência e sucesso das teorias científicas, dando exemplos de teoria que genuinamente se referem, em um realismo *a la* Putnam, mas que atualmente são consideradas falsas. Laudan afirma que o átomo de Dalton, os elétrons de Bohr, a massa de Newton ou os genes de Mendel são entidades que gozam de sucesso referencial segundo o próprio Putnam, mas ocorrem em teorias que falham em importantes aspectos, a ponto de ser possível afirmar que possuem maior conteúdo de falsidade do que de verdade. Em outras palavras, embora aceitemos até hoje a existência de átomos, elétrons ou genes, pode-se afirmar que a descrição das propriedades e interações dessas entidades dadas pelas teorias listadas são em sua maioria falsas. Assim, Laudan mostra que é falsa a afirmação de que teorias que façam referência a entidades teóricas sejam necessariamente bem-sucedidas.

Entretanto, uma defesa da existência de entidades teóricas pode ser feita de maneira mais comedida, afirmando que “as teorias cujos termos *referem* geralmente (mas nem sempre) são bem-sucedidas” (ibid. p. 25). Mesmo formulada dessa maneira, Laudan continua invocando teorias atômicas do passado, afirmando que foi necessário mais de 2000 anos de especulação sobre a natureza atômica da matéria até que pudesse se obter uma teoria realmente bem-sucedida. Semelhante histórico de fracassos marcaria, para o autor, as teorias cinéticas do calor. A argumentação de Laudan procura provar que a história das ciências mostra que teorias que fazem referência a termos teóricos são em sua grande maioria marcadas mais pelo fracasso do que por sucesso, tornando implausível, então, até uma formulação mais fraca e prudente da conexão entre a referência e sucesso.

Em contraposição a essa argumentação, Laudan lança um possível contra-argumento realista bastante razoável, segundo o qual a referência não implica no sucesso da teoria, mas podemos inferir a existência das entidades centrais de teorias que gozam de sucesso empírico (mais fiel à formulação do argumento do milagre exposta nas seções anteriores). O contraponto que Laudan apresenta é a possibilidade de encarar teorias historicamente bem-sucedidas, como a teoria do flogisto na química, as teorias de éter da ótica e do eletromagnetismo, entre outras, como genuinamente não-referentes. Algumas dessas teorias são inclusive verdadeiros exemplares de sucesso, lembrando que a teoria óptica de Fresnel (apoiada do éter luminífero) previu fenômenos novos, até então desconhecidos, como o já referido ponto luminoso de Poisson. Em adição, Laudan afirma que o éter de Maxwell foi uma das entidades teóricas que mais gozou de

confiança entre os físicos em toda a história da filosofia natural. Estes exemplos configuram um forte golpe à confiança realista em relação à referência dos termos teóricos, uma vez que podemos identificar termos genuinamente não-referentes em teorias exemplarmente bem-sucedidas. Esses argumentos minam em boa medida a possibilidade de explicar o “milagroso” sucesso da ciência por meio da referência, enfraquecendo consideravelmente a tese R2. Mediante o exame histórico da ciência, tal tese é relativizada, tornando mais tênue a ligação entre sucesso e referência.

Independente da confiança referencial que certos realistas detêm, o realismo epistemológico costuma defender que uma teoria, mesmo que seja estritamente falsa, se aproxima da realidade ou guarda verossimilhança com o mundo externo, de maneira que se uma teoria tem sucesso explicativo, ela provavelmente se aproxima da verdade. Apesar de Laudan não descartar que a aproximação da verdade explique o sucesso das teorias científicas, ele aponta que nenhum autor realista jamais deu uma explicação satisfatória, ou uma definição rigorosa sobre o que significa essa aproximação, ou no que consiste a verossimilhança das teorias. Mas, mesmo se aceitarmos estes conceitos, não se pode garantir que o sucesso explicativo das teorias impliquem em aproximação à verdade. Ao longo da argumentação, Laudan aproxima a verossimilhança à capacidade que as teorias têm em *genuinamente se referir*. Se não existir átomos, genes ou partículas sub-atômicas, nenhuma teoria que verse sobre essas entidades pode ser considerada aproximadamente verdadeira. Segundo ele, nenhum realista teria uma atitude otimista frente a teorias cujas entidades centrais *não se referem a entidades reais*. Para reforçar seu argumento, Laudan compõe uma lista de teorias que já foram consideradas bem-sucedidas empiricamente e preditivamente, mas que são *genuinamente não-referenciais*: a teoria do calórico; a teoria do flogisto; das esferas cristalinas da astronomia pré-copernicana; a teoria da geração espontânea; a teoria dos eflúvios da eletrostática; entre outras, entre as quais poderia até se adicionar a mecânica newtoniana, e podendo-se estender a lista “*ad nauseam*”.

A partir de seus argumentos e análise histórica, Laudan tira uma série de conclusões que supostamente debilitam consideravelmente a confiança no realismo epistêmico convergente, dentre elas: o sucesso empírico e preditivo (inclusive novas predições) não garante que a teoria se refira a entidades que realmente existam no mundo; os realistas falham em explicar por que teorias falsas cujos termos não se referem a entidades reais podem ser bem-sucedidas; o conceito de verdade aproximada é vago demais para explicar o sucesso das ciências; os realistas deixam também inexplicado o porquê de o sucesso empírico implicar necessariamente no

fato de a teoria ser verdadeira. Assim o sucesso de uma teoria não garante que a imagem de mundo que ela tece seja verdade, ou aproximadamente verdade e nem que seus termos centrais se refiram de maneira correta à entidades que realmente existam independente dos sujeitos cognoscentes. Laudan deixa a entender que se isto pode ser afirmado para as boas teorias do passado, é razoável acreditar as nossas melhores teorias atuais tenham o mesmo destino: sejam consideradas falsas e suas principais entidades descartadas, provando-as *não-referenciais*. Essa metaindução<sup>3</sup> se tornou um dos principais argumentos contra o realismo científico, e o artigo de Laudan segue como um dos trabalhos mais referenciados (entre realistas e anti-realistas) dentro deste debate filosófico. Todas as possíveis defesas do realismo científico devem levar em consideração a força do *argumento da metaindução pessimista*, como ficou conhecido.

Há muitas estratégias para se resistir à indução pessimista, e algumas tarefas parecem obrigatórias a qualquer defesa realista frente à ciência. Uma delas, sugerida por Psillos (2005 [1999], p. 98-9) é a de que as discontinuidades da ciência não são tão radicais como Laudan sugere (ou como Thomas Kuhn defende), nem são tão amplas de maneira que a visão de mundo da ciência se torna irreconhecível através das revoluções científicas; há elementos estáveis da ciência que resistem à mudanças científicas; há uma rede de asserções teóricas que garantem, em algum nível, que a nossa explicação sobre como o mundo é tenha valor objetivo e nos permite de alguma maneira conhecê-lo.

Tentaremos mostrar como essas tarefas podem ser realizadas, ao menos parcialmente, a partir da ótica de uma forma específica do realismo científico, o realismo estrutural. Buscamos tornar mais sólida uma defesa do realismo epistemológico e como este plano teórico pode fortalecer a defesa do realismo científico crítico, levando em consideração as importantes implicações da metaindução pessimista, mas sem perder de vista o valor objetivo da ciência e a sua capacidade de “aprofundar” nosso conhecimento sobre o mundo, dando forma a uma defesa do progresso da ciência.

---

<sup>3</sup>O conceito ganha esse nome por ser uma indução a respeito da indução da existência real dos termos teóricas. A partir da história da ciência, Laudan induz que as nossas atuais induções sobre a existência das entidades inobserváveis das teorias do presente serão abandonadas no futuro, assim como foram as do passado. Por isso, uma metaindução.



## 2.4 Realismo Estrutural

Uma das principais consequências do argumento da metaindução pessimista é a refutação da teoria da verdade por correspondência e da continuidade referencial, pontos cruciais para o realismo de Putnam-Boyd. Estas importantes objeções de cunho anti-realista baseadas na história das ciências expostos na seção anterior aniquilam qualquer possibilidade de se argumentar que o conhecimento científico é *integralmente* cumulativo. Com alguma frequência, algumas concepções teóricas são abandonadas e a imagem que a ciência tece sobre a natureza (visão de mundo) muda consideravelmente.

Diante dessas constatações, persistem as principais questões a respeito do estatuto cognitivo das ciências: o que elas nos revelam sobre a natureza íntima do mundo? Por que a ciência goza de tamanho sucesso empírico e manipulativo? Logicamente, novas questões emergem: ainda é possível adotar posições realistas ontológicas defensáveis? Em outras palavras, a ciência é capaz de revelar a *mobília do mundo*, ou seja, do que ele é feito? O que há de *real* nas representações teóricas produzidas pelas ciências naturais? Existe alguma forma de aproximação à verdade? Ou será que os esforços da atividade científica são, na melhor das hipóteses, recompensadas apenas com a possibilidade da adequação empírica? Se as mudanças científicas são radicais (merecem amplamente a alcunha de *revoluções científicas*), é possível defender de alguma forma o progresso da ciência? É possível reconhecer elementos de continuidade através das revoluções científicas?

Evidentemente não proveremos respostas para estas questões, mas elas permearão nossa discussão conforme refletimos principalmente a respeito das duas últimas com o auxílio do referencial teórico provido pelo realismo estrutural.

Em linhas gerais, o realismo estrutural pode ser considerado uma corrente de pensamento antirrealista no domínio ontológico e em princípio cético em relação às entidades teóricas. Então, segundo este pensamento, qual parte das teorias científicas é real? O realismo estrutural valoriza a conexão entre os termos teóricos em detrimento da possibilidade de se conhecer este objeto isoladamente, ou conhecê-lo como *coisa em si*. É uma visão que nos diz que as teorias científicas provêm sistematizações verdadeiras da realidade, mas não sua natureza íntima. Ao invés disso, nos diz respeito à estrutura da natureza. Se as teorias são bem-sucedidas em mapear a estrutura do mundo, então isso explicaria o tremendo sucesso empírico da ciência, o que acomoda o argumento do milagre (CHAKRAVARTTY, 2004). Ou seja, é uma atitude realista no domínio estrutural e formal das teorias.

Michel Redhead (2001a, p.74) resume o que entende como estrutura e estruturalismo na ciência: “Informalmente a estrutura é um sistema de elementos relacionados, e o estruturalismo é o ponto de vista que foca sua atenção nas relações entre os elementos como distintos dos próprios elementos em si.” Em suma, pode-se dizer que, para o realista estrutural, a ciência se aproxima da realidade (ou se aprofunda nela) conforme se tece mais e mais relações verdadeiras entre as entidades científicas, sem se comprometer com a realidade íntima destas.

No quadro filosófico do realismo estrutural, o significado dos termos teóricos, tema que ocupa a filosofia da ciência desde pelo menos os positivistas lógicos, ganha outros contornos, diferentes daqueles dados pelo realismo científico tradicional. Exemplificando, segundo um estruturalista, a teoria eletromagnética não nos diz *o que é* o campo elétrico, mas sim como essa entidade se relaciona com os demais objetos da teoria, como cargas, correntes de deslocamento, etc. Se essa forma de realismo se dirige à *forma*, à *estrutura* das teorias, isto sugere um abandono do compromisso em relação às referências putativas das teorias aos seus objetos (LADYMAN, 1998, p. 410).

Este fundamental aspecto do realismo estrutural o distancia tanto das teorias da referência assumidas pelos realistas tradicionais quanto das teorias do significado dos termos teóricos dos positivistas lógicos e de alguns tipos de instrumentalistas reducionistas. Os primeiros admitiam uma espécie de teoria da verdade por correspondência, ao argumentar que termos como “vírus”, “estrelas de rádio” e “partículas elementares” realmente correspondem a objetos que existem na natureza, que gozam de todas as propriedades a elas conferidas pelas respectivas teorias. Já o segundo grupo assumia que os termos teóricos não dispõem de qualquer significado intrínseco, buscando reduzi-los a sentenças que dependessem apenas de termos observacionais, essas sim passíveis de ser atribuídas algum de valor de verdade ou falsidade mediante verificação empírica. Em outras palavras, para o realismo estrutural, um termo teórico só ganha significado caso esteja situado em uma rede de relações teóricas que o interligue a outros termos teóricos. Segundo essa visão, o mundo objetivo é composto por objetos inobserváveis dentre os quais certas propriedades e relações são obtidas; o conhecimento humano, entretanto, está limitado a estas relações estruturais entre os objetos (LADYMAN, 1998, p. 411-12). Assim, o conteúdo dos termos teóricos é exaurido por suas relações estruturais.

O estruturalismo na ciência vem em duas formas distintas: o realismo estrutural epistemológico e o ontológico (ou ôntico). O primeiro, cujos defensores mais notáveis são Grover Maxwell, John Worrall e Eli Zahar, admite a existência de objetos inobserváveis, embora nos

diga que só podemos conhecê-los conforme estão posicionados dentro de um sistema relacional de elementos, ou de *relatas*, muito embora não possamos conhecer sua natureza, como já explicitado anteriormente.

A versão ontológica traz uma visão mais radical em respeito à estrutura, eliminando a própria existência dos objetos, defendendo que a estrutura é primária em relação aos relata. Se a ciência só pode nos revelar conhecimentos verdadeiros sobre a estrutura da natureza, isso se dá porque *tudo que há é estrutural*, negando a metafísica tradicional dos objetos. Um realista estrutural ôntico pode se referir a objetos teóricos, como elétrons, mas apenas de maneira instrumentalista. A concepção de objetos portadores de propriedade e que se localizam entre relações com outros objetos é, segundo eles, “metafisicamente ociosa” (CHAKRAVARTTY, 2003). Como explica Chakravartty (ibid, p. 869-70), o realismo estrutural ôntico foi motivado por uma interpretação da mecânica quântica, que parece subdeterminar a identidade, a individualidade, das partículas quânticas, diferentemente da física clássica, que atribui identidades distintas à objetos macroscópicos distintos. Essa concepção clássica emerge da estatística de Maxwell-Boltzmann que identifica arranjos diferentes conforme se permuta os objetos em questão. Já no domínio das estatísticas de Bose-Einstein e de Fermi-Dirac, a permutação de partículas não implica em diferentes arranjos, de maneira que este tipo de mudança não tem significado físico. Isso sugeriria que os objetos da mecânica quântica não são objetos no mesmo sentido da física clássica, parecendo violar o “princípio da identidade dos indiscerníveis” de Leibniz. Defensores do realismo estrutural ôntico, como James Ladyman e Steven French advogam que este tipo de subdeterminação da identidade das partículas inviabiliza qualquer tipo de realismo sobre objetos.

O debate sobre qual das duas formas melhor responde às questões sobre o estatuto cognitivo da ciência conta com extensa literatura, mas não é o objetivo deste trabalho nos ocuparmos dele. Nosso objetivo é fazer uma defesa mínima do realismo científico, da objetividade da ciência e suas implicações no domínio da educação sobre a ciência, e não nos estendermos em longos debates sobre definições ou a existência ou não de objetos (muito embora seja impossível nos furtarmos de refletir um pouco sobre estes temas ao longo deste texto). Para realizar a tarefa que nos propomos a fazer, nos parece relevante e suficiente adotarmos a versão epistêmica sobre o realismo estrutural. Para tal, começaremos comentando como essa corrente do realismo científico pode responder às inquietantes objeções da metaindução pessimista, de maneira a viabilizar uma atitude realista frente ao empreendimento científico, com o seminal artigo

de John Worrall, no qual o autor define qual o papel do realismo estrutural no debate acerca das mudanças científicas.

### 2.4.1 John Worrall e o melhor dos dois mundos

Em 1989, o filósofo John Worrall, propôs uma conciliação entre as visões antagônicas do debate referente ao realismo científico em seu famoso artigo *Structural Realism: The Best of Both Worlds*, buscando realizar uma síntese entre os argumentos do milagre e da indução pessimista dentro uma perspectiva realista, o *realismo estrutural*.

A argumentação de Worrall se desenvolve primeiramente aceitando algumas conclusões da indução pessimista no que diz respeito a mudanças radicais das concepções ontológicas de teorias sucessivas, citando as diferentes teorias que se desenvolveram ao longo da era moderna (ibid. 107-8). No século XVIII, a teoria óptica newtoniana concebia a luz como um fluxo de partículas emitido por corpos luminosos. Ao longo do século XIX essa teoria foi perdendo força em benefício da teoria ondulatória da luz, segundo a qual a natureza da luz consistiria em ondulações em um meio mecânico que permearia todo o universo, o *éter*. Já no início do século XX começa a se desenvolver uma nova concepção da luz, estimulada pela emergente teoria quântica. A luz voltava a ser considerada como uma corrente de partículas, os fótons, obedecendo a leis e mecânicas bastante diferentes daquelas propostas no século XVIII. Worrall afirma que apenas uma concepção extremamente elástica de verdade aproximada (no domínio ontológico) justificaria a defesa de que partículas são “aproximadamente” ondas em um meio mecânico, e estas por sua vez se “aproximam” aos fótons. Estendendo este argumento à gravitação, o autor alega que apesar de a lei universal da gravitação de Newton poder ser obtida como caso limite das equações de Einstein para campos gravitacionais suficientemente fracos, a teoria newtoniana não consiste apenas de suas equações matemáticas, mas conta também com a interpretação destas e “várias assunções teóricas gerais, dentre elas o espaço infinito, o tempo absoluto”, a simultaneidade de eventos observados em diferentes referenciais e a constância da massa de um corpo (ibid, 109). A teoria relativística contradiz logicamente vários aspectos da teoria predecessora, de maneira que elas são, de fato, irreconciliáveis em sua ontologia e na imagem que elas tecem a respeito do mundo externo à mente. Em outras palavras, Worrall parece aceitar discontinuidades e rupturas neste domínio (e aceita acúmulos na dimensão empírica, uma vez que o sucesso que uma teoria anterior tem em explicar seus fenômenos pertinentes é incorporado pela sua sucessora), afirmando que as bases destas teorias estejam em desacordo e

que os esquemas teóricos atualmente aceitos terão o mesmo destino dos antigos (ibid), ou seja, a indução histórica nos permite defender que as teorias científicas em geral são provavelmente falsas em sua ontologia.

Apesar deste importante elemento de ruptura, o autor advoga que é possível identificar alguma forma de continuísmo e acumulação ao longo das revoluções científicas, e estas não se dão no domínio do *conteúdo* das teorias, como já sinalizado, mas em sua *forma*, ou *estrutura*. Para exemplificar sua tese, Worrall se refere à mudança teórica que marcou a passagem da ótica mecanicista de Fresnel para a teoria eletromagnética da luz, que carrega uma visão campista desmecanizada. Segundo a teoria de Fresnel, a luz era a manifestação da vibração de um meio material sólido e elástico, cujas partículas oscilam perpendicularmente à direção de propagação luminosa. Com base nessa concepção teórica, e se apoiando também no princípio da conservação da *vis-viva* (conceito antecessor à conservação de energia), Fresnel foi capaz de tecer as relações de transmitância e refletância de raios de luz polarizados. Em linhas gerais, estas relações acusam o balanço energético nos processos de reflexão e transmissão da luz na passagem de um meio para outro. A energia é identificada como o quadrado das intensidades de cada raio, o incidente, o refletido e o transmitido. A assunção mecânica subjacente a essas leis é a de que as intensidades dos raios de luz são proporcionais à velocidade absoluta do deslocamento oscilatório das partículas éter (PSILLOS, 1995, p. 35-9). Estas mesmas equações são retidas sem quaisquer alterações dentro da teoria eletromagnética, exceto pela interpretação que se dá às amplitudes dos raios de luz. Dentro desse esquema teórico, a amplitude não é representada pela velocidade das partículas do éter, mas pela intensidade dos campos elétrico e magnético que dão origem à propagação da luz. Ou seja, o que Fresnel identificava como movimento de partículas, Maxwell interpretava como corrente de deslocamento. Worrall argumenta que do ponto de vista do eletromagnetismo, Fresnel não estava certo a respeito da natureza da luz; entretanto, sua teoria foi bem-sucedida não apenas para interpretar resultados experimentais, mas também capturou a estrutura correta da luz e sua propagação. Segundo o realismo estrutural de Worrall, a teoria mecanicista se engana “apenas” em dizer o quê oscila, mas capturou a forma exata dessa oscilação, identificando corretamente certas relações entre os fenômenos ópticos (reflexão e refração de um raio incidente em um dióptro). Worrall não expressa dúvidas sobre o fato de que Fresnel estava errado sobre a natureza da luz, e os mecanismos por ele imaginados *não são* aproximadamente os mecanismos que emergem da teoria eletromagnética, e nem são casos limite destes, ao contrário do que sugerem Boyd e Putnam (ibid. p. 112). Segundo essa

formulação do realismo estrutural, o erro dessa explicação das mudanças científicas consiste em manter compromisso com o realismo ontológico, do sentido de afirmar que a ciência é capaz de nos dar um retrato verdadeiro (ou aproximadamente verdadeiro) dos objetos inobserváveis que existem por trás dos fenômenos. Aceitando a metaindução pessimista dentro do domínio ontológico, Worrall defende que o sucesso da ciência não configura um “milagre” justamente pelas teorias novas reterem a rede estrutural das teorias anteriores, ou seja, as relações entre as coisas em si, as relações que interligam os termos teóricos. Os acúmulos e a continuidade através da mudança científica se aplicam puramente no nível matemático.

O artigo de Worrall discutido nesta seção se tornou uma pedra angular para os debates sobre o realismo estrutural e colocou essa visão no centro do debate sobre o realismo científico. Entretanto, como o exposto pelo próprio Worrall, essa visão epistemológica remonta às ideias do matemático, físico e filósofo Henri Poincaré, que desenvolveu semelhantes argumentos em um contexto filosófico também semelhante àquele imposto pela indução pessimista de Laudan. Worrall se apropria e desenvolve seu realismo estrutural a partir do relacionismo de Poincaré, defendendo que devemos nos manter céticos com relação às entidades físicas, – elétrons, tecido do espaço-tempo, calórico, éter luminífero, fótons, etc. – ou seja, os objetos, e nos posicionar de maneira realista perante as estruturas lógico-matemáticas. “Há continuidade ou acúmulo através da mudança, mas *a continuidade se dá na forma ou estrutura, não no conteúdo*” (ibid, grifo nosso).

Consideramos que o realismo estrutural carrega consigo um interessante entendimento a respeito do objeto físico, que diverge do entendimento associado ao realismo ingênuo. Segundo esse último, os objetos referenciados pelas teorias estão diretamente instanciados em objetos existentes na natureza. Nos apropriando da crítica de Laudan às concepções realistas, formas ingênuas de realismo costumam assumir que “há substâncias no mundo que correspondem a ontologia presumida pelas nossas melhores teorias” (ibid., p. 20). Um entendimento estrutural dos termos teóricos permite uma visão mais crítica acerca de seus significados, pois permite reconhecer seu caráter construtivo, artificial, mas, ainda assim, objetivo, como ficará mais claro ao final deste capítulo. O estudo apresentado por Worrall nos permite entender que o conhecimento que temos de um objeto concreto, no caso, a luz está instanciado nas suas representações estruturais e coerentes em relação a um sistema abstrato de conceituação.

A referência a objetos abstratos utilizados para representar a luz e estruturar nosso conhecimento sobre ela, são construções matemáticas cujo sentido se encontra em suas relações

com outros objetos matemáticos. Isso nos mostra que o significado dos termos teóricos não se encontra instanciado em referentes concretos, mesmo que inacessíveis aos sentidos. O objeto físico tem um caráter contingente, que depende das maneiras de representação abstrata do objeto alvo da teoria. Apesar de o objeto alvo da teoria permanecer intrinsecamente desconhecido enquanto substância, ou, enquanto coisa em si, a construção de representações formais de tal objeto permite a obtenção de conhecimento estrutural sobre ele. Essa noção de conhecimento via estruturas reforça o comprometimento do realismo estrutural com a dimensão epistemológica do realismo, em detrimento da pretensão de se conhecer o mundo em sua ontologia.

Consideramos que o realismo estrutural nos permite uma visão crítica sobre os objetos e termos teóricos da física, mais desejável do que aquela proporcionada por formas ingênuas de realismo. Enquanto a segunda tende a uma visão de que a ciência é capaz de espelhar a realidade do mundo, a primeira nos ajuda a não confundir a natureza com nossas representações sobre ela. Para uma apreciação mais crítica sobre os objetos teóricos, buscaremos precisar de que maneira tais objetos são contingentes às formas de conceituação.

Para tal, na próxima seção discutiremos o realismo estrutural de Poincaré e sua explicação sobre o papel das convenções na construção do objeto físico, e o papel das relações estruturais para o entendimento do progresso e objetividade das ciências. Consideramos que essas ideias contribuem para a formação de visões críticas sobre as teorias, os objetos teóricos e suas relações com o mundo real. Ao mesmo tempo em que o convencionalismo de Poincaré joga luz ao caráter livre e criativo da ciência, seu relacionismo, que inspirou o realismo estrutural de Worrall, reforça o caráter objetivo da ciência. Esses traços do pensamento epistemológico de Poincaré são interessantes à nossa defesa contra o relativismo epistêmico e o antirrealismo.

#### **2.4.2 O convencionalismo e relacionismo de Poincaré e o progresso da ciência**

Não raro, Poincaré é referido como uma espécie de precursor do realismo estrutural (Votsis, 2012, p. 3). Worrall afirma que sua defesa sobre a continuidade da *forma*, ou *estrutura*, já aparece nas obras de Poincaré, inclusive tendo feito uso do exemplo da mudança científica entre as teorias de Fresnel e de Maxwell para os fenômenos ópticos (ibid, 117).

Essa tese sobre o estatuto cognitivo da ciência figura, principalmente, em dois de seus livros, *A Ciência e a Hipótese* (1984 [1902]) e *O Valor da Ciência* (1995 [1905]). Na terceira parte do segundo livro, em que discorre sobre o valor objetivo da ciência, Poincaré se engaja

no debate acerca da suposta artificialidade da ciência e de suas leis. Apesar de reconhecer a contingencialidade da ciência e considerar importante seu caráter construtivo e convencional, Poincaré busca um discurso epistemológico que o distancie do *nominalismo*, (POINCARÉ, 1995 [1905], p. 137), uma forma de antirrealismo que é referida na obra como uma corrente que afirma que a linguagem (no caso, científica) não tange a realidade exterior, considerando que leis e os fatos científicos são criados pelo cientista (ibid. p. 9), de maneira que os símbolos da linguagem físico-matemática jamais capturam “invariantes universais”. O nominalismo então (ao qual Poincaré se presta a se opor) desafia a capacidade que a ciência tem de construir conhecimentos objetivos sobre o mundo e uma das justificativas para essa visão é o caráter convencional da geometria e da física. Dado este problema, Poincaré procura responder ao seguinte questionamento:

Já que o enunciado de nossas leis pode variar com as convenções que adotamos, e que essas convenções podem modificar até mesmo as relações naturais dessas leis, há no conjunto dessas leis alguma coisa que seja independente dessas convenções, e que possa, por assim dizer, desempenhar o papel de *invariante universal*? (ibid, 154, grifo original).

Em outras palavras, pergunta-se, como pode a ciência nos revelar a estrutura do mundo se seus princípios geométricos e mecânicos são livres escolhas? Antes de expormos o que Poincaré entende como invariante universal na ciência, vamos tratar de explicar brevemente o papel das convenções em seu pensamento. É comum se referirem à Poincaré como um *convencionalista*, no sentido de que as convenções “cômodas” são importantes para a construção do edifício do conhecimento científico.

#### 2.4.2.1 O Convencionalismo

Para Poincaré, considerado um neo-Kantiano (PSILLOS, 2014; BRADING & CRULL, 2017), os princípios das ciências naturais (mais especificamente, os da mecânica) e da geometria não se encaixam nas três categorias Kantianas: verdades analíticas, juízo sintético *a priori*, e o juízo sintético *a posteriori* <sup>4</sup>. Ao contrário de Kant, que atribuía a escolha da geometria

---

<sup>4</sup>Juízos analíticos são aqueles se referem a saberes cujo critério de verdade são dados apenas pelo princípio de não contradição. Estas se inserem do domínio puramente formal da investigação. Juízos sintéticos *a priori* são aqueles associados à experiência pura, segundo Kant. O espaço e o tempo seriam as puras formas de sensibilidade, a partir da qual seríamos capazes de obter conhecimento empírico. Os objetos sensíveis nos seriam dados na estrutura



euclidiana para descrever o espaço físico pela sua capacidade de “capturar a forma da intuição espacial pura” (PSILLOS, 2014, p. 102), Poincaré atribui essa escolha a duas razões: à simples comodidade, por este espaço geométrico ser mais simples do que espaços não-euclidianos, como os de Riemann e Lobatchevski; e pelo fato contingente de que as transformações sofridas por corpos rígidos no espaço percebido pelos sentidos se aproximarem muito com as operações possíveis no espaço euclidiano. Existe isomorfismo entre a estrutura geométrica e seus grupos de transformações com a estrutura encontrada pela experiência na descrição do movimento de corpos sólidos (ibid). Em princípio, segundo Poincaré, é possível ajustar uma teoria física (que se preocupa em descrever fenômenos que ocorrem no espaço), de forma que se adequem à escolha de uma geometria não-euclidiana. Para cada teoria formulada dentro do espaço euclidiano é possível criar outra teoria, empiricamente equivalente à primeira, em um espaço não-euclidiano. Portanto, não é possível decidir pela experiência qual geometria é a verdadeira, a que realmente corresponde ao espaço físico perceptível pelos sentidos; apenas é possível escolher aquela que é mais cômoda.

O espaço geométrico tem propriedades radicalmente diferentes do espaço sensível, sendo o primeiro de natureza representativa. O espaço geométrico não é empírico, mas pode ser, em certa medida, uma abstração de certa entidade empírica, o que ele chama de corpos rígidos (sólidos). Assim, o espaço geométrico é uma pressuposição para o fazer científico, ou seja, os físicos buscam explicar os objetos externos como se estivessem situados no espaço euclidiano, embora eles não possam de fato habitar um espaço puramente abstrato (ibid, 105). O espaço euclidiano é, destarte, uma convenção, não arbitrária, mas “guiada pela experiência” (ibid, 106).

O convencionalismo de Poincaré não se limita à geometria, mas também é aplicado de maneira análoga à mecânica (por meio de seus princípios), embora essa tenha uma ligação mais direta com a experiência do que a primeira (BRADING & CRULL, 2017, p. 117). Os princípios da mecânica não são considerados verdades a priori, pois são estimulados pela experiência, mas também não são generalizações empírico-indutivas, uma vez que não podem ser diretamente verificáveis, nem falsificáveis, entretanto são “gerais, exatas e universalmente aplicáveis” (PSILLOS, 2014, p. 107). Eles não são falsificáveis pelo fato de que os princípios da mecânica não se aplicam *diretamente* a objetos do mundo, mas sim a entidades ou sistemas

---

do tempo e do espaço newtonianos, necessários e universais. (DUTRA, 2010, p. 121-142) Juízos sintéticos à posteriori são as funções do entendimento associadas à proposições cujo significado não se resumem ao significado dos seus termos, como os juízos analíticos, nem são dados diretamente pelos acesso da percepção à estrutural espaço-temporal.

idealizados (como referencial inercial, ou a ideia de movimento perfeitamente retilíneo e uniforme), que não são encontrados da natureza. Uma vez que os enunciados dos princípios da mecânica não versam sobre objetos reais, não há possibilidade de confrontá-los com rigorosos testes experimentais. Assim, estamos nos referindo a um aspecto do conhecimento científico que não é redutível a enunciados que possam ser diretamente verificados.

Apesar de os princípios da mecânica não serem diretamente testáveis ou falsificáveis, eles nutrem alguma relação com as experiências, uma vez que estas as sugerem, ou servem de bases para elas. Segundo Poincaré, isto é possível porque os objetos do mundo são, em alguma medida, similares aos objetos referidos pelos princípios da mecânica, embora não possam ser considerados representações perfeitas. Apesar da impossibilidade de verificá-los ou falsificá-los, *os princípios são sugeridos pela experiência*. Uma maneira de colocar essa questão é dizendo que as convenções são princípios empíricos erigidos a casos gerais. Essa elevação é uma escolha livre, mas não arbitrária. Além disso, são os princípios que definem os objetos da teoria científica, estabelecendo suas bases de análise e experimentação, se configurando como constituinte fundacional da estrutura teórica em questão. Assim, os “fatos científicos” (asserções teóricas, ou carregadas de teoria) sempre terão um componente convencional sendo, então, dependente de uma convenção. Segundo Poincaré (1995 [1905], p. 151), qualquer proposição teórica pode ser decomposta em suas proposições: uma contendo uma convenção; e outra contendo uma lei. Esta, ao contrário da primeira, está sempre sujeita à revisão. Por exemplo, a proposição (1), “os astros seguem a lei de Newton” pode ser decomposta em: (2) “A gravitação segue a lei de Newton”; (3) “A gravitação é a única força que age sobre os astros”. Poincaré aponta que (2) é uma definição que “escapa ao controle da experiência” (ibid), enquanto (3) pode ser falsificada empiricamente. Isso garante que a ciência trabalhe com leis objetivas e falsificáveis, apesar de o fato experimental estar ligado com a lei por meio de uma definição. Apesar da importância fundacional que Poincaré atribui aos princípios, ele sinaliza que eles só são úteis por serem pouco numerosos. Quanto mais os multiplicarmos, mais artificial será a ciência, de modo que se todas as leis fossem erguidas ao status de princípios, nada mais restaria da ciência (ibid p. 152).

Apesar de não serem testáveis por experiência, isso não significa que os princípios não estejam sujeitos à revisão; uma vez que se mostram fracassados em explicar novos fatos, devem ser abandonados não por não corresponderem à realidade externa, mas por não serem mais convenientes (ibid, p. 108-9).

Explicitado o papel das convenções, cabe agora justificar o porquê de a ciência não ser uma atividade artificial, apesar de depender das livres escolhas dos cientistas. Como podem os objetos teóricos não estarem em primeira instância no mundo empírico e mesmo assim, estarem em última instância? O relacionismo vem para solucionar este problema, sem abrir mão da objetividade da ciência e se afastando de uma visão puramente convencionalista da ciência.

#### 2.4.2.2 O Relacionismo e a objetividade da ciência

Como Poincaré argumenta em seus livros mencionados acima, a única realidade objetiva que a ciência é capaz de tecer é uma rede de relações entre os objetos teóricos. Uma das motivações para seu relacionismo é a própria natureza das representações matemáticas, como argumenta Psillos ao citar o próprio Poincaré: “Os matemáticos não estudam objetos, mas as relações entre os objetos; a substituição destes por outros é, portanto, indiferente para eles [os matemáticos], dado que as relações não mudam.” (Poincaré, 1897, apud PSILLOS, 2014, p. 124). Analogamente, a física matemática representa fenômenos e processos físicos por meio de expressões matemáticas que tecem *relações entre as grandezas físicas* (ibid.). São nestas relações, ou seja, *nas estruturas que interligam os objetos*, que reside a objetividade da ciência, de forma que as próprias grandezas, ou seja, as coisas em si, permanecem para sempre escondidas do nosso conhecimento. Mas antes de nos aprofundarmos sobre o valor das relações, vamos expor o que Poincaré entende como objetividade.

Segundo ele, a objetividade do mundo é dada pelo fato de que nós (seres pensantes) compartilhamos este mundo (POINCARÉ, 1995 [1905], p. 164-5). Essa afirmação nega, por exemplo, o *solipsismo*, pensamento segundo o qual nossa interpretação sobre mundo é tão dependente das nossas sensações, que não podemos ter nenhuma garantia de que todos percebemos uma realidade minimamente compartilhada. Nega também formas radicais de empirismo, que afirmam só podemos conhecer o mundo pela experiência concreta e subjetiva. Dessa forma, Poincaré entende como objetividade, aquilo que é “comum a vários espíritos e, por conseguinte, pode ser transmitido de um a outro” (ibid.). As coisas objetivas se opõem às sensações, que são comunicáveis de um sujeito para outro, portanto, totalmente subjetiva. Para exemplificar, Poincaré afirma que não há maneiras de se saber se duas pessoas tem a mesma percepção acerca das cores. Ao enxergar uma cereja, um sujeito pode experimentar uma sensação A, enquanto outro sente B, e nenhum deles jamais saberá se ambas as sensações têm as mesmas qualidades, entretanto, ambos se referem à sensação com a mesma palavra: vermelhidão. Segundo o autor,

isso garante que, apesar das qualidades possivelmente distintas de cada sensação, o nome dado a elas é o mesmo, não muda de sujeito para sujeito, sendo, portanto, transmissível, objetiva. A palavra vermelhidão tece uma *relação* entre as sensações A e B, de forma que essa relação esteja desprovida de quaisquer qualidades.

Poincaré estende essa noção de objetividade para as relações formais e puramente quantitativas tornando possível afirmar o valor objetivo da ciência. Segundo ele, o valor objetivo da ciência não quer dizer que ela nos faz conhecer a verdadeira natureza das coisas, mas sim dizer que ela nos permite conhecer as *verdadeiras relações entre as coisas* (ibid. p. 167). Em outras palavras, a ciência é um *sistema de relações*, como afirma Poincaré. Uma rede que conecta os objetos, ou seja, as entidades teóricas, por meio tanto de suas leis quanto por meio das convenções, e este é único conhecimento objetivo que a ciência pode nos proporcionar acerca da natureza, mantendo as *coisas em si* para sempre inacessíveis e ininteligíveis. Essa posição se distancia de atitudes realistas no domínio ontológico, marcante entre os filósofos da “virada realista”, como Putnam e Boyd e é a principal ideia que baliza a humildade do realismo estrutural de Worrall: a impossibilidade de conhecermos a “mobília do universo”.

O pensamento de Poincaré nega também a possibilidade da continuidade referencial, salientando a continuidade das *formas* das leis físicas em meio às mudanças científicas. Nessa discussão o autor antecipa uma forma do argumento da metaindução pessimista, que era referida à época como a falência da ciência (“*the bankruptcy of science*”). Poincaré estava plenamente ciente das importantes mudanças que a física de sua época e seus princípios estavam sendo sujeitas (PSILLOS, 2014; POINCARÉ, 2008 [1908]), o que, segundo Psillos o estimulou a chamar atenção para os elementos invariantes na mudança teórica:

Ora, o que vemos? À primeira vista, parece-nos que as teorias só duram um dia, e que se acumulam ruínas sobre ruínas. Um dia nascem, no dia seguinte estão na moda, no outro dia se tornam clássicas, no terceiro estão obsoletas e no quarto são esquecidas. Mas se prestarmos mais atenção, veremos que o que assim sucumbe são as teorias propriamente ditas, aquelas que pretendem nos ensinar o que são as coisas. Mas há nelas algo que sempre sobrevive. Se uma delas nos faz conhecer uma relação verdadeira, *essa relação é definitivamente adquirida*, e a encontraremos sob novo disfarce nas teorias que virão sucessivamente reinar em seu lugar. (ibid, p. 168, grifo nosso).

Para justificar sua posição, Poincaré, assim como Worrall, recorre ao caso da mudança

teórica entre a ótica de Fresnel e a de Maxwell:

Tomemos apenas um exemplo: a teoria das ondulações do éter nos ensinava que a luz é um movimento; hoje, a moda privilegia a teoria eletromagnética, que nos ensina que a luz é uma corrente. Não investigamos se poderíamos conciliá-las, e dizer que a luz é uma corrente, e que essa corrente é um movimento? Em todo caso, como é provável que esse movimento não fosse idêntico àquele que admitiam os partidários da antiga teoria, poderíamos crer que se justificasse dizer que a antiga teoria foi destronada. Contudo ainda resta alguma coisa nela, já que entre as correntes hipotéticas que Maxwell admite há as mesmas relações que havia entre os movimentos hipotéticos que Fresnel admitia. Portanto, há alguma coisa que permanece, e essa alguma coisa é o essencial. É isso que explica como vemos os físicos atuais passarem sem nenhum constrangimento da linguagem de Fresnel à linguagem de Maxwell. (ibid, p.168).

Neste trecho fica claro que Poincaré não se compromete com a continuidade referencial dos termos teóricos da ciência. Assim como os termos puramente matemáticos, eles podem ser substituídos por outros, atribuindo a eles novas imagens, novos conceitos físicos, mas as relações entre os termos teóricos devem permanecer inalteradas, de forma que a continuidade não se dá no nível da referência, mas sim no nível estrutural. Entretanto, Poincaré não alega que o mundo não passe de um conjunto de equações diferenciais (ibid, p. 165). Estas equações são interpretadas pelos cientistas e suas interpretações desenham a imagem de mundo da ciência em determinado ponto de seu desenvolvimento. Mas, seguindo seu raciocínio, estas interpretações não são completamente objetivas. Embora possa haver acordo dentro de uma comunidade científica sobre o significado de um conjunto de equações físico-matemáticas (ou seja, seu *conteúdo físico* é comunicável e transmissível entre estes cientistas), isso não basta que elas sejam objetivas. Para Poincaré, há uma segunda condição para objetividade, que vai além da comunicabilidade inequívoca. Aquilo que é objetivo deve sobreviver à passagem do tempo. Deste modo, as interpretações das equações físicas, ou seja, seu *conteúdo* pode não ser objetivo, uma vez que elas sofrem mudanças, por vezes radicais. A objetividade das *relações verdadeiras entre as coisas* é assegurada pela sua capacidade de perdurar no tempo. Como relações reais são invariantes, isso sugere que existe uma relação natural invariante subjacente, que pode ser interpretada por diversas teorias. A invariância da equação é explicada pela invariância da relação natural (PSILLOS, 2014, p. 133), ou o que Poincaré chama de harmonia: “o que

chamamos de realidade objetiva é, em última análise, que é comum a muitos seres pensantes; essa parte comum [...], só pode ser a harmonia expressa por leis matemáticas.” (POINCARÉ, 1995 [1905], p. 9).

### 2.4.3 Uma visão estruturalista sobre o progresso da ciência

Caso a retenção da estrutura formal das teorias através das mudanças teóricas realmente ocorra, é possível defender de maneira objetiva que a ciência progride na direção de um conhecimento cada vez mais profundo sobre o mundo natural por meio do mapeamento das estruturas e das relações que interligam os fenômenos e os termos teóricos.

Segundo Poincaré, as retenções estruturais só são possíveis porque as relações encontradas entre objetos físicos são verdadeiras, e uma vez que as relações verdadeiras são descobertas, são permanentemente adquiridas pelo edifício de conhecimento que a ciência constrói. Em suas palavras: “a todo instante se descobrem novas ligações entre objetos que pareciam fadados a manter separados para sempre; fatos dispersos deixam de serem estranhos uns aos outros e tendem a se ordenar numa síntese imponente” (POINCARÉ, 2008 [1908], p. 247). Uma vez que se reconhece o elo entre objetos antes não ligados estruturalmente, ocorre uma síntese e fenômenos que antes pareciam ter completa independência são abarcados de uma vez só por uma apenas uma teoria. Um dos casos mais exemplares é a síntese entre a eletricidade e o magnetismo, cujas relações foram desveladas ao longo do século XIX. Poincaré argumenta que o passo em direção à unidade é sempre um passo definitivo (ibid, p.248). Outro exemplo empregado pelo autor envolve a comparação do poder explicativo entre as teorias de Ptolomeu e Copérnico:

Consideremos o movimento diurno aparente às estrelas e movimento diurno dos outros corpos celestes e, por outro lado, o achatamento da Terra, a rotação do pêndulo de Foucault, a gi-  
ração dos ciclones, os ventos alísios, e o que mais sei eu? Para adeptos de Ptolomeu, todos esses fenômenos não têm qualquer ligação entre si; para Copérnico, são engendrados pela mesma causa. Ao dizer que a Terra gira, afirmo que todos esses fenômenos têm uma relação íntima, e isso é verdadeiro, e isso permanece verdadeiro. [...] Isso quanto à rotação da Terra em torno de si mesma; o que dizer de sua revolução em torno do Sol? Aqui temos três fenômenos que, para o adepto de Ptolomeu, são absolutamente independentes e que, para Copérnico, são relacionados à mesma origem; são os deslocamentos aparente dos planetas na esfera celeste, a aberração das estrelas fixas, a paralaxe dessas

mesmas estrelas. [...] Adotar o sistema de Copérnico [...] é afirmar que há uma ligação entre os três fenômenos, e isso também é verdadeiro. (POINCARÉ, 1995 [1905], p. 171).

Seguindo esse raciocínio, é inequívoco afirmar que a teoria eletrodinâmica de Maxwell, por exemplo, é mais verdadeira que as teorias elétricas e magnéticas que existiam antes do experimento de Oersted, que evidenciou uma relação entre estas duas classes de fenômenos. A teoria eletromagnética nos diz objetivamente como os campos elétricos e magnéticos (à época de Maxwell identificados respectivamente como tensões e movimentos de um meio elástico) se interligam, formando uma rede de relações entre os objetos da teoria, os relata: cargas, correntes e campos. Cada uma dessas entidades apenas ganha significado quando se relacionam umas com as outras, quando são identificadas como “nós em uma estrutura”, como Votsis (2003, p. 3) se refere aos objetos físicos em geral. Em suma, a teoria de Maxwell é mais verdadeira do que as teorias antecessoras, pois elas evidenciam maior número de relações verdadeiras. A síntese eletromagnética encontrou elos entre as estruturas das teorias elétricas e magnéticas (cujas relações verdadeiras foram retidas na nova teoria), fazendo que estas duas redes, antes independentes, tocassem-se, ampliando seu escopo de aplicação e seu domínio de relevância.

Afirmando que sua concepção filosófica – que remonta às ideias do matemático, físico e filósofo Henry Poincaré – seria “o melhor de ambos os mundos” (WORRALL, 1989). O realismo estrutural busca preservar tanto quanto possível o realismo científico mesmo admitindo a existência das revoluções científicas (PSILLOS, 1995). Segundo Poincaré, (1995 [1905]), as posições antirrealistas – ou nominalistas, como ele chama – parecem sugerir que as teorias superadas são completamente suplantadas por novas teorias, “ruínas sobre ruínas”, e que através das mudanças teóricas nada é preservado. Entretanto, o filósofo aponta que, apesar dessas mudanças, as relações lógico-matemáticas são preservadas. Uma vez que uma teoria produz relações verdadeiras entre diferentes objetos, tais relações são “definitivamente adquiridas” e incorporadas às teorias subsequentes. O peso realista das ideias de Poincaré, e apropriada por Worrall, reside não nos objetos em si, mas nas relações que a linguagem matemática tece entre os objetos e no caráter cumulativo das mesmas. São nelas que encontraremos a objetividade da ciência e o significado dos termos teóricos.

#### 2.4.4 Continuidade Estrutural e seus limites

A retenção estrutural se mostra uma alternativa frutífera ao realismo científico abalado pela metaindução pessimista, entretanto merece ser alvo de algumas ponderações e sofistica-

ções. Considerando que Worrall e Poincaré buscam apoio no mesmo caso histórico (mudança Fresnel-Maxwell) no qual há retenção estrutural completa, é razoável questionar se não seria este um caso atípico na história da ciência (REDHEAD, 2001a). Como acomodar o realismo estrutural em casos nos quais não há retenção de estruturas? E quando as estruturas não são retidas de maneira intacta? Uma vez que nem todas as estruturas estão associadas a versões predecessoras, a emergência de novas estruturas mina o realismo estrutural? Essas questões foram levantadas por Ioannis Votsis (2007) para tornar mais robusta a reivindicação da continuidade estrutural.

A falta de retenção de certas estruturas ao longo das mudanças científicas dificilmente inviabiliza o realismo estrutural, afinal de contas, não são de seu interesse todas as estruturas e relações tecidas em toda a história da ciência, apenas aquelas responsáveis pelo sucesso preditivo e explicativo de uma teoria (ibid, p. 107). Essa restrição está explícita no pensamento de Poincaré ao se referir a “relações verdadeiras”. Segundo Votsis, os elementos que se mostram falsos, ou que não desempenham nenhum papel no sucesso de uma teoria devem ser considerados *inoperativos*, enquanto aqueles que foram retidos, como as equações de Fresnel, *operativos*.

Contudo, casos como o da ótica clássica são relativamente raros, sendo mais comuns casos nos quais a estrutura de uma teoria predecessora pode ser derivada como caso limite da teoria sucessora. Esse caso é chamado por Worrall (1989, p. 121) de “continuidade aproximada”, se apropriando do Princípio Geral da Correspondência (POST, 1971, p. 228), segundo o qual “uma teoria  $L$  deve dar conta do sucesso de sua predecessora  $S$ , ‘degenerando’-se nessa teoria sob aquelas condições nas quais  $S$  tem sido bem confirmada”. Redhead (2001a, p. 85-8), ao reconhecer as dificuldades postas pela “continuidade aproximada”, se apropria da intuição do Princípio Geral da Correspondência ao afirmar que é possível identificar afinidades entre novas e antigas estruturas teóricas. O espaço-tempo galileano e a simultaneidade, por exemplo, são recuperados do espaço-tempo de Minkovsky caso se ajuste o parâmetro  $1/c$  (o inverso da velocidade da luz no vácuo) para zero. De forma semelhante, a comutatividade é recuperada da mecânica quântica, caso a constante de Plank tenda a zero. Definindo logicamente essa transição entre estruturas via ajuste de parâmetros, Redhead afirma que “qualitativamente, novas estruturas emergem, mas em certo sentido estas novas estruturas crescem naturalmente, embora de maneira descontínua, das antigas estruturas” (ibid. p.88). Worrall (ibid.) afirma que dificilmente a aproximação entre estruturas pode servir de evidência em favor do realismo científico tradicional, uma vez que as referências teóricas de uma teoria não se aproximam às de uma



teoria sucessora. A afinidade entre teorias sucessivas, bem como seus elos de continuidade, se mostram mais facilmente no nível formal e estrutural, mesmo que de maneira aproximada, como mostra o Princípio Geral da Correspondência.

Entretanto, o fato de que nem todas as estruturas estabelecidas pelas disciplinas científicas têm estruturas predecessoras parece tornar impossível invocar o Princípio em benefício do realismo estrutural. Porém, como sinaliza Votsis (*ibid*, p.111), a formulação do Princípio Geral da Correspondência não exige que todas as estruturas sejam correspondentes às estruturas bem-sucedidas do passado. O realismo estrutural é invocado para estabelecer os vestígios de teorias do passado em teorias sucessoras mais precisas e abrangentes. Por consequência, novas estruturas ou novas relações entre objetos não ameaçam essa forma de realismo, sendo inclusive desejável a qualquer realista. Na verdade, o estabelecimento de novas estruturas lança bases para uma formulação estruturalista (ou relacionista) do progresso e crescimento científico.

Seguindo o raciocínio de Poincaré, as retenções estruturais nos revelam que as teorias do passado contribuíram objetivamente para o crescimento e acúmulo de conhecimento (estrutural) da natureza. Segundo Poincaré, as retenções estruturais só são possíveis porque as relações encontradas entre objetos físicos são verdadeiras e, uma vez que as relações verdadeiras são descobertas, são permanentemente adquiridas pela ciência.

## **2.5 Síntese: o que o Realismo Estrutural nos oferece?**

Ao longo do Capítulo 1, esforçamo-nos para deixar claro que estudos sobre o realismo científico tem o potencial de enriquecer o ensino de Natureza da Ciência, tanto complexificando e sofisticando as afirmações das Visões Consensuais, quanto incutindo debates sobre questões não consensuais sobre a ciência. A declaração de McCommas (1998), por exemplo, sobre o desenvolvimento por vezes revolucionário da ciência (provavelmente inspirada nas contribuições de Thomas Kuhn à epistemologia da ciência), pede por esclarecimentos sobre o significado de uma revolução científica e seu impacto na imagem de mundo construída pela ciência. Como argumentado anteriormente (seção 1.4), consideramos necessários esclarecimentos ou reflexões mais pormenorizadas sobre as seguintes questões: se sucessivas teorias são realmente incomensuráveis, como confiar que qualquer uma delas atingiu, em algum nível, “a verdade” sobre seus objetos?; se o conteúdo de verdade das teorias científicas está sempre sob suspeição, é possível atribuir algum sentido ao progresso científico?; há algum tipo de acumulação de conhecimento?; o que se mantém verdadeiro após uma mudança científica?

Não pretendemos argumentar que a leitura que fazemos nesta dissertação sobre o realismo estrutural esgota os debates associados a essas questões, mas definitivamente nos dá ferramentas para pensá-las. A maneira como Worrall ameniza a celeuma causada pela formulação de Laudan da metaindução pessimista nos permite pensar sobre o sentido da realidade e significado dos objetos teóricos, e sobre quais aspectos de uma teoria científica estão mais ou menos sujeitos à mudanças radicais associadas à mudança científica.

Como argumentado por Poincaré, por meio de uma visão estrutural dos objetos da física, torna-se possível a identificação de elementos de continuidade entre teorias historicamente sucessivas que versam sobre a mesma classe de fenômenos. O conteúdo de verdade (ou, realidade objetiva, como Poincaré se refere) das teorias de ciências altamente formalizadas, como a física, não se encontra nas referências putativas de entidades inobserváveis, mas sim as relações formais entre referentes distintos que ocorrem na estrutura teórica em questão. A interpretação que se dá a um referente pode mudar conforme a ciência se desenvolve no tempo. Porém, as relações que são tecidas entre os diferentes objetos de uma teoria tendem a sobreviver às mudanças teóricas, como procuramos mostrar acima. A objetividade destas relações nos amparam para argumentar em favor da existência do crescimento do conhecimento científico, por meio da progressiva apreensão da harmonia que subjaz à natureza.

Para além disso, discussões sobre o realismo científico, e a forma crítica do realismo estrutural, têm muito a contribuir para a superação de visões ingênuas sobre a ciência, como aquelas acusadas por Gil-Pérez (2001) e Lederman (2007), dentre as quais se localiza o realismo ingênuo. A noção de objetos e referências teóricas ganham contornos interessantes pela ótica do realismo estrutural, como pontuamos diversas vezes ao longo de nossa argumentação. A luta pela superação de concepções ingênuas sobre as relações entre teoria e realidade ganha potência com a compreensão estrutural dos objetos teóricos.

Segundo essa compreensão, os objetos que ocorrem nas teorias científicas não encontram referência direta em objetos concretos. Assim, não é possível encontrar uma relação de um para um entre o discurso sobre a existência de uma entidade teórica e sua ocorrência no mundo real. Em certo sentido, as referências dos termos, conceitos e enunciados teóricos ganham uma dimensão endógena (PATY, 1992), uma vez que seu significado só se verifica dentro de uma rede de relações.

As bases para a construção desses objetos, como expostas pelo convencionalismo de Poincaré, jogam luz sobre o caráter construtivo e artificial da ciência, sem que se perca sua

objetividade. Assim, a leitura que fazemos do realismo estrutural, amparado no pensamento de Poincaré, nos permite atenuar uma querela recorrente no debate entre realismo e construtivismo no ensino de ciência (ver seção 1.5): a polêmica sobre construção e descoberta na ciência. Uma compreensão crítica sobre os objetos abstratos das teorias científicas deve levar em consideração o papel construtivo da imaginação, das idealizações e das modelizações do objeto teórico. A constituição deste objeto é estruturada matematicamente e é inscrita em uma rede de conceitos e relações. Como explica Bunge (2008 [1981], p. 23): “Um objeto-modelo, mesmo engenhoso, servirá para pouca coisa, a menos que seja encaixado em um corpo de ideias no seio do qual se possam estabelecer relações dedutivas. É preciso, pois [...], tecer uma rede de fórmulas em torno de cada objeto-modelo”. Bunge, ao propor uma descrição do modo como a ciência delinea um objeto ou evento alvo de um estudo teórico ao criar um modelo de tal objeto, explicita que tal construção deve ser coerente com a teoria usada para explicá-lo. Assume-se que tal objeto deva obedecer às leis e princípios próprios daquela teoria, de maneira a adequá-lo não apenas ao comportamento empírico que aquele objeto apresenta aos sentidos e que se quer representar por meio do modelo, mas adequá-lo também ao conjunto de conceitos e leis usados para conceituá-lo. Nesse sentido, o objeto físico não é externo ao pensamento, mas é por ele construído, sendo, “ao menos em parte, convencional” (ibid, p.22), ganhando a dimensão endógena a que Paty se refere.

A concepção crítica do objeto físico referenciado pelas teorias científicas dilui o dilema entre descoberta e construção nas ciências. Podemos argumentar que a descoberta do objeto físico, ou de propriedades do objeto alvo está imbricada com a construção teórica e conceitual. Como já comentado na seção 2.3.1, a descoberta do ponto de Poisson estava condicionada a uma correta formulação da estrutura ondulatória da luz, realizada por Fresnel. Vemos por esse exemplo que essa descoberta científica está intimamente ligada com a correta representação formal e conceitual de um objeto alvo, no caso, a luz.

Não temos a intenção de argumentar que a compreensão sobre a natureza estruturante da conceituação da ciência moderna seja um *insight* exclusivo do realismo estrutural. O entendimento da ciência teórica como um complexo de relações formais que estruturam os conceitos e objetos da ciência por ser visto, por exemplo, em Mario Bunge (ibid.) e em Michel Paty (1995). Tal compreensão já foi, inclusive, levada a discussões educacionais, como feito por Pietrocola (2002) ao jogar luz sobre a matemática como estruturante do pensamento e do conhecimento físico. Lá encontramos uma concepção de objeto físico bastante solidária à concepção que

traçamos aqui com o auxílio do realismo estrutural:

Os conceitos são ideias estabilizadas pelo uso e “tijolos” do pensamento científico. Carga, massa, distância, força, campo, potencial, energia, além de espaço, tempo, velocidade são conceitos muito importantes do pensamento físico. Todavia, esses conceitos sozinhos nada podem e só ganham sentido quando vinculados uns aos outros, ou seja, quando presentes no interior de uma teoria. No interior delas encontramos as leis físicas. Nas teorias, os conceitos se entrelaçam formando verdadeiras redes conceituais. Devido à sua organização interna, lógica e coerente, as teorias são mais que simples agrupamentos de conceitos, constituindo-se em estruturas. (PIETROCOLA, 2002, p. 104)

Longe de reivindicar essa noção crítica sobre as entidades teóricas como exposta por Pietrocola, o realismo estrutural tem a importante contribuição de levar essa concepção ao centro do debate sobre o realismo científico. Configura-se, então, uma abordagem realista frutífera para se pensar os problemas epistemológicos que emergem da mudança científica, e do problema do significado dos termos teóricos. Consideramos, então, que o realismo estrutural provê uma visão crítica acerca dos objetos das ciências teóricas formalizadas que é capaz de conciliar tanto os aspectos objetivos da teorização científica, reivindicados pelos realistas, quanto seus aspectos construtivos e contingentes, reivindicados por construtivistas e relativistas. Colocamos em jogo, então, uma visão sobre importantes tópicos sobre a Natureza da Ciência que se mostra fértil dados nossos objetivos de pesquisa: construir um discurso metacientífico moderadamente relativista e criticamente realista.

## Capítulo 3

# Episódio histórico: o coeficiente de arraste de Fresnel

Ao longo deste capítulo será tratado um episódio histórico da Física cujo objetivo é tornar menos abstratas nossas considerações sobre o realismo estrutural e a busca por elementos de continuidade através de importantes mudanças científicas. Para realizar tal tarefa, buscamos dirigir nossa atenção a um episódio que envolvesse dois aspectos fundamentais das reflexões teóricas realizadas até aqui: mudanças científicas que acarretam descontinuidades nas referências teóricas e a retenção de um elemento matemático mediante radicais mudanças em sua interpretação física.

Como comentado anteriormente (ver seção 2.4.4), a exigência de que as continuidades estruturais entre sistemas teóricos que se sucedem na História da Física se deem de maneira completa, como o caso Fresnel-Maxwell utilizado por Worrall e Poincaré, torna excessivamente restritas as possibilidades de se estudar a mudança científica pela ótica do realismo estrutural. Então, abriu-se para nós a possibilidade de abordar um episódio histórico que envolvesse a chamada “continuidade aproximada” (REDHEAD, 2001a). Ao mesmo tempo, parecia-nos desejável escolher um caso no qual a mudança científica se dava de maneira bastante pronunciada, isto é, envolvesse um processo revolucionário na Física, tornando evidente o *tenet* de McComas sobre o caráter por vezes evolucionário e por vezes *revolucionário* da ciência (ver seções 1.3 e 1.4).

Considerando essas exigências que impusemos à pesquisa, chegamos à conclusão de que um episódio histórico associado aos antecedentes de Relatividade Restrita e os estudos da ótica dos corpos em movimento no século XIX poderia ser frutífero ao exercício de epistemologia histórica que nos propusemos a empreender. E, de fato, o estudo se mostrou adequado aos nossos objetivos e pode ser considerado um exemplo de continuidade estrutural, ao mesmo

---

tempo em que envolve descontinuidades no domínio ontológico da Física e da visão de mundo por ela tecida.

Esse estudo de caso acusa um elo de continuidade entre a Física do século XIX, mais especificamente a ótica, e a Teoria da Relatividade Restrita, proposta por Einstein em 1905. Como demonstraremos neste capítulo, a ótica dos corpos em movimento era um campo da Física que guardava grandes polêmicas e problemas em aberto no século XIX. Um dos problemas, foco deste estudo, se referia a interpretação física do coeficiente de arraste parcial do éter de Fresnel. Esse coeficiente estabelecia relações entre a velocidade de propagação da luz em um meio transparente em movimento e a velocidade de deslocamento deste meio em relação a um referencial em repouso absoluto, representado pelo *éter*. Tal hipótese, criada por Augustin Fresnel em 1818, dava conta de experimentos astronômicos e óticos que objetivavam estabelecer relações entre a velocidade da luz e o movimento da Terra. Porém, seu sucesso empírico permaneceu como uma questão aberta que atravessou aquele século. A interpretação dada por Fresnel ao coeficiente buscava se adequar a uma visão de mundo mecânica, paradigmática naquele contexto histórico, apelando para propriedades hipotéticas sobre a interação entre o éter e o corpo em movimento dentro do qual a luz se propagava. Com o advento da Teoria da Relatividade, que acarretou na eliminação do éter no vocabulário da física, o coeficiente de Fresnel foi reinterpretado como um efeito cinemático resultante das novas relações entre espaço e tempo deduzidas pela teoria.

Em suma, no episódio escolhido constam todos os ingredientes pertinentes ao problema epistemológico que nos dedicamos a estudar na presente pesquisa: mudanças radicais na visão de mundo científica, abandono de entidades teóricas centrais na ciência do passado, retenção estrutural e sua subsequente reinterpretação física. O episódio nos dá o ensejo de criar questões pertinentes ao realismo científico: as conexões entre espaço e tempo acusadas pela Relatividade subjazem à uma harmonia e ordem natural preexistente à mente? O coeficiente de Fresnel era uma manifestação desta harmonia, mesmo antes de ela ser explicitamente sistematizada pela Relatividade e pelas transformações de Lorentz?

Antes de abordarmos as motivações da proposição da teoria de Fresnel para a ótica dos corpos em movimento, a fim de contextualizar o episódio, nos ocuparemos brevemente de comentar o quadro geral dos estudos da ótica entre os séculos XVIII e XIX.

### 3.1 Introdução: teorias da luz

Antes de abordarmos as motivações da proposição da teoria de Fresnel para a ótica dos corpos em movimento, convém de nos ocuparmos brevemente de comentar o quadro geral dos estudos da ótica entre os séculos XVIII e XIX. Em 1818, quando da proposição do arraste parcial do éter de Fresnel, duas concepções sobre a natureza da luz estavam em disputa, ao menos no contexto da ciência francesa: a visão corpuscular e ondulatória da luz.

De acordo com a primeira, a luz seria composta por partículas, ou, corpúsculos, emitidos pelos corpos luminosos. À época, tal posição também era referida como emissionista, e considerava que as partículas de luz eram formadas por diminutos corpos materiais sujeitos às leis de movimento de Newton. A segunda concepção defendia que a luz seria a manifestação de vibrações, ou ondulações em um fluido sutil que permearia todo o espaço e penetraria a matéria, o éter.

No século XVIII, a maioria dos filósofos naturais, tanto britânicos quanto franceses, aceitavam e adotavam a teoria corpuscular (MARTINS, 2012; MOURA, 2016). Tal concepção sugerida por Newton em seu *Óptica* (1704-1730), concebia a luz como uma corrente contígua de corpúsculos materiais, e era a visão dominante em detrimento da teoria de pulsos luminosos sugerida por Christiaan Huygens em seu Tratado Sobre a Luz, de 1690 (BUCHWALD, 1981). A especulação do filósofo holandês é bastante diferente da concepção ondulatória que hoje estamos habituados a pensar, pois fazia referência a pulsos longitudinais não periódicos, por isso é mais adequado nos referirmos à ela como uma teoria vibracional, diferentemente de uma teoria ondulatória (MOURA, 2016; BASSALO, 1987; BUCHWALD, 2014), como a de Fresnel que será discutida em breve. Segundo Moura (2016), a concepção de Huygens jamais competiu em pé de igualdade com a de Newton, uma vez que a primeira era bem menos abrangente, concentrando-se mais na explicação de um efeito que por muito tempo permaneceu sem explicação satisfatória, a dupla refração do chamado cristal da Islândia<sup>1</sup>.

Entre o final do século XVIII e o início do século XIX, a teoria emissionista era amplamente empregada na França e passava por importantes avanços e aperfeiçoamentos, sob a

---

<sup>1</sup>Também conhecido como Espato da Islândia, é um mineral que apresenta o fenômeno de birrefringência, no qual um raio luminoso incidente é separado em dois raios refratados no interior do cristal descrevendo trajetórias distintas, um chamado raio ordinário e outro extraordinário. Enquanto o índice de refração do raio ordinário é constante em todas as direções, o índice do raio extraordinário varia de acordo com a orientação em relação ao eixo do cristal. Outra propriedade da birrefringência é o fato de os raios ordinário e extraordinário serem polarizados perpendicularmente um em relação ao outro.

liderança de Pierre Simon Laplace. À época, vigorava em Paris o que Robert Fox (FOX, 1974, 2014) chamou de programa laplaciano na Física. Esse programa de pesquisa buscava estender a visão newtoniana da gravitação para áreas, até então, menos matematizadas e formalizadas da filosofia natural, como fenômenos elétricos, magnéticos, térmicos, óticos, químicos, entre outros. Isso significava explicar os fenômenos em termos semelhantes daqueles invocados para explicar os efeitos gravitacionais, ou seja, utilizando-se de pontos materiais e forças centrais. O programa laplaciano buscava levar esta visão de mundo newtoniana ao domínio microscópico de maneira que interações intermoleculares à distância e de curto alcance pudessem ser empregadas para dar sentido aos fenômenos térmicos, químicos, óticos, etc.

Os fenômenos térmicos, por exemplo, eram explicados por meio de forças atrativas entre as partículas da matéria ordinária e as partículas de calor, o calórico, um fluido sutil, rarefeito e muito menor do que as partículas da matéria comum. Entre elas, as partículas de calórico apresentariam comportamento repulsivo. Isso explicaria, entre outros fenômenos, o fato de o calor fluir sempre dos corpos quentes aos corpos frios, uma vez que o calórico tende a se auto repelir, ao mesmo tempo em que é atraído pela matéria ordinária. Por meio da concepção laplaciana da natureza, a teoria do calórico era empregada de explicar uma grande diversidade de fenômenos, como a coesão dos sólidos, a fluidez dos líquidos e dos gases, o aquecimento dos corpos, a dilatação térmica, entre outros (FOX, 1974).

Para ilustrar mais uma vez o emprego da física laplaciana, tomemos o exemplo da refração da luz: os corpúsculos de luz, ao penetrarem em um meio mais refringentes, estariam sujeitos a forças-à-distância de curto alcance exercidas pelas moléculas constituintes do material refringente, fazendo com que o raio de partículas sofresse a deflexão que o aproxima a linha normal ao dióptro. Uma das consequências da adoção da Física laplaciana neste caso, é a velocidade da luz ser maior em meio mais refringentes, ao contrário do que previa a teoria de Huygens dos pulsos luminosos (BUCHWALD, 1981).

Nessa época, Laplace reuniu novos e promissores nomes da Escola Politécnica para expandir seu programa, como Jean-Baptiste Biot, François Arago, Étienne Louis Malus, Siméon Denis Poisson, entre outros, em um projeto de sofisticação da física matemática e experimental parisiense, no qual era “encorajado o uso de instrumentos de precisão, de técnicas quantitativas e de equações algébricas na coleta e interpretação de dados” (FRANKEL, 1976, p. 143), sempre adotando o núcleo duro metodológico do programa: o emprego de forças intermoleculares centrais, instantâneas e de curto alcance entre as moléculas do sistema em questão.



O sucesso do programa se verificou notavelmente pelo avanço dos estudos da ótica. A interpretação da refração da luz, por exemplo, foi adotada de forma bem-sucedida por Laplace para explicar os efeitos de refração atmosférica (ibid.). Em seu estudo, o Laplace obteve uma “equação diferencial fundamental para a refração da luz que poderia ser integrada sob várias hipóteses acerca da variação da densidade da atmosfera com a altitude e a temperatura” (ibid. p. 144). Para tal, assumiu de antemão que as forças atrativas de diferentes camadas na atmosfera eram proporcionais a sua densidade. Este estudo serviu de base para as bem-sucedidas investigações sobre a refração em gases, desenvolvidas principalmente por Biot e Arago.

O importante papel do programa laplaciano na ótica é bem representado pelos estudos de polarização da luz, iniciados por Malus e sua descoberta da polarização por reflexão. Conforme explica Frankel (ibid.), efeitos óticos com propriedades assimétricas já haviam sido exibidos pelos raios duplamente refratados, como aqueles que atravessam uma amostra do cristal da Islândia. Porém, até então nenhum dos sistemas, corpuscular ou ondulatório, haviam sido capazes de explicá-los satisfatoriamente. Estudando os efeitos do espato da Islândia, em 1809 Malus descobriu que esses efeitos ocorrem também pela “simples reflexão da luz em meios transparentes, resultando em uma modificação fundamental da luz em sua interação com a matéria” (ibid. p. 146). Por um lado, os efeitos de assimetria eram inconsistentes com a teoria ondulatória da maneira como era concebida no início do século XIX. Por outro, nos corpúsculos de luz poderiam ser imaginados quaisquer tipos de assimetria, que pudessem ser invocadas a fim explicar a polarização. A ideia de que as partículas luminosas apresentariam diferentes lados já havia sido utilizada por Newton na busca de uma explicação para a dupla refração e polarização dos raios ordinários e extraordinários refratados pelo cristal da Islândia (ibid.). Em concordância com o programa laplaciano, Malus assumiu a existência de três diferentes eixos das partículas de luz, um deles sempre orientado na direção do raio de luz, e outros dois eixos sujeitos a sofrer efeitos de forças repulsivas que os orientariam perpendicularmente à elas.

Diversos efeitos associados à polarização da luz se tornaram centrais nos estudos da ótica entre os laplacianos na década de 1810. Pesquisas desenvolvidas principalmente por Arago e Biot fortaleceram o paradigma corpuscular com avanços na compreensão da polarização cromática, polarização rotacional e a polarização observada em anéis de Newton.<sup>2</sup>

Até os anos finais daquela década, a teoria corpuscular se desenvolveu de forma a dar

---

<sup>2</sup>Faixas coloridas que aparecem quando a luz passa entre o estreito espaço entre, por exemplo, duas lentes pressionadas uma a outra. Tal efeito por largamente estudado por Newton. (BUCHWALD, 2014, p. 449)

conta de uma longa lista de fenômenos associados à refração, reflexão e polarização, (ibid, p. 152-3), expandindo os limites do paradigma e acarretando avanços técnicos e experimentais na área.

Enquanto esse desenvolvimento ocorria na França, o médico e filósofo natural Thomas Young, na Inglaterra, revivia a teoria de Huygens, adicionando a exigência de que a luz, assim como o som, consistiria em uma série de picos e vales, regularmente espaçados que poderiam gerar interferências; a distância entre um pico e um pico, e um vale e outra vale, designariam o comprimento da onda luminosa, que determinaria sua cor. Com o princípio da interferência, Young podia explicar diversos efeitos de difração, cuja explicação quantitativa ainda escapava à teoria corpuscular (BUCHWALD, 1981, p. 218). Apesar de a oposição à teoria ondulatória blindar o programa laplaciano no âmbito das pesquisas, das publicações e das instituições de educação, François Arago<sup>3</sup> começa a manifestar interesse nos desenvolvimentos dos trabalhos de Young e do pouco conhecido engenheiro graduado pela Escola Politécnica, Augustin Fresnel. Segundo Frankel, entre os anos de 1813 e 1814, Arago já havia abandonado a teoria corpuscular, e durante os anos seguintes se tornaria um opositor sistemático da teoria corpuscular e uma espécie de padrinho científico de Fresnel no círculo parisiense.

Os estudos sobre a difração eram centrais para a teoria ondulatória, que em meados da década de 1810 era ainda pouco desenvolvida. Ao final do ano de 1818, Fresnel havia desenvolvido uma sofisticada estrutura matemática que permitia o cálculo geral dos padrões de interferência (BUCHWALD, 1981). Seu trabalho<sup>4</sup> era um tratado no qual derivava rigorosamente quase todos os fenômenos de difração partindo de princípios simples. Em 1819, esse trabalho foi premiado pela Académie des Sciences (ver 2.3.2.1), cuja comissão (formada por Gay-Lussac, Jacques Charles, Berthollet e Laplace), em 1817, havia escolhido a difração como assunto de sua competição bianual em física. Os laplacianos, segundo Frankel, esperavam que a teoria corpuscular obtivesse sucesso na competição, assim como aconteceu em 1808, quando Malus conquistou o prêmio por trabalhos em dupla refração.

Apesar da teoria ondulatória de Fresnel ter recebido o prêmio pela difração, sua teoria não fazia referência aos efeitos de polarização, um grande trunfo da teoria emissionista. Além disso, a polarização era um efeito inconcebível no sistema ondulatório, considerando que a luz se propagava por meio de um meio fluido como o éter. Vibrações dadas por compressões

---

<sup>3</sup>Por motivos científicos, mas também sociais, ver Frankel, 1976

<sup>4</sup>‘Mémoire sur la diffraction de la lumière couronné par l’Académie des Sciences

e rarefações que ocorrem na mesma direção da propagação não apresentam efeitos assimétricos perpendiculares ao movimento da onda, que se esperaria nos fenômenos de polarização (FRANKEL, 1976).

Fresnel começou a trabalhar com efeitos de polarização e coloração em 1816, quando tentou criar a interferência entre raios ordinários e extraordinários provenientes de um material birrefringente. O fracasso em produzir tal fenômeno o fez conjecturar que raios polarizados em direções perpendiculares um ao outro, não são capazes de gerar os mesmo efeitos que se observam com raios não polarizados, ou polarizados na mesma direção. Uma série de experimentos foi realizada por Fresnel e Arago, confirmando que raios polarizados perpendicularmente entre si não geram padrões de interferência (ibid.).

Em 1821, Fresnel formulou uma ousada hipótese para lidar com os resultados de seus estudos sobre a polarização: afirmou que as ondas luminosas são constituídas por vibrações transversais, e não longitudinais. Essa era a única maneira de explicar a polarização com o uso da teoria ondulatória. A introdução dessa hipótese foi extremamente frutífera. Com a estrutura transversalmente ondulatória da luz, combinada com o princípio da interferência, a dependência da cor com o comprimento de onda, a conservação da *vis viva* e a continuidade, Fresnel foi capaz de construir explicações para todos os fenômenos óticos relevantes, à exceção da dispersão: reflexão, refração, dupla refração, polarização, interferências, coloração da luz polarizada em cristais finos, e polarização rotacional. Já em 1822, a teoria ondulatória se mostrava mais geral e simples do que sua competidora, a teoria corpuscular. Na França, em pouco tempo, a teoria ondulatória suplantaria a antes dominante concepção corpuscular. Nas ilhas britânicas, a defesa do corpuscularismo na ótica perdurou durante os anos 1830 devido, segundo Cantor (1975), a resistência metodológica em se assumir a existência de um éter sutil e universal que amparasse a propagação das ondas luminosas. Cantor argumenta que o método hipotético-dedutivo não era bem aceito à época, devida à influência da epistemologia indutivista recebida por aquela geração de filósofos naturais, marcada pela máxima newtoniana *hypotheses non fingo*<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup>Tal posicionamento metodológico pode ser constatado no ensaio “Observações sobre luz e cores” (1756), do filósofo natural escocês Thomas Melvill (1723 - 1756), cuja tradução comentada foi publicada por Moura (2021). Buscando criticar a defesa de Euler da concepção vibracional da luz, Melvill comenta “que a teoria Newtoniana da luz e cores não depende de qualquer hipótese particular com respeito a natureza íntima da luz (da mesma maneira que seu sistema de gravitação universal é independente de todas [...] as hipóteses acerca da causa da gravidade). Em seu *Óptica*, ele estabelece integralmente suas descobertas, sequer perguntando se a luz consiste em vibrações propagadas através de um fluido ou de partículas projetadas em linhas retas a partir do corpo luminoso” (ibid. p. 714)

Embora a teoria ondulatória tenha se tornado dominante, ela tinha um problema fundamental a respeito de suas bases mecânicas. Não se conhecia fluido nenhum, que pudesse dar uma materialidade concebível ao éter, que fosse capaz de gerar vibrações exclusivamente transversais. Fresnel idealizou um modelo no qual os átomos de éter estariam ligados por forças fracas, oferecendo pouca resistência ao movimento de corpos macroscópicos, mas que seriam capazes de transmitir vibrações transversais infinitesimais entre eles. Young apontou que este modelo se aproximava mais a um sólido elástico do que a um fluido. E, de fato, modelos de sólidos elásticos foram amplamente estudados para na tentativa de se conceber a estrutura física do éter (FRANKEL, 1976, p. 169). Como veremos mais adiante, uma multiplicidade de modelos para o éter foi proposta ao longo do século XIX, para que se pudesse construir uma imagem mecânica do éter que fosse livre de contradições e que desse origem aos fenômenos óticos conhecidos. (BUCHWALD, 2014; HUNT, 2015; PSILLOS, 2005 [1999]). Independente de um fluido ou um sólido elástico ser apropriado para representar o éter, Fresnel tinha clareza de que as propriedades apresentadas pela luz deveriam orientar a construção dos modelos, ao invés de supor a impossibilidade da geração de ondas transversais em meios mecânicos, como sugerem a inadequação parcial dos modelos de sólidos elásticos ou fluidos. Caso tais modelos não sejam capazes de gerar as propriedades conhecidas, deve-se reformá-los buscar outros modelos mais adequados (FRANKEL, 1976, p. 171), argumentava Fresnel. Como exporemos ao longo do capítulo, o problema da modelização de estrutura mecânica do éter perdurou por todo o século, até ser considerado um pseudo-problema. Os efeitos óticos, assim como os eletromagnéticos, não podem ser reduzidos mecanicamente. Apenas após o abandono da visão de mundo mecânica, cuja crise se tornou aguda nas últimas décadas do século XIX (ver 3.9.4), que se aboliria a necessidade de modelo mecânico do éter luminífero e eletromagnético

## 3.2 Aberração estelar e a explicação de James Bradley

Além dos fenômenos óticos já expostos na introdução deste capítulo, havia outra classe de efeitos óticos que causaram controvérsias entre os séculos XVIII e XIX, a saber, os fenômenos óticos em corpos em movimento. Nesta seção, trataremos da aberração estelar, que impôs dificuldades tanto à visão corpuscular quanto à visão ondulatória da luz.

Durante os anos de 1725 a 1726 o astrônomo James Bradley tentava detectar o efeito de paralaxe da estrela  $\gamma$  *draconis*. Surpreendentemente, o movimento observado se dava na direção perpendicular ao plano da órbita terrestre, o que não poderia ser explicado pela paralaxe anual

da estrela, configurando um novo tipo movimento das estrelas ([WHITTAKER, 1951](#)).

As tentativas de observações da paralaxe anual das estrelas fixas foram motivadas pela ampla aceitação de que a Terra se movia em uma órbita ao redor do Sol, em contraponto à antiga visão de mundo Aristotélico-Ptolomaica, de maneira que evidenciar observacionalmente este movimento foi um dos problemas postos pela Revolução Copernicana. Entretanto, não fora possível detectar o efeito, uma vez que os instrumentos não eram suficientemente precisos. Bradley iniciou suas observações da “estrela brilhante da Cabeça do Dragão”, ou  $\gamma$  *draconis*, no dia 3 de dezembro de 1725, quando esta se localizava próxima ao zênite. No dia 17 de dezembro, a estrela parecia ter se deslocado um pouco mais ou Sul, comparado às observações dos dias anteriores (dia 5, 11 e 12 de dezembro) (Bradley in [SARTON, 1931](#)).

Bradley, sem imaginar outra explicação plausível para este movimento, o atribuiu a incertezas de medição. A fim de determinar se a mudança continuava a acontecer, continuou a observar a estrela, quando no dia 20 de dezembro notou que ela se deslocara mais ainda ao Sul. Bradley enfatiza a surpresa causada pelas observações em questão: “Esta sensível alteração nos surpreendeu muito, e se deu na direção contrária daquela que teria sido, caso tivesse procedido pela paralaxe anual da estrela” (ibid, pp 244). Por algum tempo, Bradley imaginou que alguma particularidade do instrumento estivesse causando o desvio inesperado da posição da estrela, mas acabou por se convencer de que devia haver alguma “causa regular” dado o gradual aumento da distância entre a estrela e o Polo. Pelo começo de março de 1726 a estrela se encontrava a 20” de arco mais ao Sul do que no início da observações de dezembro do ano anterior, e parecia ter atingido a maior distância do zênite naquela direção; em meados de abril, depois de algumas observações terem acusado comportamento estacionário, seu movimento aparente se dava de volta na direção Norte e no começo de Junho havia passado à mesma distância do zênite quando foi observada pela primeira vez. Observando este padrão, no qual a posição aparente da estrela mudou em uma taxa de 1” de arco em três dias, Bradley conjecturou que a estrela continuaria a se deslocar no sentido Norte, o que foi confirmado pelas seguintes observações, até que em setembro ela se mostrava novamente estacionária, estando aproximadamente a 20” de arco mais ao norte comparada com a sua posição em junho, e no máximo 39” mais ao Norte do que estava em março (ibid). A partir de setembro voltava a se deslocar para o Sul, até que em dezembro estava aproximadamente na mesma posição que há doze meses atrás.

No ano seguinte, em 1727, Bradley continuou suas observações, desta vez com uma variedade de estrelas, segundo ele, no mínimo 12 estrelas suficientemente brilhantes. As obser-

vações, resumidas por Bradley foram as seguintes:

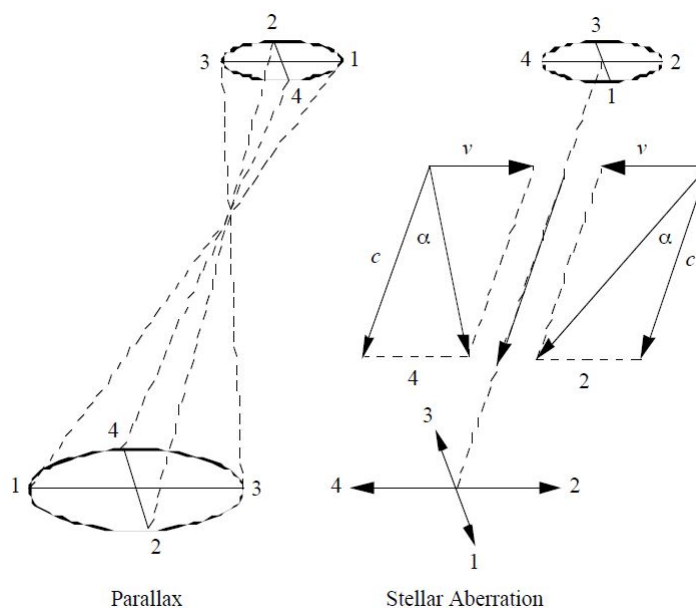
depois de ter continuado com minhas observações por alguns meses, eu descobri, o que eu depois percebi ser uma lei geral observada em todas as estrelas, a saber, todas elas se tornaram estacionárias, ou estavam mais ao sul ou ao norte quando passaram sobre meu Zênite [...] (ibid, 248).

Bradley observara que as estrelas percorriam deslocamentos aparentes cuja tendência era comum a todas elas, não deixando dúvidas de que possuíam a mesma causa. Primeiramente conjecturou que o fenômeno seria causado pelo movimento de nutação, ou seja, um movimento oscilatório do eixo da Terra devido à sua atração com a Lua. Não demorou a desconsiderar tal hipótese em favor de outra, que considerou mais adequada e que passou a adotar definitivamente. Para tal, se apoiou na hipótese de que a velocidade com a qual a luz se propaga ao longo do espaço entre a estrela e o observador tem um valor finito. Esta teoria sobre a propagação da luz, que não era aceita por todos os filósofos naturais, em particular na França (PEDERSEN, 2000, p. 501), já havia sido utilizada por Ole Römer em 1676, para explicar o atraso observado no eclipse da lua mais interna Júpiter. O fenômeno observado entre os anos 1725 e 1727 seria explicado pela combinação do movimento orbital anual da Terra como movimento da luz:

Percebi que se a luz é propagada no tempo, a posição aparente de um objeto fixo não seria a mesma quando o olho está em repouso, assim como quando está em movimento em qualquer outra direção diferente daquela cuja linha que passa pelo olho e pelo objeto, então quando o olho está se movendo em diferentes direções, a posição aparente do objeto seria diferente. (Bradley in SARTON, 1931, p. 250).

Segundo a teoria de Bradley, a mudança sistemática da posição aparente das estrelas seria causada pela constante mudança de velocidade relativa entre o observador e a luz emanada pelo corpo celeste. Desta maneira, tal teoria exige não apenas a hipótese da velocidade finita da luz, mas também assume que a Terra não pode estar parada, nem em movimento retilíneo uniforme, mas em movimento orbital em que seu vetor velocidade tem seu sentido e direção constantemente alterados. Caso a Terra tivesse movimento retilíneo uniforme este fenômeno jamais teria sido detectado (POINCARÉ, 2008 [1908]).

A paralaxe estelar também depende do movimento orbital da Terra, mas neste caso, a mudança aparente na posição das estrelas é causada pela mudança da posição da Terra, e não de



**Figura 3.1:** Extraída de Janssen e Stachel (2004, p. 4).

sua velocidade. A Figura 3.1 esquematiza a diferença entre os dois fenômenos. Na imagem da esquerda, representando a paralaxe, a intersecção das linhas pontilhadas corresponde a posição real de uma estrela; o círculo maior, situado abaixo representa o plano da eclíptica e a numeração de 1 a 4 representa diferentes posições ocupadas pela Terra ao longo do ano; numeração de 1 a 4 no círculo menor, situado acima, representa a posição aparente da estrela associada respectivamente cada posição da Terra. Já na imagem da direita, a eclíptica está reduzida a um ponto (considerando que a distância entre a Terra e a estrela é suficientemente grande para fazer tal aproximação) no encontro dos vetores numerados de 1 a 4. Estes vetores representam o sentido e direção da velocidade da Terra em diferentes épocas do ano; as posições numeradas de 1 a 4 representam a posição aparente respectivamente associadas a cada uma das épocas do ano. O diagrama de soma vetorial situado à esquerda representa a velocidade absoluta  $c$  da luz (ou seja, a velocidade da luz segundo o referencial absoluto do espaço newtoniano) subtraída do vetor 4, assim como no diagrama da direita representa  $c$  subtraído do vetor 2 (JANSSEN & STACHEL, 2004, p. 5). Esta explicação do fenômeno de aberração, como “mera consequência da composição dos vetores velocidade” foi proposta por Euler, e frequentemente considerada uma prova da ótica corpuscular, apesar de Euler ter advogado pela teoria ondulatória (DARRIGOL, 2012, p. 129).

O ângulo situado entre os vetores  $c$  e  $v$  é denominado ângulo de aberração: como o vetor  $v$  (no caso, a velocidade absoluta da Terra) é muito menor do que o vetor  $c$ , iguala-se o ângulo à razão  $v/c$ ; os efeitos observados são proporcionais a esta razão de ordem  $10^{-4}$ , frequentemente

referidos também como efeitos de primeira ordem de  $v/c$ . É um efeito pequeno, mas ainda assim maior do que a paralaxe (ibid). Efeitos de segunda ordem teriam uma precisão na ordem de  $(v/c)^2$ , como é o caso, por exemplo, dos experimentos de Michelson e Morley. Para que a luz da estrela chegue ao observador, o telescópio deve ser inclinado a um ângulo igual ao ângulo de aberração. A título de simplificação, Bradley expressa esta ideia reduzindo o telescópio a um tubo vazio:

Apesar de a posição real, ou verdadeira, de um objeto ser perpendicular a linha na qual o olho está se movendo, a posição visível não será esta, já que estará, sem dúvida, na direção do tubo [...] E em todos os casos, o seno da diferença entre a posição real e aparente do objeto está para o seno da inclinação do objeto em relação à linha pela qual o olho se move, como a velocidade do olho está para a velocidade da luz. (Bradley in [SARTON, 1931](#), p. 251-2).

Com esta teoria, foi capaz de deduzir o ângulo de aberração partindo de suas observações. Utilizando o desvio máximo das estrelas em relação ao polo da eclíptica, Bradley deduziu a razão entre a velocidade da luz emitida pelas estrelas e a velocidade orbital da Terra:

Conhecendo maior alteração da posição da estrela no polo da eclíptica (cujo efeito equivale à proporção entre a velocidade da luz e a da Terra em movimento orbital) não será difícil encontrar qual será a diferença, baseada nesta explicação, entre a posição verdadeira e aparente de qualquer outra estrela em qualquer instante; e [...] sendo dada a diferença entre a posição real e aparente, a proporção entre a velocidade da luz e da Terra em movimento orbital pode ser encontrado. (Bradley in [SARTON, 1931](#), p. 253).

A explicação de Bradley era consistente com a teoria emissionista da luz, tendo sido interpretada como uma prova da sua natureza corpuscular ([DARRIGOL, 2012](#), p. 129). Ele imaginou a luz da estrela sendo observada por um tubo estreito e sugeriu que a partícula de luz só poderia alcançar o olho do observador, sem que encontrasse as paredes do tubo, caso este fosse inclinado em relação à posição real da estrela.

Uma conclusão curiosa obtida pelo astrônomo foi a constância do ângulo para todas as estrelas observadas. Além disso, constatou também que o valor obtido da velocidade relativa da luz estava de acordo com a ordem de grandeza da velocidade da luz deduzida por Römer



partindo de suas observações dos satélites de Júpiter. Tal concordância entre a velocidade da luz emitida de todas as estrelas e a reflexão da luz do Sol nas luas de Júpiter era notável, já que a teoria emissionista admitia um grande espectro de velocidades para os corpúsculos. Este tópico controverso ainda seria muito discutido nos anos seguintes, como teremos a oportunidade de analisar mais adiante.

Pelo ano de 1730, com a determinação da velocidade relativa da luz a partir dos fenômenos de aberração, a finitude da velocidade da luz já era considerada um fato bem estabelecido, mas a questão relacionada à velocidade da luz em meios transparentes ainda reunia muitas discordâncias (PEDERSEN, 2000, p. 502). Não havia consenso se a luz tinha sua velocidade alterada ao mudar de um meio a outro; se era mais rápida no vácuo, ou em meios transparentes, como a água ou o vidro. As teorias emissionistas afirmavam que a luz era mais rápida em meios densos do que no vácuo, interpretando a lei da refração da seguinte maneira:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{c_r}{c_i} = n, \quad (3.1)$$

em que  $c_r$  corresponde à velocidade da luz depois de sofrida a refração e  $c_i$  sua velocidade antes de atingir a interface entre os meios. Esta lei é comumente chamada de lei dos inversos das velocidades. O aumento da velocidade da luz seria causado por uma força perpendicular ao dióptro que agiria nas partículas de luz (ver seção 3.1). (ibid).

Já as teorias ondulatórias previam que a luz era mais rápida no vácuo do que nos meios densos, propondo uma lei direta das velocidades:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{c_i}{c_r} = n. \quad (3.2)$$

Acreditava-se que medidas da velocidade da luz em diversos meios pacificariam o debate (ibid, p. 502-3). Entretanto, esta querela permaneceu entre os assuntos relevantes da ótica física até meados do século seguinte, quando Fizeau mediu a velocidade da luz na água e no ar, dando razão à teoria ondulatória nesta disputa.

A interpretação de Bradley para a aberração estelar, apesar de compatível com a visão dominante sobre a natureza da luz, foi alvo de controversas por parte de estudiosos da ótica da época. Thomas Melvill, filósofo natural escocês, contestava que o valor da velocidade da luz obtido pela fórmula da aberração correspondesse à sua velocidade no espaço livre, defendendo que o valor encontrado por Bradley se referia à velocidade da luz dentro do meio aquoso que preenche o olho humano (PEDERSEN, 2000; MOURA, 2021). Em outras palavras, a veloci-

dade encontrada por Bradley seria igual ao valor da luz na água, e não no vácuo. As ideias de Melvill inspiraram o filósofo Patrick Wilson a realizar investigações teóricas sobre como a luz se comportaria ao viajar dentro do olho e também, em um aparato análogo, um telescópio preenchido com água. Na próxima seção será dedicada a comentar esse experimento de pensamento e sua importância para os debates sobre a ótica dos corpos em movimento.

### 3.3 Telescópio cheio de água

Anos depois das descobertas de Bradley, durante a década de 1750, o filósofo natural escocês Thomas Melvill pesquisava sobre teoria da luz e das cores e adotava a doutrina emissionista que, como já comentado, contava com duas importantes hipóteses a respeito do comportamento da luz quando esta muda de meio: i) uma força age sobre os raios de luz perpendicularmente à superfície refratora; ii) assume como verdadeira a lei dos inversos da velocidade (ibid, p. 506).

Esta doutrina recebida produzia consequências interessantes a respeito das teorias de Bradley e Römer: como descoberto por Newton em seus estudos sobre a decomposição da luz branca, cada uma das cores possuem diferentes índices de refração. Tal constatação, combinada com as leis dos inversos da velocidade, sugeria que diferentes cores teriam diferentes velocidades, sendo a luz vermelha e mais rápida e a violeta a mais lenta. Desta maneira, uma determinada cor deveria ter um ângulo de aberração e uma posição aparente diferentes das demais; ao observar os eclipses das luas de Júpiter, a luz vermelha deveria chegar antes ao telescópio, formando uma imagem em primeiro momento vermelha e gradualmente tornando-se branca. Melvill, utilizando as duas hipóteses principais, deduziu que levariam 32 segundos para a lua transitar entre o vermelho e o branco, o que não era observado empiricamente<sup>6</sup>.

As contribuições mais importantes de Melvill para a concepção do experimento do telescópio cheio de água, foram suas interpretações das observações de Römer e Bradley. Ele discordava que ambas as medições da velocidade da luz eram equivalentes, ou seja, correspondiam à velocidade da luz no espaço vazio, argumentando que aquela medida por Bradley era, na verdade, a velocidade da luz no humor vítreo do olho do observador, enquanto a primeira, esta sim, correspondia à velocidade da luz no vácuo.

A lei do ângulo de aberração, segundo Melvill, corresponderia a  $\tan \alpha = v/c_o$ , onde  $v$

---

<sup>6</sup>Para mais detalhes sobre este cálculo, (PEDERSEN, 2000, p. 505-9).

corresponde à velocidade do observador, e  $c_o$  corresponde à velocidade da luz dentro no fluido ocular, cujo índice de refração para a luz homogênea, que seria muito semelhante ao da água, levando ao valor aproximado de  $c_o$  como sendo  $4c/3$ .

Como Bradley defendeu em seu famoso estudo publicado em 1729, as suas medidas e as de Römer eram compatíveis, ou seja, ambas produziam valores concordantes da velocidade da luz no vácuo. Apesar disso, Melvill sugeria que novas medidas mais precisas fossem realizadas pelo método de Römer, para que assim ficasse explícita a diferença entre os dois métodos. Bradley, que recebeu cartas de Melvill sobre seus estudos sobre a luz e as cores, discordou veementemente de suas conclusões, alegando que a inclinação do telescópio nada tinha a ver com a velocidade da luz dentro do olho (ibid, 509-12).

As mesmas ideias de Melvill figuram em uma aula do professor Patrick Wilson datada de 1770 (ibid, 513-14); Wilson confiava na precisão das observações de Bradley, mas não em sua interpretação. O valor  $\tan 20'' \cdot 2 = 1/10210$ , ou seja, a tangente do ângulo constante de aberração, corresponderia na verdade à relação entre a velocidade da Terra e a velocidade da luz no humor vítreo. Segundo a interpretação de Bradley, o valor da aberração permitia estimar a velocidade da luz, uma vez que a velocidade da Terra era conhecida e, portanto, estimar o tempo que a luz do Sol demoraria para chegar a Terra:  $8'12''$ , ou  $492''$  (PEDERSEN, 2000, p. 514). Segundo Wilson, seguindo o raciocínio de Melvill, bem como o valor de  $4/3$  do índice de refração do humor vítreo, a luz do Sol demoraria  $10'56''$  para chegar à Terra. De fato, caso as medidas de Bradley e as hipóteses de Melvill e Wilson estivessem corretas, tal previsão teórica seria internamente consistente, uma vez que a velocidade da luz dentro do olho seria maior do que no vácuo, fazendo com que a previsão de Bradley subestimasse o tempo necessário para que a luz do Sol chegasse a Terra.

Segundo a reconstrução de Pedersen, este era o estado das ideias de Patrick Wilson em 1770, que mudaram ao longo dos anos, como se pode constatar em um artigo seu de 1782, em que, apesar de adotar as mesmas doutrinas sobre a refração da luz, obtém uma conclusão diferente: a aberração causada pelo olho de um observador e pelo telescópio não deveria se alterar, uma vez que o raio que passa pelo eixo do telescópio passa também pelo eixo do olho.

Com isso em mente, Wilson propõe um experimento que poderia confirmar esta ideia. Este consistiria na medição do ângulo de aberração estelar utilizando um telescópio cheio de água, ou outro fluido transparente. Até a realização efetiva do experimento, por George Airy, em 1871 confirmando a igualdade do ângulo de aberração quando realizada com um telescópio

comum (WHITTAKER, 1951, p. 113), as análises eram puramente teóricas, configurando uma experiência de pensamento.

A análise de Wilson consistia na descrição do fenômeno em dois referenciais diferentes, a saber, em um referencial absoluto  $S$  e um em repouso em relação ao telescópio, que chamaremos de  $S'$ . Em outras palavras,  $S'$  se move com velocidade  $v$  em relação a  $S$ . A título de simplificação, Wilson considerou um raio de luz que em  $S$  é perpendicular ao vetor velocidade  $v$  do telescópio, ou seja, seria a luz emitida por uma estrela localizada no polo da eclíptica. No referencial  $S'$ , o raio de luz incide perpendicularmente na abertura do telescópio, desta maneira, paralelo ao eixo deste. Com essas considerações notamos que no referencial  $S$  ocorre um fenômeno de refração, uma vez que a luz incide formando um ângulo de incidência  $\hat{i}$  em relação ao eixo do telescópio cheio de água, enquanto que em  $S'$  não ocorre a refração, e que o ângulo  $\hat{i}$  que aparece em  $S$  é o mesmo ângulo de inclinação do telescópio em  $S'$ . Podemos associar à  $S$  as velocidades da luz fora do telescópio  $c$  e  $c_a$  dentro dele; e em  $S'$  temos a transformação galileana de velocidades  $c' = c - v$  fora do telescópio e  $c'_a = c_a - v$ , ambas na mesma direção da inclinação do telescópio. Vale lembrar que Wilson continua adotando a lei dos inversos das velocidades, então as partículas de luz aceleram no sentido do eixo do telescópio ao penetrar na água ( $c_a = nc > c$ ), mas as componentes de  $c$  e  $c'$  paralelas à interface entre o ar e água são iguais (DARRIGOL, 2012, p.130).

Utilizando este princípio e fazendo uma análise geométrica dos raios de luz em ambos os referenciais, Wilson mostra que o raio de luz deve incidir no mesmo ponto ao fundo do telescópio, quer se observe de  $S$  ou de  $S'$ , uma vez que a distância  $d$  percorrida por este ponto é a mesma distância percorrida pelas partículas de luz no sentido horizontal (causada pela refração da luz ao passar do ar para a água), dada por  $d = ct \tan \hat{i}$ , recordando que  $\tan \hat{i} = v/c$ , de acordo com a aberração de Bradley<sup>7</sup>. Wilson interpretou este resultado de seu experimento de pensamento, a invariância do ângulo de aberração mediante observação por um telescópio cheio de água, como a prova da validade da doutrina newtoniana do inverso das velocidades. Veremos mais adiante que Fresnel provou que não há diferença entre a aberração no telescópio cheio de água e o telescópio comum sem uso da teoria corpuscular ou da lei dos inversos da velocidade, mas sim fazendo uso da teoria ondulatória e de suas teorias do arraste parcial do éter.

A primeira sugestão de se realizar experimentos com um telescópio cheio de água foi

---

<sup>7</sup>Para maiores detalhes sobre a análise geométrica, ver. (PEDERSEN, 2000, 518-20; 521-22).

proposta pelo padre Roger Boscovich em uma carta enviada ao astrônomo Jérôme Lefrançois de Lalande em 1766, na qual afirmava que o ângulo de aberração diferiria daquele determinado por Bradley, chegando nesta conclusão apenas substituindo na equação da aberração de Bradley o valor da velocidade da luz no vácuo pela velocidade da luz na água (DARRIGOL, 2012, p.129). Expresso em notação moderna, o ângulo de aberração obtido por meio deste experimento deveria ser  $\alpha' = n^2 \frac{v}{c}$ , de maneira que a diferença entre este ângulo de aberração e o obtido com o telescópio oco permitiria calcular a velocidade absoluta da Terra em relação ao éter (MENEZES & LORDÊLO, 2019):  $\Delta\alpha = \alpha' - \alpha = (n^2 - 1) \frac{v}{c}$ .

Entretanto, Boscovich só publicou esta ideia em 1785 juntamente com a ideia se comprar a aberração terrestre, que consiste na observação de um objeto distante situado na Terra, com um telescópio comum e outro cheio de água (MARTINS, 2015, p.46). Uma das justificativas de se propor tal experimento é que seria mais fácil observar um deslocamento angular entre as duas observações com um objeto terrestre do que com a luz enfraquecida de um corpo celeste. Como um telescópio com água em seu interior seria um instrumento de difícil construção, o astrônomo escocês John Robison concebeu a construção de um aparelho muito mais simples, que consistia em uma haste de vidro que sendo um material transparente produziria os mesmo efeito que a água (PEDERSEN, 2000, p. 525). Apesar disso, Robison nunca chegou a realizar seu experimento por perceber que como o aparato e o objeto observado teriam a mesma velocidade em relação ao espaço absoluto, nenhum efeito deveria ser observado. Robison concluiu também, em 1790, que qualquer que fosse o telescópio utilizado, os resultados observacionais da aberração terrestre ou estelar deveriam ser sempre os mesmo, uma vez que a teoria corpuscular é uma teoria mecânica, os fenômenos óticos deveriam obedecer o princípio da relatividade dos movimentos (MARTINS, 2015, p.46).

Com exceção de Boscovich, que ignorou os efeitos de refração no espaço absoluto, como demonstrado por Wilson, todos os proponentes de experimentos com telescópio preenchidos com água perceberam que nenhuma aberração adicional ocorreria quando comparada com os telescópios usuais.

O fenômeno da aberração estelar, descoberto e explicado por Bradley estimulou muito debate sobre a velocidade da luz em diversos meios, como pudemos constatar nesta seção, mas não foi o único tópico controverso que se fez emergir: a constância do ângulo de aberração para todas as estrelas observadas era um resultado notável para a teoria corpuscular, uma vez que esta permitia que partículas de luz fossem emitidas em todo um espectro de velocidades e que

também obedecesse a soma de velocidades galileana. Esta estranha constatação acusada pelas observações da aberração da luz das estrelas motivou o astrônomo François Arago a realizar seu famoso experimento de 1810, tentando medir a velocidade absoluta da Terra a partir da refração da luz das estrelas em prismas em movimento, que será discutida na próxima seção.

### 3.4 Experimento de Arago de 1810

Como já explicitado anteriormente, a doutrina ótica newtoniana interpretava a o índice de refração da luz, presente na lei da refração de Descartes como a razão entre a velocidade da luz depois de refratada e antes de refratada, como expressa na equação

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{c_r}{c_i} = n. \quad (3.3)$$

A ótica desenvolvida pelos seguidores de Newton, tanto nas ilhas britânicas, quanto no continente - especialmente na França - tinha suas raízes na filosofia mecanicista, que buscava reduzir as diversas áreas dos fenômenos naturais a causas mecânicas e explicá-las de maneira coerentes com as bases teóricas newtonianas. Dito isso, atentemos ao termo  $c_i$  da equação acima, a velocidade de incidência de um raio de luz em um meio refrator: esta deve ser coerente com a soma galileana de velocidades de maneira que, se medida no referencial do corpo refrator deve-se considerar a velocidade deste corpo em relação ao espaço absoluto. Desta maneira, este termo deve ser dado pela soma da velocidade absoluta da luz com a velocidade do corpo. Consequentemente, o ângulo de refração deve depender da velocidade relativa entre o meio diáfano e o raio de luz.

Nas seções anteriores, vimos que os ângulos de aberração estelar medidos por Bradley para várias estrelas eram idênticos, não importando de qual estrela o raio de luz era emitido, o que entrava em contradição com alguns aspectos da tradição newtoniana, como a já mencionada adição de velocidades. Outra maneira de se alterar a velocidade da luz seria via gravitação, sugerida pela primeira vez pelo astrônomo John Mitchell (1724-1793), na década de 1770 (DARRIGOL, 2012, p. 131). Segundo Darrigol, utilizando termos modernos, a velocidade dos corpúsculos emitidos por corpos celestes perderia uma fração de sua velocidade primitiva que dependeria do valor do potencial gravitacional da estrela em sua superfície. Utilizando estas hipóteses Mitchell teorizou a existência de corpos celestes invisíveis, algo semelhante aos bu-

racos negros previstos teoricamente pela Teoria da Relatividade Geral<sup>8</sup>, que seriam estrelas tão massivas que não deixariam escapar de sua superfície nenhuma partícula de luz:

Se realmente existir na natureza quaisquer corpos, cuja densidade não seja menor que a do Sol, e cujos diâmetros sejam mais de 500 vezes o diâmetro do Sol, uma vez que suas luzes não poderiam chegar até nós; ou se existirem quaisquer outros corpos de tamanho um pouco menor, que não sejam naturalmente luminosos; da existência de corpos sob qualquer uma dessas circunstâncias, não poderíamos ter informações pela visão; todavia, se quaisquer outros corpos luminosos girarem ao redor deles, talvez ainda assim, pelo movimento desses corpos giratórios, possamos inferir a existência dos [corpos] centrais com algum grau de probabilidade; (MITCHELL, 1784, tradução de SILVA, MOURA, MEDEIROS, 2020, p. 303)

Para o caso do Sol, segundo os cálculos de Mitchel, suas partículas luminosas perderiam uma fração de 1/494.000 de sua velocidade (PEDERSEN, 2000, p. 537). Tal variação alteraria na mesma ordem de grandeza o índice de refração do raio de luz.

Laplace discutiu o mesmo tópico e realizou cálculos semelhantes na primeira edição de sua *Exposition du Systême du Monde*:

Uma estrela luminosa de mesma densidade da Terra e com diâmetro 250 vezes maior do que o Sol não deixaria nenhum de seus raios nos alcançar, devido a sua gravitação; é então possível que o maior corpo luminoso do universo seja invisível. Uma estrela, que não seja deste tamanho, mas que supere consideravelmente o do Sol diminuiria sensivelmente a velocidade da luz, e desta maneira aumentaria sua aberração. Esta diferença na aberração [...] no que se refere às estrelas fixas, será o principal objeto para a astronomia no futuro. (Laplace, 1795-6, in PEDERSEN, 2000, p. 538)

À época, Laplace não apenas confiava nesta predição baseada na filosofia mecanicista e na física newtoniana como projetava que tal efeito seria acusado por medidas da aberração

---

<sup>8</sup>Como esclarecem Silva, Moura e Medeiros (2020, p. 321): “Os pressupostos de Mitchell são, obviamente, muito diferentes dos de Einstein. Enquanto para Einstein o desvio da luz, cuja velocidade é constante, é devido às mudanças que o campo gravitacional ocasiona no espaço, adotando-se a geometria não-euclidiana riemanniana, para Mitchell o espaço era absoluto, euclidiano, e a força de atração gravitacional afetaria a velocidade da luz. A luz, para ser afetada pela força gravitacional, possuía momento, conforme consideravam as versões da óptica newtoniana ao final do século 18”.

estelar, possibilitando estimar assim a magnitude das estrelas. Mitchell, confiando nos mesmos pressupostos, propõe um experimento semelhante ao realizado por Arago em 1810: medir o ângulo de refração da luz em um prisma de vidro emitida por estrelas binárias que gozassem de clara desigualdade de massas (MITCHELL, 1784; PEDERSEN, 2000). Em 1806, Biot e Arago realizam medições da refração da luz em prismas emitida por diversos astros. Os resultados, que endossaram a estranha constância da velocidade da luz, foram apresentados à Academia de Ciências de Paris (PIETROCOLA, 1993).

No dia 10 de dezembro de 1810, Arago leu à Primeira Classe do Instituto sua *Mémoire sur la vitesse de la lumière*, descrevendo a realização e resultados de seu experimento em que mediu o desvio sofrido pela luz de uma mesma estrela em um prisma em duas situações distintas: em uma o prisma, carregado pelo movimento da Terra, se deslocava no sentido contrário ao movimento da luz; na outra situação, o prisma se deslocava no mesmo sentido da propagação da luz, gerando, em tese, duas velocidades relativas diferentes entre o prisma os raios de luz da estrela observada. O objetivo do experimento era constatar se havia desigualdades no desvio causado pela refração em cada um dos casos.

Arago começa sua *Mémoire* contextualizando a controversa questão sobre a constância da velocidade da luz, comentando a concordância entre os resultados obtidos pelo método de Roemer e pelo método de Bradley (ressaltando que a aberração estelar é um efeito anual causado pela combinação do movimento da luz com o movimento do observador, ou seja, Arago estava pensando dentro da doutrina emissionista newtoniana), bem como a multiplicação de observações da aberração estelar:

A velocidade deduzida deste último fenômeno [aberração] diferia um pouco daquela obtida pelos eclipses do primeiro satélite [medições de Roëmer]; mas a perfeição das tabelas trazidas pelo trabalho de Laplace tornou possível retornar a esses primeiros cálculos; a aberração que Delambre encontrou pela discussão de um grande número de eclipses de satélites é absolutamente a mesma que a que Bradley deduziu de suas observações. [...] como as aberrações absolutas, deduzidas das observações diretas, são essencialmente as mesmas, Bradley concluiu que o movimento da luz é uniforme em todas as distâncias, e que as aberrações de todos os corpos celestes podem ser calculadas com a mesma constante. (ARAGO, 1853 [1810], p. 39-40)

Arago continua em seguida mostrando quais seriam as expectativas segundo a visão recebida:



Alguns astrônomos não adotariam, entretanto, estes resultados; eles suporiam que as estrelas de diferentes tamanhos poderiam emitir raios com diferentes velocidades. Deve-se admitir que essa ideia, especialmente no sistema de emissão, era natural e provável. (ibid, p 40)

Em seguida, Arago diverge em relação à posição de Laplace, que apostava que medidas da aberração estelar acusariam diferenças na velocidade da luz, afirmando que este método dificilmente solucionaria a questão, uma vez que uma diferença de 1/20 da velocidade total da luz não produziria na medida da aberração uma diferença superior a 1". Tal diferença na inclinação do telescópio não poderia ser sensível, segundo Arago, nem aos mais precisos dos instrumentos (ibid, 40). Arago também comenta brevemente que os experimentos de Wilson, Boscovich e Robison com um telescópio cheio de água também não produziram efeitos mensuráveis, já que a desigualdade da velocidade da luz em meio diferentes seria muito sensível para ser acusada pelos instrumentos de medidas. Para se detectar pequenas variações na velocidade da luz Arago sugere que estas sejam inferidas não da aberração, mas a partir da refração da luz em um prisma transparente:

[...] o desvio que os raios de luz penetram obliquamente nos corpos diáfanos é uma função determinada de sua velocidade primitiva, veremos que a observação do desvio total, ao qual estão sujeitos, ao atravessar um prisma, fornece uma medida natural de suas velocidades. Este método é muito eficiente em tornar sensível pequenas desigualdades. (ibid, p 40)

Para evitar que o prisma espalhasse a luz da estrela e comprometesse as medidas, Arago colou dois tipos diferentes de primas de baixa dispersão, um feito de vidro crown (*crown-glass*) e outro feito de vidro de sílex (*flint-glass*). Combinados, estes dois tipos de vidro corrigem aberrações cromáticas<sup>9</sup>; no caso do experimento em questão, a luz dispersa pelo primeiro prisma seria combinada novamente em luz branca evitando sua decomposição.

Foram observados os desvios da luz da mesma estrela às 6 horas da manhã e às 6 horas da tarde. O vetor velocidade da Terra no primeiro caso seria anti-paralelo ao segundo, resultando comparativamente que a diferença de velocidade relativa entre o prisma e os raios de luz seria de duas vezes a velocidade de translação da Terra. Como era sabido à época, esta última seria igual

<sup>9</sup><https://www.britannica.com/technology/flint-glass>, acessado às 15:03 do dia 29/01/2019

a aproximadamente  $1/10000$  da velocidade da luz, então a diferença esperada entre a velocidade de luz as 6 da manhã e as 6 da tarde seria uma fração de  $1/5000$  de  $c$ . Segundo os cálculos de Arago<sup>10</sup>, a velocidade da Terra ( $c/10000$ ) causaria uma mudança de desvio de  $6''$ , então o desvio total entre as duas medidas (equivalente a velocidade de  $c/5000$ ) geraria um desvio de  $12''$  (ibid, 46), diferença compatível com a precisão de seus instrumentos.

Ao realizar o experimento, Arago constatou que todos os raios de luz foram sujeitos ao mesmo desvio angular, um resultado em “contradição manifesta com a teoria newtoniana” (ibid.). Apesar de as expectativas frutos desta teoria terem sido frustradas, Arago propõe uma explicação ainda dentro da teoria emissionista da luz, tentando preservá-la:

os corpos luminosos emitem raios com todos os tipos de velocidades, desde que também admitamos que esses raios só são visíveis quando suas velocidades se encontram entre certos limites. Nesta hipótese, de fato, a visibilidade dos raios dependerá de suas velocidades relativas e, como essas mesmas velocidades determinam a quantidade de refração, os raios visíveis serão sempre igualmente refratados. (ibid)

Em outras palavras, as estrelas, ou qualquer fonte primária de luz, emitem corpúsculos com um largo espectro de velocidades, mas apenas uma faixa estreita deste espectro tem a capacidade de despertar os sentidos da visão e serem reconhecidos como cores, ou luz branca. Esta faixa do espectro é definida pela velocidade relativa entre a partícula e o observador, de maneira que este sempre observará a luz visível com a mesma velocidade, não sendo possível então, constatar desvios na refração do prisma.

Segundo Pedersen, Arago introduziu um tipo de teoria da relatividade nas ciências óticas, ao afirmar que, independente do estado de movimento do observador, a luz visível sempre será observada com a mesma velocidade. Entretanto, não pode ser considerada uma espécie de ideia precursora da relatividade de Einstein, já que a conjectura de Arago se baseava fortemente em suposições fisiológicas da visão (PEDERSEN, 2000, p. 540).

Até agora, os fenômenos referente às óticas dos corpos em movimento foram tratados apenas segundo a teoria corpuscular da luz, a visão predominante na ciência ocidental daquela época, início do século XIX. Veremos em seguida como as emergentes teorias ondulatórias lidavam com estes problemas tão controversos, e como os modelos de éter em conjunção com a

---

<sup>10</sup>implícitos em sua *Mémoire*, mas explicitados em (PEDERSEN, 2000, p. 539-40).

teoria ondulatória conseguiam gerar frutos e mostrar-se, em certa medida, à altura dos desafios que a natureza impunha a esses sistemas teóricos.

### 3.5 As teorias do éter de Young e Stokes para a aberração estelar

Em 1804 foi publicado nas *Philosophical Transactions* o trabalho *Experiments and Calculations relative to Physical Optics*, de Thomas Young, tratando dos efeitos de interferência e difração, manifestamente contrários à teoria emissionista, favorecendo uma visão ondulatória em analogia com o som. Na quarta seção deste artigo, intitulada *Argumentative Inference Respecting the Nature of Light*, Young faz um breve comentário sobre o fenômeno da aberração estelar: “[...] considerando o fenômeno da aberração das estrelas, estou disposto a acreditar que o éter luminífero penetra a substância de todos os corpos materiais com pequena ou nenhuma resistência, tão livremente talvez como o vento que passa por um bosque de árvores.” (YOUNG, 1804).

O que configurava um desafio para a concepção emissionista da ótica, em que o movimento relativo entre a fonte luminosa e o observador era determinante para a explicação da aberração, se tornava um efeito simples quando se concebia a luz como vibrações em um meio onde esta se propaga, “já que numa visão ondulatória a velocidade de propagação da luz não depende da fonte emissora, mas simplesmente do meio no qual a perturbação propaga-se” (PIETROCOLA, 1993, p. 164). Esta teoria também assimilava com a mesma explicação os experimentos de Biot e Arago de 1806, em que mediram com prismas o ângulo de refração da luz emitida por diversas estrelas (STACHEL, 2005a). Segundo essa perspectiva, a constância de ângulo de aberração era uma consequência natural de seus princípios, mas contava com uma importante assumpção sobre a interação do éter com a matéria: o éter seria um meio tão rarefeito e composto de partículas tão sutis e diminutas, que seria transparente à matéria (e consequentemente aos planetas que atravessam o espaço preenchido por esta substância). A passagem de matéria ordinária pelo éter não o perturbaria, nem o arrastaria, permanecendo sempre imóvel.

Entretanto, esta teoria não era compatível com o experimento de Arago de 1810. A concepção ondulatória da ótica requeria propriedades incompatíveis para explicar por um lado a aberração e por outro a refração. A igualdade dos ângulos de refração e a consequente constância da velocidade de luz constatadas por Arago exigiam que a Terra imprimisse integralmente seu movimento ao éter ao seu redor, como uma espécie de “atmosfera do éter” que fosse por ela

carregado, estando sempre em repouso em relação ao planeta, explicando os resultados observados com os experimentos dos primas (PEDERSEN, 2000, p. 549).

Na década de 1840, o britânico George Stokes propõe uma teoria de éter em que este era totalmente arrastado pelo movimento planetário. Desde que a estrutura das ondas luminosas fora estabelecida pelos trabalhos de Fresnel entre as décadas de 1810 e 1820 e nos anos subsequentes sua teoria ganhava cada vez mais aceitação, tornou-se uma das principais questões da física teórica estabelecer modelos mecânicos da estrutura do éter que fosse capaz de produzir todos os fenômenos ópticos explicados pela teoria fresneliana (WILSON, 1972). Uma das características mais notáveis desta teoria era o fato de conceber apenas vibrações transversais para a propagação da luz, o que levou os físicos, dentre eles Stokes, a formularem modelos de sólidos elásticos para o éter, pois apenas sólidos são capazes de produzir vibrações transversais e polarização, fenômenos não observados em líquidos, por exemplo (EINSTEIN, 2007[1920]).

Stokes, muito inspirado pelos estudos da hidrodinâmica, em especial sobre a interação entre sólidos em movimento em meios fluidos e sobre a viscosidade, julgava implausível uma teoria de éter imóvel. Assim como acontece quando uma esfera sólida realiza movimentos transversais em um meio líquido, gerando atrito mútuo entre este e a superfície do corpo, causando conseqüentemente o arrastamento de uma quantidade do primeiro pelo segundo, os planetas também deveriam imprimir seu movimento no éter em sua volta (WILSON, 1972, p. 62-3). Em outras palavras, por causa do movimento de translação da Terra através do éter, ela carregaria consigo uma espécie de casca esférica de éter que estaria em repouso em relação ao planeta. Como esta porção de éter e a Terra compartilhariam do mesmo estado de movimento, os efeitos nulos dos experimentos de Arago de 1806 e 1810, bem como a aberração terrestre eram esperados e ganhavam uma explicação bastante simples.

Por outro lado, a aberração estelar ganhava uma explicação mais complicada, e de certa forma mais artificial do que a explicação que provinha das teorias de éter estático. À semelhança do que ocorre na interação entre sólidos que se movem em meio resistivos, o arrastamento de éter estava sujeito a certas restrições: em pontos muito próximos da superfície da Terra, o éter compartilhava totalmente seu movimento, mas a distâncias não muito grandes a velocidade do éter era zero, e no espaço compreendido entre estas duas regiões sua velocidade era gradualmente alterada. Se tratando da aberração das estrelas, o ângulo constante era causado pela gradual mudança de orientação das frentes de ondas ao penetrarem na região em que a velocidade do éter aumentava. O ângulo seria definido por uma linha ortogonal à frente de onda

que chega à superfície da Terra, em repouso com respeito à porção de éter que nela se encontra (ibid, p. 64-5).

Para que este modelo realmente funcionasse, segundo Stokes, esta variação gradual do movimento do éter não poderia gerar redemoinhos ou vórtices. Tal condição levava à exigência de que  $\alpha dx + \beta dy + \gamma dz$  fosse uma diferencial exata, onde  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são componentes da velocidade do éter e  $x$ ,  $y$  e  $z$  são as componentes das coordenadas espaciais. Segundo Stokes, quando esta diferencial é exata “significa que se uma pequena porção de um fluido fosse ‘subitamente solidificada e separada do resto do fluido’ ele não rotacionaria, mas se moveria puramente com um movimento de simples de translação” (Stokes, in WILSON, 1972, p. 66). Este modelo de éter mais tarde seria comumente referido como éter “irrotacional”, embora Stokes nunca tenha utilizado este termo.

Em suma, o éter arrastado de Stokes era capaz de explicar todos os fenômenos referentes à ótica dos corpos em movimento, alguns com mais facilidade do que o éter imóvel (refração referente aos experimentos de Arago), outros com mais dificuldade (aberração estelar), prevendo que nenhum experimento óptico realizado na Terra seria capaz de evidenciar o movimento relativo do éter.

Segundo Wilson, Stokes procurava um contraponto ao éter imóvel de Fresnel, que gozava de particularidades diferentes do éter de Young, motivado tanto pela tentativa de alcançar explicações mais simples dos fenômenos quanto pela desarrazoada, em seu entendimento, hipótese de que os planetas passariam incólumes por um meio semelhante a um sólido elástico. A teoria do éter de Fresnel também era bem sucedida quando confrontada com todos os fenômenos da ótica dos corpos em movimento conhecidos à época, entretanto seu mecanismo físico não era simples nem convincente, mas sua estrutura matemática resolvia tais problemas de maneira sem precedentes. Tal feito foi alcançado teorizando sobre o arrastamento parcial do éter por corpos transparentes em movimento e propondo seu famoso coeficiente de arrastamento, que é o principal objeto de interesse deste presente estudo.

### 3.6 O coeficiente de arraste de Fresnel e o éter parcialmente arrastado

Nesta seção vamos analisar a carta de Fresnel à Arago publicada na *Annales de chimie et de physique*, em setembro de 1818. Nela é proposta uma teoria da interação entre o éter e a matéria que explicava tanto a aberração estelar quanto a refração em corpos em movimento

seguindo a noção ondulatória da luz. Fresnel estava plenamente ciente das contradições que envolviam os dois fenômenos, como deixa claro em uma carta ao seu irmão, datada em 5 de setembro de 1818, em que comentava sobre seu mais recente trabalho:

Provei que se pode explicar satisfatoriamente não apenas a aberração das estrelas, mas também todos os outros fenômenos ópticos que se tornam complicados pelo movimento da Terra. Dentro da teoria de emissão, a aberração é facilmente explicada sem a ajuda de quaisquer hipóteses; mas os resultados das observações da luz das estrelas fixas de Arago são muito difíceis de se conceber. Ele certificou-se de que o movimento da Terra em sua órbita não tem influência em sua refração. Agora, para reconciliar este fato com a teoria Newtoniana, devemos assumir que as moléculas de luz emitidas com todos os tipos de velocidades são apenas perceptíveis aos nossos olhos quando têm uma [um valor específico de velocidade], e que a mudança da velocidade de uma parte em dez milhões impede a visão; uma hipótese muito difícil de se admitir. (Fresnel 1868, in [PEDERSEN, 2000](#), p. 549).

Fresnel achava implausível esta hipótese por alguns motivos, como argumenta Pedersen: se a visão é causada por impactos de moléculas de luz na retina, por qual motivo a diminuição de sua velocidade tornaria tal impacto inefetivo para estimular os sentidos da visão? Se a luz vermelha, por exemplo, cujas propriedades principais são a vermelhidão e o fato de se propagar com uma velocidade muito específica, ao refratar em um meio mais denso e, conseqüentemente, sofrer uma diminuição de sua velocidade (segundo a visão ondulatória), por que ela continua vermelha? (ibid.)

Arago, que à época já nutria dúvidas e reservas a respeito da teoria emissionista, se encontrara algumas vezes com Fresnel em meados daquela década (ibid), incentivando-o a investigar fenômenos ópticos, como a difração segundo uma visão ondulatória, mais tarde resultando na conquista do prêmio *Academie de Sciences*. Nesta época, anos após a realização de suas observações, Arago consultou Fresnel sobre a possibilidade de explicar tais resultados utilizando uma teoria ondulatória, resultando neste importante artigo, editado para publicação pelo próprio Arago ([MARTINS, 2012](#)).

Fresnel inicia sua carta a Arago apresentando objeções bastante similares àquelas apresentadas a seu irmão e sinalizando que uma teoria capaz de conciliar os resultados de Arago deveria também se aplicar “elegantemente” aos fenômenos ópticos terrestres. Em seguida continua sua explanação afirmando que caso a Terra imprimisse integralmente seu movimento ao

éter, a explicação da invariância dos ângulos de refração seria imediata. Por outro lado torna, segundo ele, inconcebível a aberração das estrelas (FRESNEL, 1863 [1818], p.628), uma que vez que este fenômeno parece exigir movimento relativo entre as moléculas de luz e o observador, o que deixa de existir em uma teoria de arrastamento total do éter. A hipótese utilizada por Young sobre a imobilidade total do éter é a única que torna a aberração inteligível à teoria ondulatória foi preservada por Fresnel (lembrando que a teoria do éter viscoso de Stokes para a aberração estelar só fora proposta mais de vinte anos depois da teoria de Fresnel), em concordância com a tradição das ciências dos fluidos imponderáveis que estava fortemente presente no pensamento científico do século anterior e ainda naquele século:

Por extraordinária que pareça à primeira vista esta hipótese [o éter passar sem resistência através da matéria ponderável], não é contraditório para mim com a ideia que os grandes físicos fizeram sobre a extrema porosidade dos corpos. Podemos perguntar, na verdade, de que maneira um corpo opaco muito fino interceptando a luz, estabelece uma corrente de éter através de nosso globo. Sem alegar responder completamente a objeção, eu continuei a observar, no entanto, que esses dois tipos de movimento são de natureza muito diferente para que possamos aplicar a um o que observamos em relação ao outro. O movimento luminoso não é um ponto corrente, mas uma vibração do éter. (ibid, p. 628-9).

Em outras palavras, é possível que se pense imediatamente em uma objeção ao fato de os corpos ponderáveis serem transparentes ao éter: se um corpo qualquer feito de matéria ordinária atravessa uma porção de éter sem qualquer resistência ou sem estimular nela nenhum tipo de movimento, como é possível que existam corpos opacos? É um questionamento válido, mas a resposta de Fresnel é imediata: é necessário diferenciar dois tipos de movimento do éter: o movimento corrente de cada partícula do éter (a rigor seria mais correto se referir a este como movimento relativo ao corpo ponderável, uma vez que o éter está em repouso absoluto), e o movimento vibracional do éter. Dentre estes, apenas o segundo gera a propagação da luz, uma vez que são movimentos de qualidades diferentes, um princípio necessário à uma teoria ondulatória daquela época: a luz consiste em vibrações do meio etéreo material, e com propriedades mecânicas. Qualquer movimento do éter que se possa conceber, que não o ondulatório, não teria a propriedade de gerar luz, fazendo com que a opacidade da Terra não seja “razão suficiente para negar a *existência* de uma corrente de éter entre suas moléculas” (ibid).

Fresnel utiliza também outra hipótese já sugerida por Young, segundo a qual a densidade de éter dentro dos corpos ponderáveis é maior do que no vácuo. Segundo Young, o “poder de refração dos corpos transparentes depende da concentração de éter dentro deles, tornando-a mais precisa ao assumir que a densidade de éter em qualquer corpo é proporcional ao quadrado do índice de refração” (WHITTAKER, 1951, p.109). Em notação moderna, esta relação é expressa pela equação

$$\rho_1 = n^2 \rho_0, \quad (3.4)$$

em que  $\rho_1$  é a densidade de éter no material,  $n$  seu índice de refração e  $\rho_0$  a densidade de éter no vácuo. Lembrando que a teoria ondulatória fazia uma interpretação inversa àquela feita pela teoria emissionista a respeito do índice de refração. Considerando  $c_1$  a velocidade da luz em um meio transparente em repouso com o éter, o índice de refração é dado por  $n = c/c_1$ . Esta dependência quadrática foi herdada dos trabalhos de Young e suas analogias com o som, em que a velocidade as ondas sonoras é dada por  $\frac{\sqrt{T}}{\rho}$ , onde  $T$  é a tensão do meio e  $\rho$  sua densidade. Como Fresnel supôs que o meio prismático está em equilíbrio de tensão com o éter ao redor, então a velocidade  $\frac{c}{n}$  é proporcional a  $\frac{1}{\sqrt{\rho}}$ , justificando a equação (3.4).

A fração arrastada do éter corresponderia apenas ao excesso deste ( $\rho_a$ ) que o corpo transparente carrega em relação à densidade de éter no ar, ou seja, a diferença entre a densidade dentro ( $\rho_1$ ) e fora do corpo ( $\rho_0$ ). (SCHAFFNER, 1969; WHITTAKER, 1951):

$$\rho_a = \rho_1 - \rho_0 = (n^2 - 1)\rho. \quad (3.5)$$

Sendo assim, a velocidade da luz dentro de um corpo transparente em movimento é “acrescida/diminuída por um fator baseado na quantidade de éter arrastada pelo meio” (Pietrocola, 1993). Caso todo o éter fosse arrastado, a velocidade da luz seria acrescida de  $v$  (velocidade de corpo transparente em relação ao referencial do éter parado), mas como apenas a quantidade indicada em (3.5) é arrastada a velocidade da luz é acrescida de um fator

$$f = \frac{n^2 - 1}{n^2} = 1 - \frac{1}{n^2}, \quad (3.6)$$

resultando na velocidade da luz no meio transparente no referencial absoluto igual a

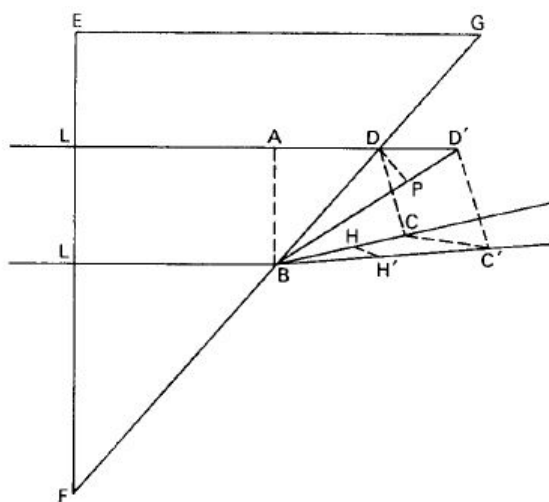
$$c_1 = \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v. \quad (3.7)$$

Fresnel expressa esta ideia aplicada ao experimento de Arago comparando o mecanismo por ele proposto com um mecanismo de arraste total do éter por corpos transparentes:



Se o prisma carregasse consigo todo o éter que contém, a totalidade do meio que atua como um veículo para as ondas participaria então do movimento terrestre, a velocidade das ondas de luz seria igual a sua velocidade caso estivesse em um meio em repouso somada à velocidade da Terra. Mas o caso em questão é mais complicado; apenas uma parte do meio que é carregado junto ao nosso globo, a saber, a proporção de sua densidade que excede a do éter ao redor. (FRESNEL, 1863 [1818], p.631)

A equação (3.7) deixa claro como o arraste parcial interfere na velocidade de propagação da luz, mas, além disso, esta teoria nos informa sobre o estado de movimento relativo entre um corpo transparente e o vento de éter em seu interior. Suponha um referencial  $S$  em repouso absoluto junto ao éter e um referencial  $S'$  em repouso em relação a um bloco de vidro com velocidade  $v$  em relação a  $S$ . Em uma teoria em que o éter não adquire nenhum tipo de movimento, o vento de éter teria velocidade  $-v$  dentro do bloco. Já em uma teoria em que o éter é totalmente arrastado pelo bloco (caso em que  $f = 1$ ) a velocidade relativa entre o corpo e o meio dentro dele seria obviamente igual a zero. Entretanto, Fresnel mostrou que com o arrastamento parcial, a velocidade do vento de éter dentro do bloco seria igual à  $-v/n^2$  (NEWBURG, 1974). Desta maneira, pode-se interpretar que qualquer arraste do éter corresponde a um freamento do vento deste, o que, em analogia com o som, altera a velocidade da onda que nele se propaga.



**Figura 3.2:** Representação do prisma de Arago. Extraído de (FRESNEL, 1863 [1818])

Continuando sua interpretação do experimento de Arago, Fresnel considerou o prisma EFG, representada na Figura 3.2, em que os raios L incidem perpendicularmente na face EF - havendo refração apenas na face FG - de forma que LB e LD representam a saída dos raios de luz no caso em que o prisma está em repouso junto ao éter. Nesta situação o raio LB toma a

direção BC ao ser refratado. As linhas pontilhadas AB e DC representam as frentes de ondas dentro e fora do prisma, respectivamente, e chamaremos o ângulo elas de  $\delta$ . Entretanto, no caso em que o prisma se movimenta em relação ao éter, os deslocamentos dos raios de luz LD e LB aumentam, alterando o ângulo de refração. Assim, o ponto D é deslocado até o ponto D', o raio que emerge em B toma a direção BC', e a frente de onda é dada por D'C', de maneira que o tempo que o raio levou para percorrer AD' é o mesmo para percorrer BC'. Seguindo a reconstrução de Pedersen, chamaremos de  $\delta_1 = r - i$  o ângulo formado entre as frentes de onda AB e D'C', onde  $r$  e  $i$  são, respectivamente, os ângulo de refração e incidência do raio LBC'.

A velocidade da luz dentro do prisma em movimento no referencial absoluto é dada pela equação (3.7), e no referencial do prisma é dada por  $c/n + (1 - 1/n^2)v - v$  por causa do vento de éter experimentado pelo prisma. Agora, a velocidade do raio refratado neste mesmo referencial é igual  $c - v \cos(\delta_1)$ , ou seja, a projeção de  $v$  na reta BC'. Utilizando a lei de Snell para a teoria ondulatória desprezando termos de ordem superior a 1 de  $v/c$  obteremos

$$\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{\sin i + \delta_1}{\sin i} \approx n - \frac{nv}{c} \cos \delta_1 + \frac{v}{c}. \quad (3.8)$$

Se considerarmos  $v = 0$ , ou seja, caso em que o prisma está em repouso absoluto, retomamos a lei de Snell que conhecemos. Isso significa que a teoria de Fresnel produz ângulos de refração diferentes para cada referencial, dependendo então de  $v$  como já havia ficado claro ao fazermos a distinção entre os desvios  $\delta$  e  $\delta_1$ , cuja diferença é dada por  $\alpha = \delta - \delta_1 \approx \frac{v}{c} \sin \delta$ . Entretanto, o observador na Terra não vê o raio refratado na direção BC', uma vez que este se move através do éter com a mesma velocidade do prisma, fazendo com que a velocidade aparente do raio BC' seja subtraído de  $v$ . Em outras palavras, o observador na Terra verá o raio BC' inclinado por um ângulo  $\alpha$ , causado pela aberração da estrela observada. Assim, Fresnel mostrou que, partindo do arraste parcial do éter, o efeito de aberração cancela o efeito causado pelo movimento do prisma, fazendo com que ângulo de refração aparente se tornasse invariante mediante mudanças de referenciais.

Originalmente, Fresnel tratou o problema de maneira equivalente considerando o comprimento de onda da luz dentro o fora do prisma. Esta reconstrução levando em consideração a velocidade da luz foi realizada por Pedersen (op. cit. 551-4). Para a resolução completa deste problema ver (MENEZES & LORDÊLO, 2019).

Essa teoria também é capaz de resolver o problema da invariância do ângulo de aberração de um telescópio cheio de água quando comparado com um telescópio cheio de ar, provando

que não deve haver mudança na posição aparente do objeto observado.

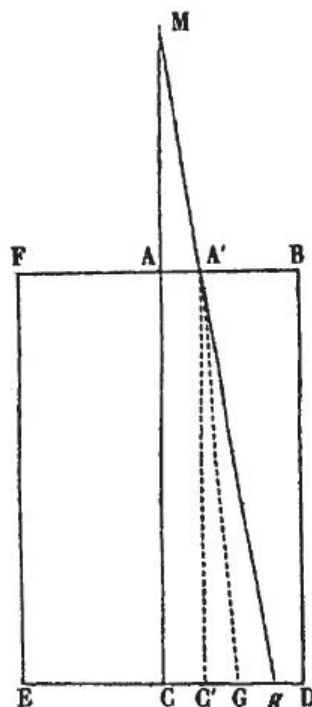


Figura 3.3: Representação do telescópio cheio de água. Extraído de (FRESNEL, 1863 [1818])

Considerando a Figura 3.3,  $FBDE$  formam um telescópio em movimento preenchido com um fluido refringente com eixo óptico  $AC$  que capta a imagem do ponto  $M$ . No tempo em que um raio de luz percorre  $MA'$ , o telescópio se move de  $A$  para  $A'$ , ponto em que tal raio é refratado de forma que o novo eixo óptico passa a ser  $A'C'$ . Como o tempo que a luz levou para percorrer este caminho é igual o tempo que o telescópio percorrer  $AA'$ , temos:  $\sin i = \frac{v}{c}$  (PEDERSEN, 2000, p. 555) e o raio refratado toma a direção  $A'G$ . Substituindo esta igualdade na lei de Snell obtemos:  $\sin r = \frac{vc'}{c^2}$ , onde  $c'$  é a velocidade da luz dentro do fluido que preenche o telescópio. Podemos observar que  $r$  é um ângulo muito pequeno de forma que  $\tan(r) = \sin(r) = \frac{C'G}{A'C}$ , o que nos permite obter  $C'G = A'C' \frac{vc'}{c^2}$ .

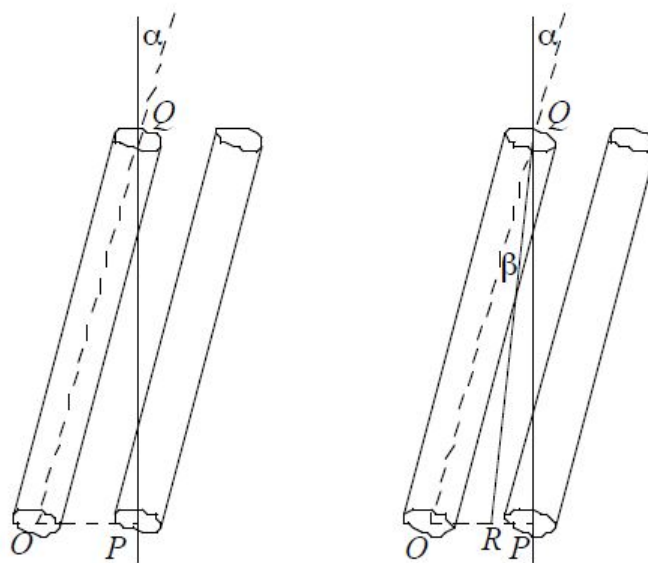
Enquanto o raio refratado percorre a linha  $A'G$  durante o intervalo de tempo  $\Delta t = \frac{A'C'}{c'} \approx \frac{A'C'}{c}$ , o telescópio percorre a distância  $C'g$ , nos permitindo escrever  $C'g = v \frac{A'C'}{c}$ .

Segundo Fresnel, o raio refratado incidiria em  $G$  caso o éter não fosse parcialmente arrastado. Sua teoria produz um deslocamento adicional da luz no sentido de deslocamento do telescópio igual a  $f = \frac{A'C'}{c'} v \left( \frac{c^2 - c'^2}{c^2} \right)$  fazendo com que este percorra uma distância horizontal total igual

$$C'G + f = A'C'v \frac{c'}{c^2} + A'C' \frac{v}{c'} \frac{c^2 - c'^2}{c^2} = A'C' \frac{v}{c'} = C'g. \quad (3.9)$$

Isso mostra que a aberração causada pelo telescópio cheio de água é a mesma daquela causada pelo telescópio comum.

Outra maneira (totalmente equivalente) de se enxergar o mesmo problema foi realizada no estudo de Janssen e Stachel (2004), comparando os efeitos entre um telescópio primitivo (cilindro vazio e aberto das extremidades) e um telescópio preenchido com material transparente (cilindro feito de vidro), ilustrado respectivamente nas figuras à direita e à esquerda da imagem a seguir:



**Figura 3.4:** Comparação entre a aberração em um telescópio comum (esquerda) e um telescópio cheio de água (direita). Extraído de JANSSEN & STACHEL (2004).

Na imagem da esquerda da Figura 3.4, observamos que o raio de luz provindo no zênite, representado pela linha pontilhada não é refratado, representando apenas o efeito de aberração estelar comum, com ângulo de aberração  $\alpha$  e deslocamento no fundo do telescópio sendo  $OP = v\Delta t$ , e a trajetória da luz  $QP$  para um observador no éter.

Na figura da direita, vemos que o raio é refratado por um ângulo  $\beta$  caso fosse observado por alguém em repouso no éter. Seguindo a hipótese do éter não arrastado, a luz percorreria a distância  $QR$ , devido à refração no dióptro. Entretanto, para um observador junto ao telescópio, o raio de luz incidiu perpendicularmente ao dióptro, não causando refração. Para ele, o raio deve indubitavelmente atingir o ponto  $O$ . Isso nos leva a um absurdo, uma vez que observadores em referenciais distintos vêem o raio de luz incidindo em pontos diferentes. Considerando que os fenômenos devem parecer os mesmos, sejam eles observados no éter, ou na Terra, vamos obter deste problema o coeficiente de Fresnel, fazendo com que o raio de luz adquira parte do

movimento do cilindro de vidro de forma a chegar ao ponto  $O$ .

Considerando a lei de Snell para este caso em que os ângulos são muito pequenos, temos  $\sin \alpha = \tan \alpha = n \sin \beta$ . Aproximando o triângulo QRO para um triângulo retângulo podemos expressar  $\tan \beta = \frac{OR}{RQ}$ . Temos também:  $OP = OR + RP$ ;  $QR = \frac{c}{n} \Delta t$ ;  $\tan \alpha = n \frac{OR}{RQ}$ ;  $RP = fOP = fv\Delta t$  (ou seja, uma fração de OP);  $\tan \alpha = \frac{v}{c}$  (inclinação do telescópio causado pela aberração estelar). Com essas expressões podemos obter:

$$\tan \alpha = \frac{v}{c} = n \left( \frac{v\Delta t - fv\Delta t}{\frac{c\Delta t}{n}} \right) \quad (3.10)$$

e, manipulando a expressão e utilizando as igualdades listadas acima, chegamos ao coeficiente de arraste de Fresnel:  $f = 1 - \frac{1}{n^2}$ . Ou seja, a luz deve ser arrastada por esta fração para que ambos os observadores acusem o mesmo resultado, que é a incidência da luz em  $O$ .

Ao fim de sua carta a Arago, logo após resolver este problema do telescópio cheio de água, Fresnel conclui que o conteúdo no interior do telescópio não deve influenciar os resultados observados, o que é “igualmente dedutível no sistema de emissão ou no sistema ondulatório” (FRESNEL, 1863 [1818], p. 636), o que mostra que ele era familiar com a solução de Wilson (ver seção 2.2) ou alguma equivalente. Tal experimento foi realizado em 1872 por George Biddell Airy, acusando a invariância do ângulo de aberração com o telescópio cheio de água em comparação com o telescópio comum, em concordância com a teoria de Fresnel (JANSSEN & STACHEL, 2004; JENKINS, 2001). O mesmo resultado nulo foi obtido por Martin Hoek em 1869 (MENEZES & LORDÊLO, 2019).

Com a hipótese do arrastamento parcial do éter, Fresnel conciliou os fenômenos de aberração com os experimentos de Arago de 1810, mostrando que no segundo há diversos efeitos que se anulam de modo que não seria possível acusar o movimento da Terra através do éter em primeira aproximação de  $v/c$  (MARTINS, 2012). Além de ter obtido o fator teórico que tornava o sistema ondulatório coerente com as observações, Fresnel foi capaz de proporcionar uma interpretação mecânica para o efeito de arraste, uma vez que partia de suposições sobre a densidade do éter nos corpos e a transmissão do movimento deste ao éter. Desta forma, podemos interpretar a teoria de Fresnel como uma concepção que tentava preservar uma harmonia com a visão mecânica de mundo, não apenas introduzindo uma hipótese *ad hoc* sem qualquer interpretação física subjacente (CASSINI & LEVINAS, 2018).

Veremos mais adiante algumas consequências contraditórias da teoria do arrastamento parcial que tornavam sua interpretação pouco convincente. Mas, independente disso, Fresnel

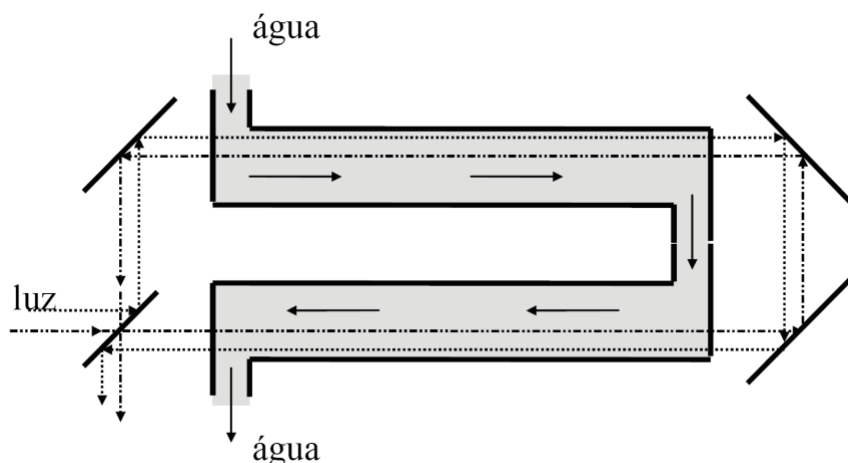
foi bem-sucedido em tecer as relações corretas entre a velocidade da luz e a velocidade do meio transparente no qual ela se propaga, tendo o coeficiente de arrastamento parcial como elo estruturante entre as duas grandezas.

### 3.7 O experimento de Fizeau

O coeficiente de arraste foi obtido e confirmado diversas vezes ao longo do século XIX, mas o experimento mais famoso que alegou a validade da fórmula de Fresnel em aproximações de primeira ordem de  $v/c$  foi o experimento realizado por Hippolyte Fizeau em 1851. Utilizando um método de interferência da luz, Fizeau mediu a velocidade da luz que se propagava contra e a favor a uma corrente de água em tubo em U, medindo diferenças entre as duas situações compatíveis com a teoria de Fresnel. A importância deste experimento para a história da ótica dos corpos em movimento em relação aos outros já tratados neste trabalho reside no fato de que foi uma verificação positiva do coeficiente de arraste, ao invés de um experimento de resultado nulo (Menezes e Lordêlo, 2019). Além disso, é um experimento marcante na história da técnica e da física experimental por ser um dos primeiros experimentos em que se usava a divisão e recombinação de raios de luz para gerar padrões de interferência luminosa (CASSINI & LEVINAS, 2018).

O experimento buscava determinar de que maneira o movimento da corrente de água interfere na velocidade de propagação da luz em seu interior. À época, havia três hipóteses possíveis para a interação entre a matéria em movimento em o éter: o éter poderia permanecer em absoluto repouso, sem ser afetado pelo movimento da água, que nos lembra da teoria de éter de Young; poderia ser totalmente arrastado pelo meio em movimento, somando (ou subtraindo, dependendo do sentido relativo entre a luz e a corrente) integralmente a velocidade da água à sua própria, como prescrevia a teoria de Stokes; a última hipótese seria a do arrastamento parcial do éter, em que apenas uma fração da velocidade da corrente seria somada a velocidade da luz, formulada por Fresnel.

Segundo Martins (2015), Fizeau não publicou imagens ou desenhos da aparelhagem, mas suas descrições se assemelham ao aparato experimental, ilustrado na Figura 3.5, funcionava da seguinte maneira: uma fonte emitia luz que incidia em um espelho semi-refletor (canto inferior esquerdo, na Figura 3.5) que dividia os raios de luz, refletindo uma parte e transmitindo outra. A parte transmitida se dirigia para dentro do tubo em que passava água corrente com velocidade de 7 m/s (era necessária uma velocidade baixa para que o líquido escorresse



**Figura 3.5:** Representação esquemática do aparato experimental de Fizeau. Extraído de Martins (2015). Segundo Martins, Fizeau não publicou imagens.

laminarmente, evitando turbulências) (French, 1968), viajando contra o corrente. Ao sair do tubo, o raio de luz refletia duas vezes em espelhos posicionados de maneira a fazê-lo voltar ao tubo com água, continuando sua propagação no sentido contrário ao fluxo de água. Já a parte refletida incidia em outro espelho que a desviava para dentro do tubo, fazendo percorrer sua extensão no mesmo sentido da corrente. Após percorrerem suas trajetórias, os raios eram recombinados para que a interferência entre eles fosse acusada pelo interferômetro.

O padrão de interferência obtido por Fizeau sugere que os diferentes raios de luz demoraram intervalos de tempo distintos para percorrer a mesma distância. A teoria do arraste parcial do éter previa a seguinte diferença de intervalo de tempo  $\Delta t = \frac{2l}{\frac{c}{n} - fv} - \frac{2l}{\frac{c}{n} + fv} \approx \frac{4n^2 l f v}{c^2}$ , onde  $l$  é o comprimento do tubo  $v$  é a velocidade da corrente de água e  $f$  é o coeficiente de arrastamento. A diferença de caminho óptico produziria um deslocamento das franjas dado por um múltiplo do comprimento de onda  $\delta = \frac{4n^2 f v l}{\lambda c}$ . Os valores aproximados dos parâmetros utilizados por Fizeau eram:  $l = 1,5m$ ;  $v = 7m/s$ ;  $\lambda = 5,3 \times 10^{-7}m$ ;  $n = 1,33$  (índice de refração da água);  $\delta = 0,23$ . Com esses valores foi obtido indiretamente o coeficiente de arraste  $f_{obs} = 0,48$ , enquanto que o coeficiente teórico correspondia a  $f_{calc} = 0,43$  (ibid, p. 48).

O resultado do experimento sugeriria que a luz se propaga mais rapidamente quando está a favor da corrente de água do que contra, e a velocidade da luz obtida em ambos os casos era compatível com a lei de Fresnel. Em 1886, o físico americano Albert Michelson repetiu o experimento com a ajuda de Edward Morley confirmando com maior acurácia o coeficiente de Fresnel. (DARRIGOL, 2000, p. 316-7).

### 3.8 “Princípio da relatividade” na ótica: análise teórica do coeficiente de Fresnel

O resultado do experimento de Fizeau, ao confirmar positivamente o coeficiente de Fresnel, se tornou uma pedra angular nos debates sobre a ótica dos corpos em movimento, aumentando o interesse dos pesquisadores sobre o assunto (HIROSIGE, 1976). Nenhuma outra teoria do éter, como a de Stokes, conformava-se com esses resultados, tornando o uso do coeficiente inevitável.

Entretanto, o mecanismo imaginado por Fresnel, que envolvia o arrastamento do excesso de éter dentro do corpo em relação ao éter no espaço livre, era pouco convincente e levava a conclusões duvidosas, como apontou Wilhelm Veltmann em 1870 (STACHEL, 2005a). Como o arraste dependia do índice de refração, o coeficiente deveria ser aplicado para cada cor da luz, uma vez que cada uma possui um comprimento de onda diferente. Isto levava a uma conclusão duvidosa, de que o éter seria arrastado em diferentes taxas dependendo da frequência da onda luminosa, contradizendo a assumpção de que o coeficiente emergia de propriedades de interação entre o éter e a matéria. Consequentemente, caso um experimento, como o de Fizeau, fosse realizado simultaneamente com raios de luz de duas cores diferentes, o éter se moveria com duas velocidades distintas ao mesmo tempo (CASSINI & LEVINAS, 2018). Veltmann, partindo dos fenômenos de aberração (MARTINS, 2012), chega a afirmar: “As considerações por meio das quais Fresnel tentou dar fundamentos físicos [à sua fórmula] são desprovidas de valor” (Veltmann, 1873, apud STACHEL, 2005a), interpretando-a não como um fator de compensação de efeitos ópticos utilizado em problemas isolados, mas como uma condição suficiente e necessária para a aplicação das leis de refração para raios em meios em repouso ou em movimento (ibid.). Segundo Pietrocola (1993), o próprio Fresnel reconhecia a fragilidade de sua hipótese, afirmando que não se deveria adotar uma interpretação literal do raciocínio que o levou a formular o fator de arraste.

Entre 1872 e 1874, Éleuthère Mascart<sup>11</sup> realizou o mais completo trabalho sobre a ótica dos corpos em movimento até então, fazendo uma série de experimentos que confirmaram a ausência de efeitos observáveis do movimento da Terra. Tal contribuição foi agraciada pelo Grande Prêmio da Academia de Ciências de Paris de 1873, oferecido ao melhor trabalho experimental sobre modificações na propagação e nas propriedades da luz em consequência do

---

<sup>11</sup>Para as contribuições de Mascart à ótica dos corpos em movimento, ver Pietrocola (1992)



movimento entre fonte luminosa e observador (HIROSIGE, 1976, p. 20). Um dos experimentos de resultado nulo por ele conduzidos comparou por métodos interferométricos o tempo em que dois raios de luz demoravam para percorrer, em sentidos opostos, a extensão de um corpo transparente. Em outras palavras, cada raio de luz se propagam em sentidos opostos do vento de éter, um a favor e outro contra. Tal resultado levou Mascart a obter o coeficiente de arraste (NEWBURG, 1974), endossando a confiança na fórmula proposta por Fresnel. Por outro lado, outros experimentos, que exploraram a propagação da luz em corpos birrefringentes em movimento, colocavam em dúvida a explicação que justificava a lei do arraste. Mascart provou que o coeficiente deve agir tanto no raio de refração ordinário quanto no raio extraordinário. Caso o mecanismo de Fresnel fosse interpretado literalmente, este experimento mostraria que o éter é arrastado com duas velocidades diferentes ao mesmo tempo, tornando esta hipótese implausível. A extensão do uso do coeficiente de Fresnel em cristais birrefringentes foi particularmente apreciada pelo comitê avaliador dos trabalhos que concorreram ao Prêmio. Na conclusão de seu extenso trabalho, divididos em duas partes, publicadas em 1872 e 1874 (“*Sur les modifications qu’éprouve la lumière*”), Mascart afirma:

O movimento de translação da terra não imprime qualquer efeito apreciável nos fenômenos ópticos produzidos com fontes terrestres ou com luz solar. Esses fenômenos são incapazes de demonstrar o movimento absoluto de um corpo. Movimentos relativos são os únicos que se fazem evidentes. (Mascart 1874, apud NEWBURG, 1974).

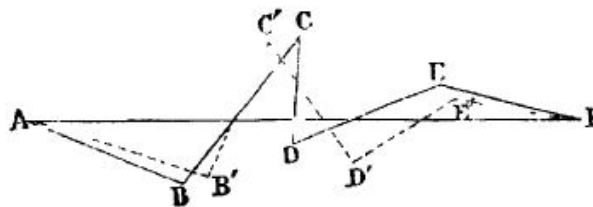
No mesmo ano de 1874, Alfred Portier publicou uma análise teórica que complementava os trabalhos de Mascart e Veltmann, combinando a teoria de Fresnel com o princípio de Fermat, provando a impossibilidade de se detectar movimentos absolutos via experimentos ópticos (NEWBURG, 1974).

O raciocínio de Portier foi o seguinte: considerando que a velocidade da luz, medida no referencial de um corpo transparente de comprimento  $\ell$  em movimento com velocidade  $v$ , propaga-se contra o vento de éter com a velocidade  $c' = \frac{c}{n} - \frac{v}{n^2}$ ; o tempo que a luz demora para atravessá-lo é igual a

$$t = \frac{\ell}{\frac{c}{n} - \frac{v}{n^2}} \approx \frac{\ell}{\frac{c}{n}} + \frac{\ell v}{c^2}. \quad (3.11)$$

Dessa maneira, o movimento do corpo faz com que a luz demore um intervalo de tempo  $\frac{\ell v}{c^2}$  maior do que no caso em que ele está parado junto ao éter. É importante para os intentos deste

trabalho notarmos que este fator adicional é retido na parte temporal das transformações de Lorentz como  $\frac{xv}{c^2}$ , como sinaliza Newburg.



**Figura 3.6:** Comparação entre dois caminhos ópticos possíveis dentro de um corpo transparente. Extraído de [PORTIER \(1874\)](#).

Agora, considerando a Figura 3.6, temos a trajetória  $ABCDEF$  de um raio de luz que sofre reflexões ou refrações em  $BCDE$  dentro de um meio em repouso, e a trajetória  $AB'C'D'E'F$ , infinitesimalmente distinta em relação a primeira de maneira que os intervalos de tempo em que os raios levam para percorrer esses trajetos são diferentes, mas muito próximos. Ambas obedecem ao princípio de Fermat. Caso os dois raios de luz fossem combinados em  $F$  e detectados por um interferômetro, seriam produzidas franjas de interferência causadas pela diferença de caminho óptico entre ambos. Suponhamos agora que o mesmo procedimento seja feito, mas desta vez com todo o sistema em movimento com velocidade  $v$  na horizontal contra o vento de éter, de maneira que o tempo necessário para que a luz percorra cada elemento da trajetória seja aumentado em  $\frac{lv}{c^2}$  com relação ao sistema em repouso (estamos deixando implícita a projeção da velocidade  $v$  em cada parte das trajetórias  $ABCDEF$  e  $AB'C'D'E'F$ ). Neste caso seria observado o mesmo padrão de franjas de interferência, pois o tempo de propagação associado a cada um dos elementos foi acrescido na mesma proporção ([PORTIER, 1874](#)). Essa prova teórica de Portier justifica o resultado nulo do experimento de Mascart referido anteriormente e estabelece uma espécie de princípio da relatividade na ótica para efeitos em primeira ordem de  $v/c$ . Caso fossem considerados efeitos de ordem superior, efeitos não nulos de interferência seriam detectáveis, segundo Portier ([NEWBURG, 1974](#)).

O experimento de Fizeau impôs, pelo menos aos cientistas continentais, a validade empírica da fórmula de Fresnel para a velocidade da luz em meios em movimento, sendo mais tarde assimilado de maneira mais geral ao corpo teórico da ótica física pelos trabalhos de Veltmann, Portier e Mascart. Apesar da crescente confiança em sua formulação, estas mesmas análises evidenciaram as contradições da interpretação física original e do arrastamento real do éter. Stachel ([2005a](#)) compila declarações destes e outros cientistas que confirmam a confi-

ança de que a fórmula realmente revela algo verdadeiro sobre a natureza dos fenômenos ópticos enquanto deixam claro o ceticismo em relação ao mecanismo teorizado por Fresnel:

Fizeau (1851): “Me parece que o sucesso empírico deste experimento acarreta a adoção da hipótese de Fresnel, ou pelos menos da lei que ele encontrou para expressar a mudança da velocidade da luz que resulta do movimento dos corpos; apesar da lei ter sido verificada [...] a concepção de Fresnel pareceria tão extraordinária, e em vários aspectos tão difícil de aceitar, que se requeriria ainda mais provas e um exame aprofundado pelos físicos matemáticos [geômetras], antes de aceitá-la como a expressão de como as coisas realmente são.”

Veltmann (1873): “Fresnel procurou trazer harmonia entre este resultado [experimento de Arago] e a teoria ondulatória, levando-o a adotar uma particular hipótese que de fato, em relação às suas bases físicas, oferece enormes dificuldades para completar seu objetivo.”

Mascart (1872): “Em todo o caso, para ser rigoroso, deve-se dizer que o experimento de Fizeau apenas verificou que o arrastamento das ondas [de luz] por um meio em movimento está de acordo com sua fórmula [de Fresnel] e que se pode substituir a hipótese de Fresnel por qualquer outra hipótese que finalmente levará à mesma fórmula, ou uma ligeiramente diferente.”

Lorentz (1886): “Será tarefa da teoria da luz explicar o valor que as observações dão para o coeficiente de arraste.”

Estas manifestações deixam claras as atitudes dos cientistas em questão: a relação que a fórmula de Fresnel estabelece entre a velocidade da luz e a velocidade do corpo em que ela se propaga é verdadeira, muito embora não se saiba de fato qual explicação ou mecanismo que os físicos devam atribuir à ela. Além disso, eles não se contentam com atitudes puramente instrumentalista do coeficiente, prescrevendo que é papel dos físicos darem explicações de tal relação já adquirida pela teoria ondulatória.

### **3.9 O coeficiente de arrastamento e a teoria dos elétrons de Lorentz**

Uma nova interpretação física bastante distinta daquela de Fresnel veio a ser formulada por Lorentz no contexto de sua sofisticada teoria dos elétrons, por meio da qual obteve teoricamente o coeficiente de arrastamento. Apesar de os problemas relacionados à ótica e a eletrodinâmica dos corpos em movimento terem sido um dos principais motivadores dos trabalhos de Lorentz, suas contribuições vão muito além da simples explicação deste particular ramo de fenômenos físicos. Sua teoria (ou suas teorias?) dos elétrons pode ser considerada um dos

passos mais ousados da física do século XIX por vários motivos, entre eles: i) sua concepção de éter eletromagnético (identificado com o éter luminífero pela teoria de Maxwell) se aproxima muito da concepção clássica de campo eletromagnético que se aceita hoje em dia, ou seja, um campo dinâmico desmaterializado, dessubstancializado e principalmente desmecanizado, em oposição à tradição mecânica de éter presente nas teorias maxwellianas e nas teorias do éter luminífero sólido-elástico que antecedem a teoria de Maxwell. Inspirando inclusive visões de mundo que tentavam substituir as bases mecânicas da física teórica por bases puramente eletromagnéticas, e fazendo pela primeira vez uma aguda distinção entre éter e matéria (HIROSIGE, 1969; MCCORMMACH, 1970); ii) incorporou em uma teoria bem sucedida influências atomistas de seus antecessores (como Weber) para estabelecer mecanismos de interação entre o éter e matéria, aprofundando a visão atomista da natureza, ainda que não como uma verdade ontológica, mas pelo menos como uma poderosa ferramenta heurística, fortalecendo este programa de pesquisa; iii) acompanhando e em consonância com algumas surpreendentes consequências da teoria eletromagnética, pavimentou o caminho para a formulação da cinemática e da dinâmica relativísticas, aprofundando a crise da mecânica newtoniana e tendo suas principais consequências retidas na teoria da Relatividade Restrita. Embora nosso principal objetivo nesta seção seja entender qual (ou quais) foi a interpretação lorentziana do mecanismo de arraste de Fresnel, nos ocuparemos um pouco em comentar a teoria de maneira geral em diálogo com estas três importantes implicações (em especial i e iii), para que possamos entender melhor a etapa final deste episódio histórico, a saber, a interpretação relativística do coeficiente. Mas, para isso, devemos antes tecer alguns comentários sobre a visão de éter nas teorias maxwellianas e como eram suas relações e interações com a matéria ordinária.

### 3.9.1 O éter Maxwelliano

Esta seção terá como principal objetivo comentar brevemente as relações entre o éter eletromagnético e a matéria ponderável dentro da teoria de Maxwell e de seus sucessores, além de suas considerações sobre o movimento do éter em corpos em movimento. Para tratamentos mais detalhados da construção da teoria, as influências de Faraday e a metodologia de analogias mecânicas, ver Whittaker (1951) e Darrigol (2000).

A teoria eletromagnética de Maxwell realizou uma grande síntese dos estudos em eletricidade e magnetismo e é geralmente referenciada como a teoria que unificou o eletromagnetismo e a ótica. Mas é importante sinalizar que o que costumamos chamar de “teoria de

Maxwell”, ou “teoria do campo eletromagnético”, que abriga a grande maioria dos fenômenos eletromagnéticos e ópticos, não estava completamente concebida em seus trabalhos principais (*On physical lines of forces* (1861-2), *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* (1865) e seu famoso *Treatise on Electricity and Magnetism* (1873)). Neles não há explicações de fenômenos como reflexão e refração, a ideia de potencial elétrico como conhecemos hoje (no que diz respeito a sua propagação), o fluxo de energia eletromagnética e nem mesmo as quatro famosas equações de Maxwell. Estas e muitas outras conquistas da teoria foram elaboradas e sintetizadas por físicos que seguiam as principais ideias de Maxwell como programa de pesquisa, expandindo seu campo de aplicação e explicação. Também não trataremos deste importante episódio da história da física, mas para detalhes deste empreendimento intelectual, ver Hunt (2015). Focaremos em algumas poucas ideias importantes e necessárias para conseguirmos capturar as inovações teóricas da teoria de Lorentz.

Apesar de não ter deduzido as leis da ótica via eletromagnetismo, Maxwell obteve teoricamente a maneira como perturbações elétricas se propagam no espaço, – sua teoria favorecia uma concepção de ação eletromagnética contígua, mediada pelo éter, em oposição à tradição continental de ação à distância (KARGON, 1969) – estando de acordo com a natureza da propagação da luz e com os resultados experimentais de Weber e Kohlrausch, que mediram a velocidade de propagação de ações elétricas (WHITTAKER, 1951, p. 253). Maxwell logo afirmou a íntima relação entre a propagação da luz e das ações elétricas: “Difícilmente podemos evitar a inferência de que a luz consiste em ondulações transversais do mesmo meio que causa os fenômenos elétricos e magnéticos” (Maxwell, apud ibid, p. 254). Maxwell concebia este meio como um sólido elástico, capaz de sofrer deformações causadas por tensões mecânicas, as identificando com o campo elétrico. Já o campo magnético foi identificado como vórtices moleculares, ou seja, está associado a movimentos rotacionais no interior da matéria e do éter. Em outras palavras, Maxwell criou uma “teoria magneto-mecânica da luz, baseada na elasticidade de uma substância cuja rotação representava o campo magnético” (DARRIGOL, 2000, p. 153).

Se apoiando na visão de Faraday e William Thomson sobre a natureza dos fenômenos elétricos, que desafiava a “visão ortodoxa de que os fenômenos eletromagnéticos fossem o resultado direto da ação a distância entre partículas elétricas” (HUNT, 2015, p. 26), Maxwell entendia que tais fenômenos eram causados por mudanças no estado mecânico de um meio material. Faraday negava a existência de uma substância elétrica que se condensa no interior da matéria e que flui em condutores, afirmando que estes fenômenos são simplesmente *consequên-*

*cias do campo ao redor* (ibid). Maxwell, apesar de aceitar visões atomísticas da eletricidade (DARRIGOL, 2000, p. 171), proporcionou ao éter eletromagnético semelhante primazia, tornando as cargas e as correntes conceitos derivados de estados mecânicos do éter, expressos pelas suas equações fundamentais de estado. Em suma, o meio elástico que transmitia contiguamente as influências elétricas e magnéticas era a entidade central que orientava a heurística de sua pesquisa, como ele mesmo expõe em seu “On physical lines of forces”:

Meu objetivo neste artigo é aplinar o caminho para a especulação nesta direção, investigando os resultados mecânicos de certos estados de tensão e movimento em um meio e comparando-os com os fenômenos observados do magnetismo e da eletricidade. Ao indicar as consequências mecânicas de tais hipóteses, espero ser útil àqueles que consideram os fenômenos como devidos à ação de um meio, mas têm dúvidas quanto à relação dessa hipótese com as leis experimentais já estabelecidas, as quais em geral têm sido expressas na linguagem de outras hipóteses. (Maxwell, 2003b (1861/1862), p. 452, apud BEZERRA, 2006).

E também em seu Tratado, na seção “Plano deste Tratado”:

Se prosseguirmos em investigar o estado mecânico de um meio com a hipótese de que a ação mecânica observada entre corpos eletrificados é exercida através e via um meio, como o caso familiar de ação entre um corpo e outro por meio da tensão de uma corda ou pressão de uma haste, veremos que o meio deve estar sob tensão mecânica. (Maxwell, apud HIROSIGE, 1969, p. 155).

Esse estado de tensão pode se estabelecer no espaço vazio (éter livre) da mesma maneira que o faz dentro dos corpos materiais dielétricos. Como a teoria de Maxwell era uma teoria macroscópica e não se comprometia a investigar o interior da matéria, nem como se davam os processos microscópicos no éter, admitindo que o mesmo estado de tensão elástica existisse na matéria e no espaço vazio, tornava ambígua sua concepção de carga elétrica, podendo estar contida na matéria e no éter livre. A ausência de asserções positivas sobre o domínio microscópico em benefício de uma visão macroscópica tornou vaga a fronteira entre as entidades de carga, matéria e éter (ibid, p. 159, DARRIGOL, 2000, p. 172). Essas duas últimas entidades se “comportam como um único meio com capacidade indutiva, permeabilidade e condutividade variáveis” (ibid, p. 170).

Com essa concepção, Maxwell chegou ao conceito de “deslocamento elétrico” ( $D$ ) como o deslocamento real das partículas carregadas da matéria, sendo proporcional à força elétrica ( $E$ ) da seguinte maneira:  $D = (K/4\pi)E$  (HIROSIGE, 1969, p. 158). Notamos a analogia entre o deslocamento elétrico (ao qual hoje nos referimos como estado de polarização de um dielétrico, mas expresso por Maxwell como um estado de tensão elástica do meio mecânico) e a força de um corpo elástico, proporcional a deformação desse corpo ( $F = k\Delta x$ ), reforçando sua visão mecanicista. A distinção conceitual entre força elétrica e deslocamento elétrico era propositalmente borrada, admitindo que o deslocamento dielétrico ocorresse tanto na matéria quanto no éter. Em outras palavras, era condição necessária da teoria que as ações elétricas estivessem assentadas em um meio dielétrico, seja ele a matéria ou o vácuo. Esses estados de tensão e deformação eram particularmente caros à Maxwell e aos maxwellianos britânicos, pois nelas estava armazenada a energia no campo, configurando para eles o “coração da teoria de Maxwell” (HUNT, 2015, p. 270-5).

A importância da indistinção entre força e deslocamento para a tradição eletrodinâmica britânica se mostra patente nas divergências interpretativas dos chamados “maxwellianos” (George Fitzgerald, Oliver Lodge, Oliver Heaviside, entre outros) e de Hertz, influenciado pela visão eletrodinâmica de Helmholtz. Os primeiros acusavam o segundo de esvaziar o conteúdo físico da teoria ao encará-la como mero conjunto de equações desencarnadas ao abandonar o conceito de deslocamento dielétrico no éter livre. Hertz definiu as constantes elétrica e magnética – que no pensamento britânico eram análogas, respectivamente, a elasticidade, portanto associada à energia potencial, e a densidade, associada ao momento e energia cinética – como iguais a 1. Para eles, essa simplificação matemática sacrificava o sentido dinâmico do campo – e consequentemente do éter – cujas tensões e deformações eram tão reais quanto aquelas observadas em corpos elásticos comuns – o que consideravam ser a grande inovação teórica de Maxwell no que diz respeito à transmissão de ações elétricas.

### 3.9.2 A eletrodinâmica dos corpos em movimento e o movimento do éter

Os debates sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento é quase tão antiga quanto a própria eletrodinâmica e nos remontam às contribuições de Faraday que, apoiando-se nas descobertas de Oersted, foi capaz de construir o primeiro motor elétrico, em 1821, e o primeiro dínamo, em 1831, baseando-se na sua descoberta da indução eletromagnética (DARRIGOL, 1996, p. 258). A questão do movimento de condutores através de linhas de força e a interpreta-

ção do efeito de indução foi motivo de muito debate desde esta época, além de ter sido o ponto de partida do artigo de Einstein em que ele propõe a teoria da relatividade restrita, mostrando que a controvérsia continuou atual ao longo do século. Apesar de ser um tópico rico de discussões histórico-filosóficas, este não será nosso foco nesta seção, que se limitará a comentar brevemente como a questão do arrastamento do éter emergia na teoria maxwelliana.

Em 1881, J. J. Thomson publicou um famoso artigo sobre cargas elétricas em movimento em que deduzia pelas equações de Maxwell que um meio dielétrico em movimento arrastaria parcialmente a luz, adicionando a ela metade de sua própria velocidade. Este resultado contradizia o coeficiente de arraste de Fresnel, mas era compatível com o resultado do experimento de Fizeau. Como a água havia sido o único meio em que a hipótese de Fresnel fora testada, J. J. Thomson poderia ter reivindicado este resultado em benefício de sua teoria. Entretanto, esta dedução não ganhou muito apoio, uma vez que era contraditória com a própria teoria de Maxwell, que considerava que meios dielétricos ordinários gozavam das mesmas propriedades do éter, apenas com modificações nos valores das constantes elétricas e magnéticas, como enfatizamos anteriormente. Isso levava à conclusão que estes meios deveriam carregar consigo todas suas propriedades, transmitindo integralmente sua velocidade à luz. Em 1891, Heaviside provou que o resultado de Thomson estava realmente equivocado por ter considerado apenas a contribuição do arrastamento devido ao campo elétrico, e que se se somasse a contribuição do campo magnético se obteria o arrastamento total da luz no dielétrico. Apesar de conhecer os resultados positivos do coeficiente de arraste de Fresnel, Heaviside não considerava que a teoria de Maxwell estava incorreta, mas pensava que o resultado teórico por ele obtido poderia ser suplantado por outros que considerassem em maior detalhes a estrutura microscópica dos corpos dielétricos. Seu objetivo foi apenas demonstrar claramente qual era a previsão do arraste seguindo a teoria de Maxwell, expondo o equívoco de Thomson (HUNT, 2015, p. 276-80).

À época, a teoria eletromagnética da luz fora desafiada pelos resultados do famoso experimento de Michelson e Morley, que pretendeu detectar o vento de éter causado pelo movimento da Terra. Diferentemente dos outros experimentos ópticos que analisamos anteriormente, este era capaz de detectar efeitos de segunda ordem ( $v^2/c^2$ ), e a expectativa era de que fossem obtidas interferências que comprovassem o movimento da Terra em relação ao éter. A análise teórica de Portier, Veltmann e Mascart que resultou no “princípio da relatividade” para a ótica em aproximações de primeira ordem despertou a consciência da necessidade de experimentos de segunda ordem, cujos resultados esperados eram positivos (NEWBURG, 1974). Todas essas



expectativas justificam a frustração e o choque do resultado nulo. Assim, a eletrodinâmica e a ótica se encontravam em um grande nó lógico, uma vez que havia bons motivos para se considerar o éter imóvel e não perturbado pelo movimento da Terra (via aberração estelar), além do sucesso da teoria de Fresnel (via experimento de Fizeau e das análises teóricas já mencionadas), enquanto que o experimento de Michelson e Morley parecia favorecer a teoria de Stokes em que o éter imediatamente próximo à superfície terrestre era arrastado integralmente.

Uma possível solução para este problema foi encontrada por FitzGerald em colaboração com Heaviside, instigados por outro problema relacionado a controvérsias internas à teoria de Maxwell. Em seu Tratado, eram largamente utilizados os potenciais vetor e elétrico, o que gerou muitas controvérsias na subsequente sistematização e desenvolvimento da teoria eletromagnetismo. A interpretação do significado físicos destes potenciais foi motivo de grandes debates entre os maxwellianos (que buscavam reinterpretar e aperfeiçoar a teoria, livrando-a de suas contradições internas e confusões conceituais) e os físicos mais “conservadores” que interpretavam ao pé da letra o Tratado, como era o caso de William Thomson (mais tarde Lord Kelvin) e J. J. Thomson (segundo Hunt foi exatamente esta leitura da teoria de Maxwell que o levou a cometer o erro em relação ao arrastamento da luz). Os primeiros alegavam que todos os efeitos eletromagnéticos se propagariam na velocidade da luz, enquanto o outros afirmavam que esta afirmação não poderia ser verdade, já que o potencial elétrico poderia se propagar instantaneamente. Heaviside, que não atribuía qualquer realidade física a este potencial, defendia que especular sobre sua propagação era uma questão metafísica, justamente por não gozar de contrapartida no mundo físico real. Thomson, em resposta a Heaviside, afirmou não se tratar de mera questão metafísica, e que era possível, em princípio, determinar empiricamente se o potencial se propagava instantaneamente ou não: bastaria movimentar um corpo carregado e verificar se eletrômetros, dispostos em diferentes distâncias, eram afetados simultaneamente ou não. Esta réplica de Thomson motivou Heaviside a investigar os efeitos que o movimento de uma carga causaria no campo eletromagnético ao redor dela. Tal problema já havia sido tratado (por exemplo, por J. J. Thomson em 1881, como já comentado), mas apenas em limites de baixas velocidades comparadas à velocidade da luz. Nesse domínio de aproximações, o campo elétrico parecia se ajustar ao movimento da carga sem se alterar, levando a conclusão de que o potencial se propagava instantaneamente. Em dezembro de 1888, Heaviside publicou na revista *Electrician* um artigo sobre o assunto, e nele continha uma importante equação que mostrava como os campos elétrico e magnético se deformavam mediante ao movimento da carga a eles

associada. Enquanto a superfície de equilíbrio do campo eletrostático forma uma esfera ao redor da carga, o campo associado à carga com grandes velocidades assumia um formato elipsoidal (chamado posteriormente de “elipsoide de Heaviside”). Desta maneira as linhas de campo se “espremam” no sentido do movimento por fator de  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ .

Estimulado por este importante trabalho de Heaviside, FitzGerald, sempre em frequente comunicação com seu amigo Oliver Lodge, que era particularmente interessado pela questão do movimento do éter, propõe a hipótese da contração dos corpos que se movimentam em relação ao meio etéreo. Por desconfiar que as forças intermoleculares eram de natureza eletromagnética, sugeriu que todo o corpo que se movimenta através do éter teria seu comprimento contraído no mesmo fator de  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ . Esta hipótese parecia explicar o resultado nulo dos experimentos de Michelson e Morley, já que os braços do interferômetro seriam contraídos exatamente na proporção necessária para que a interferência fosse nula, salvando então, a teoria do éter imóvel e não perturbado pelo movimento da Terra. O mesmo resultado foi independentemente obtido por Lorentz em sua teoria dos elétrons em defesa do éter imóvel, como comentaremos mais adiante (HUNT, 2015, p. 254-68).

Em resumo, nestas duas últimas seções, além de anteciparmos alguns elementos importantes da teoria de Lorentz, como a contração dos campos e dos corpos, exploramos rapidamente algumas características do éter de Maxwell e dos maxwellianos: sua indistinção da matéria comum; a submissão das cargas e das correntes aos estados mecânicos do éter; o arrastamento total do éter em dielétricos ordinários previsto pela teoria; e a crescente necessidade de se formular uma teoria molecular da matéria ponderável, necessária para o aprofundamento da compreensão dos fenômenos que envolviam a interação entre a matéria e o éter.

Nas próximas seções veremos como a teoria de Lorentz estabeleceu a distinção entre éter e matéria, qual o papel dos elétrons para tal discriminação, o papel da teoria para o aprofundamento da crise mecanicista e quais foram as novas interpretações dadas ao coeficiente de Fresnel.

### 3.9.3 A teoria dos elétrons de Lorentz

Os trabalhos científicos de Lorentz que serão comentados nesta seção foram realizados entre o último quarto do século XIX e o início do século XX, período em que os físicos teóricos estavam motivados a unificar a teoria eletrodinâmica de Maxwell à uma teoria sobre a estrutura da matéria (MCCORMMACH, 1970). Como comentado anteriormente, a comunidade cientí-

fica começava a demandar investigações sobre as características internas dos corpos dielétricos para formular teorias sobre a interação entre a luz e matéria ao estabelecer relações de interação entre o éter e a matéria no domínio microscópico. O problema da propagação da luz em meios materiais em movimento representava um conjunto de fenômenos em que esta necessidade ficava clara. Basta nos lembrarmos nas declarações de Veltmann, Mascart e Fizeau que, por considerarem implausível o mecanismo teorizado por Fresnel para explicar sua fórmula, advogaram a favor da retenção da sua estrutura matemática mediante novas interpretações para o arraste parcial das ondas luminosas. Mais explicitamente ainda, Heaviside, por expressar reservas com o arraste total do éter, uma consequência da teoria maxwelliana e sua visão dúbia sobre éter e matéria, tinha clareza de que futuras teorias sobre o interior da matéria resolveriam a contradição entre o eletromagnetismo da época e as abundantes evidências em favor do éter imóvel de Fresnel.

O interesse de Lorentz pela eletrodinâmica e pela ótica remonta ao início de sua produção científica quando, em 1875, concluiu sua tese em que deduziu as leis de refração e reflexão da luz, partindo da interpretação helmholtziana da teoria de Maxwell. Nela, Lorentz reafirmou as dificuldades geradas pelos modelos de sólido elástico e criou condições de contorno na interface do dióptro que produzia fórmulas teóricas de intensidade da luz refratada e refletida condizentes com as da ótica fresneliana (DARRIGOL, 2000, p. 321-4). O modelo do éter como um sólido elástico, apesar de popular, era reconhecidamente problemático, pois ao ser aplicado nos fenômenos da reflexão e refração gerava componentes longitudinais nos raios refletidos e refratados. Era sabido desde a época de Fresnel que a luz só poderia ter componentes transversais (PSILLOS, 2005 [1999], p. 125-8).

Em 1878, sob influência da tradição atomista da eletricidade da física germânica, o físico holandês publicou um trabalho sobre a dispersão da luz, em que explicava os fenômenos postulando interações entre a vibração do éter e os íons que compunham a matéria. Para tal, o éter dentro ou fora da matéria mantinha as mesmas propriedades, ou seja, não era por ela afetado. Foi a primeira vez que trabalhava com uma teoria de éter totalmente imóvel (GOLDBERG, 1969), concepção levada adiante em trabalhos posteriores. Lorentz passa a adotar definitivamente o éter totalmente estacionário, em detrimento do éter totalmente arrastado de Stokes, em seu trabalho “*De l’influence du mouvement de la terre sur les phénomènes lumineux*” de 1886, no qual mostra que a teoria de físico britânico tinha contradições internas, rejeitando-a (HIROSIGE, 1969).

A teoria dos elétrons começa a ser desenvolvida em uma série de publicações que se iniciam em 1892 e se estendem até a primeira década do século seguinte. As bases de sua teoria foram lançadas no artigo “*La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants*” (1892), trabalho cujo principal objetivo foi a dedução do coeficiente de arraste de Fresnel. Lorentz apenas introduz sua teoria sobre o éter e partículas carregadas no capítulo IV deste trabalho (*Théorie d’un système de particules chargées qui se déplacent à travers l’éther sans entraîner le milieu*), no qual tece suas considerações preliminares sobre a matéria e o éter. Nelas, o autor afirma que a matéria ponderável é perfeitamente permeável ao éter, e que esta pode se deslocar sem arrastá-lo sendo apenas possível descrever os fenômenos da ótica e eletrodinâmica dos corpos em movimento com uma teoria que estabeleça com profundidade a relação entre a matéria e o éter e forneça equações sobre o que acontece dentro de tais sistemas (LORENTZ, 1892, p. 70). Para desenvolver tais equações que permitiriam a dedução teórica do coeficiente de Fresnel, o autor lança mão de hipóteses sobre a constituição interna da matéria ponderável – agora definitivamente distinta do éter dielétrico de Maxwell. Então, admitiu que a matéria é formada por um grande número de partículas carregadas, positivas e negativas, e que os fenômenos elétricos são causados pelo movimento destas partículas (ibid.).

Dentro desta visão, Lorentz reinterpreta alguns conceitos caros ao eletromagnetismo: corpos eletrificados seriam corpos ponderáveis que teriam um excesso de partículas de um ou outro tipo; a corrente elétrica seria um fluxo real destes mesmos corpúsculos; o “deslocamento elétrico” seria causado pelo deslocamento das partículas elétricas de um isolante em relação às suas posições de equilíbrio. Considerados desta maneira, os fenômenos dielétricos e de condução estão confinados no interior da matéria comum, delineando claramente o papel que esta desempenha nesta classe de fenômenos.

Após estas considerações preliminares, Lorentz expõe as seis hipóteses fundamentais desta versão da teoria (MCCORMMACH, 1970):

- a) as cargas elétricas podem ser sujeitas a forças externas assim como a matéria ponderável, ou seja, elas são dotadas de massa inercial e peso. O éter pode existir no espaço ocupado pelas cargas e pelos corpos neutros, como se não estivessem lá. Isso implica que o éter goza sempre das mesmas propriedades, independente da presença ou não de matéria e de seu movimento. Ou seja, o éter é completamente livre e não afetado pela matéria;
- b) a energia potencial de um sistema eletromagnético é igualada à energia eletrostática se-

gundo a seguinte integral de volume:

$$2\pi V^2 \int (f^2 + g^2 + h^2) d\tau,$$

onde  $V$  corresponde à velocidade da luz e  $f$ ,  $g$  e  $h$  são componentes do deslocamento elétrico, de maneira que esta grandeza satisfaça a lei de Gauss, ou seja, o divergente do deslocamento elétrico ser igual a zero no éter livre e igual a  $\rho$  (densidade volumétrica contínua de carga) no interior de dielétricos. As equações para o primeiro e o segundo caso são, respectivamente,

$$\frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} = 0$$

e

$$\frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} = \rho;$$

- c) as partículas se comportam como corpos rígidos, ou seja, têm apenas movimentos de translação e rotação, de maneira que cada ponto seu conserva o valor de  $\rho$ ;
- d) Lorentz define a corrente elétrica total como a soma da corrente de convecção (ou seja, o produto da densidade de carga com a velocidade da partícula carregada) com a variação temporal do deslocamento elétrico (o que entendemos hoje como a derivada temporal da polarização de um dielétrico). Assim, a corrente é composta pela combinação de dois tipos de fluxos de partículas elétricas: um deslocamento real no caso de condutores e um deslocamento infinitesimal das cargas em torno de uma posição de equilíbrio, como expressos pelas equações

$$\begin{aligned} u &= \rho\xi + \frac{df}{dt}, \\ v &= \rho\eta + \frac{dg}{dt}, \\ w &= \rho\zeta + \frac{dh}{dt}, \end{aligned}$$

onde  $u$ ,  $v$  e  $w$  são as componentes da corrente,  $\xi$ ,  $\eta$  e  $\zeta$  são componentes da velocidade de um ponto de uma partícula carregada;

- e) é determinada a relação entre o campo magnético e a corrente elétrica total, ou seja, o rotacional do campo é proporcional à soma da corrente de convecção com a variação

temporal do deslocamento elétrico:

$$\begin{aligned}\frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} &= 4\pi \left( \rho\xi + \frac{df}{dt} \right), \\ \frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx} &= 4\pi \left( \rho\eta + \frac{dg}{dt} \right), \\ \frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} &= 4\pi \left( \rho\zeta + \frac{dh}{dt} \right).\end{aligned}$$

Lorentz iguala a energia cinética associada à corrente à densidade de energia do campo magnético segundo a equação:  $\frac{1}{8\pi} \int (\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2) d\tau$ , onde  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são as componentes do campo;

- f) a posição de cada ponto do éter que participa dos movimentos eletromagnéticos é determinada pela posição de cada partícula carregada e pelo valor do deslocamento elétrico em cada ponto.

Essas hipóteses representam uma inovação teórica para a física do éter. A forte delimitação entre éter e matéria permitiu Lorentz definir os estados do éter apenas como uma componente elétrica e outra magnética, sendo independente de grandezas mecânicas e do estado de movimento dos corpos ponderáveis, ao contrário das teorias de Stokes, Hertz, Fresnel e dos maxwellianos, nas quais os corpos ponderáveis arrastavam, ou transmitiam seu movimento ao éter. Para Lorentz, entretanto, o éter não era desprovido de movimento; a componente magnética, à semelhança das teorias maxwellianas, era identificada como a movimentação do meio etéreo, o que era coerente com o fato de ser tratado como uma substância dinâmica, mas esse movimento não encontrava análogos mecânicos nem era solidário à experiência macroscópica comum.

O movimento de cada ponto do éter é dado pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned}4\pi V^2 \left( \frac{dg}{dz} - \frac{dh}{dy} \right) &= \frac{d\alpha}{dt}, \\ 4\pi V^2 \left( \frac{dh}{dx} - \frac{df}{dz} \right) &= \frac{d\beta}{dt}, \\ 4\pi V^2 \left( \frac{df}{dy} - \frac{dg}{dx} \right) &= \frac{d\gamma}{dt}.\end{aligned}$$

Em notação moderna este conjunto de equações equivale a dizer que o rotacional do campo elétrico em um ponto é igual à derivada temporal do campo magnético. Juntamente com as outras equações explicitadas ao longo das seis hipóteses fundamentais, essas equações determinam

completamente de estado do éter (LORENTZ, 1892, p. 72-7).

Após determinar os estados de energia cinética, energia potencial e os estados do éter na presença de cargas e correntes, Lorentz expõe um dos pontos cruciais de sua teoria, o qual relega a principal função dos elétrons em seu sistema teórico: *mediar a interação entre o éter e a matéria*. O éter seria capaz de exercer forças nas partículas carregadas do interior da matéria, pondo-as em movimento. Tais forças foram definidas pela integral de volume que compreende a partícula elétrica e cada uma de suas componentes é expressa pelas equações:

$$X = 4\pi V^2 \int \rho f d\tau + \int \rho(\eta\gamma - \zeta\beta) d\tau, \quad (3.12)$$

$$Y = 4\pi V^2 \int \rho g d\tau + \int \rho(\zeta\alpha - \xi\gamma) d\tau, \quad (3.13)$$

$$Z = 4\pi V^2 \int \rho h d\tau + \int \rho(\xi\beta - \eta\alpha) d\tau, \quad (3.14)$$

cuja versão moderna e compacta são familiares aos atuais livros textos de eletromagnetismo ( $\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ ), a conhecida força de Lorentz.

Tendo determinado as equações de estado do éter e como ele interage com a matéria ponderável por meio de seus íons constituintes, Lorentz foi capaz de dar um tratamento teórico à questão da propagação da luz em meios dielétricos em repouso e em movimento. O capítulo VI de seu tratado consiste na derivação das equações de propagação da luz em um meio em repouso em relação ao éter, cuja solução obtida descrevia ondas com velocidade de propagação igual a  $c/n$ , em que  $n$  podia ser expresso em termos das propriedades do modelo microscópico do meio em questão (JANSSEN, 2013). O capítulo seguinte trata da propagação da luz em meio transparentes em movimento no qual deriva dinamicamente o coeficiente de arraste de Fresnel sem introduzir o arraste parcial do éter, mas sim considerando este imóvel e que as ondas luminosas é que eram parcialmente arrastadas pelo movimento do dielétrico. A explicação microscópica desse efeito é a seguinte (MCCORMMACH, 1970; JANSSEN & STACHEL, 2004): quando um raio de luz incide sobre o corpo em movimento, ele põe as cargas microscópicas em movimento harmônico simples em torno de sua posição de equilíbrio. Este movimento faz com que a carga seja a fonte de um novo distúrbio no éter, gerando uma onda secundária, que se interfere com a onda incidente. Esse processo acontece repetidamente com todas as partículas carregadas do corpo. Concomitantemente ao movimento causado pelo campo elétrico da onda primária, cada carga é sujeita também a uma força  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ , causada pelo movimento comum. Esses dois efeitos, quando levados em consideração no referencial do corpo e desprezando efeitos de segunda

ordem em diante, alteram a velocidade da onda em um fator  $v/n^2$  de seu valor  $c/n$  quando o meio está repouso. No referencial do éter, a velocidade da luz assume o valor  $c/n + (1 + 1/n^2)$ , em concordância com a teoria de Fresnel (MCCORMMACH, 1970; JANSSEN & STACHEL, 2004). Esse resultado foi obtido por meio das transformações de Galileu e de várias funções auxiliares que permitiram a transformação de quantidades eletromagnéticas de um sistema em repouso para um sistema em movimento em relação ao éter, dependendo de cálculos complicados e extensos. Com este estudo, Lorentz teve sucesso em construir mecanismos explicativos que dessem conta de todos os fenômenos de primeira ordem relacionados à ótica dos corpos em movimento, mantendo invariantes, neste nível de precisão, invariantes as leis da ótica.

Apesar desse sucesso, a teoria previa que efeitos de segunda ordem evidenciariam o movimento da Terra através do éter, o que discordava dos resultados experimentais de Michelson e Morley. Sendo assim, apesar da teoria dos elétrons ter obtido o triunfo da derivação do coeficiente de Fresnel, exigência imposta à teoria pelas reiteradas verificações do efeito de Fresnel-Fizeau, o celeuma óptico permanecia sem solução, evidenciando a manifesta contradição das explicações dos experimentos de primeira e segunda ordem dada pela teoria de Lorentz.

A famosa hipótese da contração, que salvaria o fenômeno da experiência interferométrica de alta precisão, seria publicada três anos depois por Lorentz em seu livro *Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern* (1895) (Tentativa de uma teoria de fenômenos elétricos e ópticos em corpos em movimento), referido frequentemente como *Versuch*. Nele, Lorentz trata esse fenômeno por meio de hipóteses adicionais àquelas previamente determinadas em 1892, considerando que as forças intermoleculares que determinam a forma dos corpos se transformam mediante movimentos de translação da mesma maneira que as forças elétricas. Isso implica que os corpos em movimento retilíneo em relação ao éter sofrem contrações iguais àquelas determinadas independentemente por Fitzgerald e Heaviside. Apesar da relativa plausibilidade da hipótese da contração, ela foi alvo de críticas, como a de Poincaré (1900, apud. MCCORMMACH, 1970), que a considerava algo artificial, e que uma teoria realmente satisfatória sobre fenômenos óticos e elétricos em corpos em movimento produziria uma só e explicação para efeitos de primeira e segunda ordem ao invés de explicações completamente distintas. Em consonância com essa exigência, Poincaré começou a falar sobre um “princípio da relatividade”, como um princípio empírico, segundo o qual todas as leis da física deveriam ser as mesmas independentes do referencial inercial considerado (GOLDBERG, 1969, p. 989).



Em seu *Versuch*, Lorentz obteve novamente o coeficiente de Fresnel, mas desta vez por outros meios e conferindo a ele outra interpretação, distinta daquela explicação dinâmica de 1892. Neste caso o coeficiente emerge naturalmente, e de maneira muito mais simples, de um conjunto de transformações que mantêm invariantes, em aproximações de primeira ordem, as equações de estado do éter (ou seja, as equação de Lorentz-Maxwell). Para tal, Lorentz fez uso de uma quantidade auxiliar que ele chamou de “tempo local”, uma variável independente expressa pela seguinte equação:

$$t' = t - 1 \frac{1}{V^2} (p_x x + p_y y + p_z z),$$

onde  $p_x$ ,  $p_y$  e  $p_z$  são componentes da velocidade do ponto localizado em  $x$ ,  $y$  e  $z$  do dielétrico,  $V$  corresponde a velocidade da luz e  $t$  é o tempo verdadeiro, ou absoluto. Lorentz utiliza o tempo local apenas como uma ferramenta calculatória, sem atribuir significado físico a esta grandeza e sem qualquer pretensão de revisar o conceito clássico de tempo (MCCORMMACH, 1970). O tempo local (que recebe este nome pela sua dependência com a posição) nos remete ao tratamento teórico de Portier, sendo igual ao atraso do raio de luz ao percorrer uma dada distância dentro de um corpo transparente em movimento quando comparado com o tempo que luz demoraria em percorrer a mesma distância em um corpo em repouso em relação ao éter. Lorentz utiliza esta variável independente para provar seu teorema dos estados correspondentes, que afirma que para cada estado de deslocamento elétrico, força elétrica e força magnética no referencial  $S$  do éter (dependentes de coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $t$ ), pode-se associar a esse outro estado para um referencial  $S'$  em movimento retilíneo uniforme em que estas grandezas (dependentes de  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  e  $t'$ ) mantêm sua forma em aproximações de primeira ordem.

O teorema dos estados correspondentes não foi adotado por Lorentz para relacionar estados em sistemas de referência equivalentes - uma vez que adotava o referencial do éter como sendo privilegiado, palco onde valem as leis do eletromagnetismo - mas sim para reduzir fenômenos que ocorrem em referenciais em movimento a fenômenos que ocorrem no referencial do éter (MILLER, 1981). Esse teorema pode ser interpretado como um precursor das transformações de Lorentz, retidas na teoria da relatividade (GOLDBERG, 1969, p. 986), mas difere delas em dois importantes aspectos: é uma versão aproximada, uma vez que torna as equações do eletromagnetismo invariante apenas em aproximações de primeira ordem de  $v/c$ , ao contrário das transformações exatas que estamos acostumados a ver nos livros texto; preserva a tradição clássica que hierarquiza o éter como *referencial privilegiado, onde valem as leis da ótica e do*

*eletromagnetismo*, ao contrário da teoria einsteiniana que elimina este status do éter, bem como a entidade em si.

A versão final da teoria dos elétrons de Lorentz foi publicada em 1904 com título “*Electromagnetic Phenomena in a System Moving with any Velocity Less than that of Light*”, em que buscou unificar as explicações dos fenômenos de segunda ordem com os de primeira, assimilando explicitamente algumas das críticas metodológicas de Poincaré, como aponta Goldberg:

Poincaré se opôs à teoria existente sobre os fenômenos elétricos e ópticos dos corpos em movimento que, com o intuito de explicar o resultado negativo de Michelson, demandou a introdução de novas hipóteses, e que a mesma necessidade pode ocorrer cada vez que novos fatos sejam trazidos à luz. Certamente, inventar hipóteses especiais para cada novo resultado experimental é de certa maneira artificial. Seria mais satisfatório se fosse possível mostrar por meios de assunções fundamentais, e sem negligenciar termos de uma ou outra ordem de magnitude, que muitas ações eletromagnéticas são inteiramente independentes do movimento do sistema. (Lorentz apud [GOLDBERG, 1969](#), p. 989).

Nessa nova versão da teoria dos elétrons, Lorentz introduz o grupo de transformações exatas que torna as equações de Maxwell invariantes mediante mudanças de referenciais inerciais:

$$\begin{aligned}x' &= \gamma(x - vt), \\y' &= y, \\z' &= z, \\t' &= \gamma \left( t - x \frac{\beta^2}{v} \right),\end{aligned}$$

onde  $\beta = v/c$  e  $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ . Ao contrário de sua manifestação sobre a necessidade de assunções fundamentais, Lorentz não deriva seu grupo de transformações por meio de princípios gerais, mas simplesmente as assume por serem capazes atingir a covariância das equações de estado do éter. Dentro de seu sistema teórico, a impossibilidade de detectar-se o movimento da Terra através do éter continuava sendo explicada por efeitos de compensação e a velocidade constante da luz continuava a ser apenas aparente, respeitando as noções newtonianas de espaço e tempo.

### 3.9.4 Crises da visão mecânica de mundo e a visão eletromagnética da natureza

A forte delimitação entre éter e matéria permitiu Lorentz definir os estados do éter apenas como uma componente elétrica e outra magnética, se afastando dos antigos modelos mecânicos do éter que marcaram tanto a física francesa quanto a britânica. Segundo Hirose (1969), essa concepção de éter marca a própria origem dos conceitos de campo eletromagnético (clássico) como entendemos hoje, desmecanizado, relegando ao éter apenas o papel de palco dinâmico onde se assentam os campos elétricos e magnéticos (além da já referida função de referencial inercial privilegiado). Além desta inovação, a teoria de Lorentz carregava consigo a tentativa de prover uma síntese, ao unificar uma visão campista de ação contígua do eletromagnetismo, seguindo a tradição de Faraday-Maxwell, e uma visão molecular da matéria, seguindo a tradição germânica de teorias elétrico-moleculares.

McCormmach (1970) argumenta que esse intento unificador foi um dos principais elementos de inspiração para a visão eletromagnética da natureza. As dificuldades em formular explicações mecânicas para os fenômenos eletrodinâmicos são tão antigas quanto este próprio campo da física, e ao longo do século XIX foram formuladas ideias frontalmente avessas ao mecanicismo newtoniano; o autor passa a citar algumas delas: em 1846, Weber formula uma nova lei fundamental de interação entre “massas elétricas”, mostrando inclusive a ambição de estendê-la para todas as interações da natureza; Riemann, em 1868, substituiu as interações de ação à distância por forças elétricas que se propagam com velocidade finita pelo espaço; o mesmo reconheceu uma formulação matemática que acusaria a dependência da velocidade relativa de corpos elétricos em sua massa aparente (1875); Clausius, 1876, violou a lei newtoniana de ação e reação em um trabalho que buscava lançar novas bases teóricas para a eletrodinâmica; entre outras. Mas à época, segundo o autor, eram ideias dispersas, fragmentadas, não exploradas profundamente em todas as suas consequências e não fundamentadas em uma base sólida. Foi ao longo da formulação da teoria do elétron que estes conceitos emergiram como consequência da articulação do eletromagnetismo campista com a visão atomista da eletricidade, assim como gradualmente ficavam claras as necessidades de alterar as bases mecânicas da física geral.

A dependência da massa de um corpo eletricamente carregado com a sua velocidade foi um dos maiores desafios à mecânica clássica e grande motivador da construção de uma nova dinâmica e de uma concepção eletromagnética do mundo (ibid.). O efeito foi derivado a partir das equações de Maxwell para uma esfera carregada em movimento, no já referido estudo do

campo eletromagnético associado a cargas em movimento retilíneo uniforme de J. J. Thomson de 1881, no qual se deduzia que o aumento da massa aparente da carga aumentava devido aos efeitos de auto-indutância. Com o aumento da velocidade da carga, aumentava a densidade de energia do seu campo magnético em uma dependência com o quadrado de sua velocidade, à semelhança do aumento da energia cinética de um corpo comum. O campo magnético era comumente associado a estados de movimento do éter, como já comentado anteriormente, de forma que o efeito em questão logo foi associado a uma espécie de energia cinética de natureza eletromagnética e, conseqüentemente, uma massa (e inércia) de origem exclusivamente eletromagnética. McCormach identifica esse fenômeno como a pedra angular que orientou muito esforços para que se reduzisse a dinâmica à causas eletromagnéticas. A principal questão levantada nesse sentido era: se o campo eletromagnético causa o aumento da massa aparente de uma carga, *será possível que o campo seja a causa de totalidade de sua massa inercial?* Concebido desta maneira, os elétrons não seriam nada em si mesmo, mas sim buracos no éter, cuja inércia se reduziria à inércia do éter (POINCARÉ, 2008 [1908]). Indo além, caso toda a matéria fosse exclusivamente composta de elétrons de ambos os sinais, será possível reduzir a massa de toda a matéria à causas eletromagnéticas?

Questões dessa natureza levaram alguns cientistas – dentre eles, McCormach destaca Wilhelm Wien – a especularem sobre a possibilidade de a gravidade ser um fenômeno exclusivamente etéreo. Wien tentou reduzir as três leis do movimento de Newton a casos limite da teoria eletromagnética. A primeira lei, a lei da inércia, estaria englobada dentro do princípio de conservação de energia eletromagnética; a segunda lei era preservada desde que se considerasse que a aplicação da força que age para acelerar uma partícula carregada balanceasse exatamente a mudança de sua energia eletromagnética, à semelhança do teorema da energia cinética; a terceira lei só se fazia válida caso se considerasse cargas em repouso junto ao éter, perdendo sua validade para cargas em movimento, conseqüência esta já conhecida e obtida a partir da teoria de Lorentz. Isso acontece por se aceitar o fato de que as ações entre partículas elétricas se propagam com velocidades finitas: quando uma carga sofre uma mudança no seu estado de movimento, a informação desta mudança é propagada na velocidade da luz seguindo as condicionantes da equação de onda via campo eletromagnético. Uma segunda carga, em repouso em relação ao éter, age na primeira seguindo a linha geométrica reta que une ambas no instante  $t$ . Já a ação da primeira sobre a segunda, no instante em que a frente de onda alcança a carga em repouso, não acontece de maneira linear, graças a perturbação gerada no éter. Desta

forma, a lei do antiparalelismo entre pares de forças ação-reação é violada em teorias maxwellianas. No contexto das teorias do elétron, muito se conjecturou sobre efeitos locais sobre o éter que compensassem tal violação da terceira lei de Newton, sem os quais essa se tornaria obsoleta (Poincaré, 1900, apud. MCCORMMACH, 1970). Era adjunta a esse condicionante a emergência de um novo tipo de *momentum* de natureza eletromagnética.

Em 1903, o físico alemão Max Abraham, convencido de que a massa do elétron era inteiramente eletromagnética (nesta época muitos pesquisadores estavam convencidos do mesmo, dentre eles, Lorentz e Poincaré), utilizou este novo conceito de *momentum* eletromagnético, introduzido por Poincaré, para construir uma dinâmica do elétron livre de quaisquer bases mecânicas ou forças cujas origens não fossem eletromagnéticas. Dentre elas, Abraham foi capaz de identificar na teoria de Lorentz a presença de uma energia potencial da natureza não eletromagnética, consequência direta do modelo de elétron deformável ao atravessar o éter, cuja função era manter a coesão interna da partícula. Abraham excluiu esta força de sua teoria, considerando-a uma falha teórica por sua natureza irreduzível a causas elétricas. Tais preferências teóricas e estéticas resultaram, na teoria de Abraham, na obtenção de um modelo de elétron livre de deformações causadas pelo movimento através do éter, tornando a descrição cinemática dos corpos rígidos como um dos fundamentos de sua teoria. O objetivo do desenvolvimento de sua teoria era completar os quesitos que faltavam para uma construção total de uma visão eletromagnética de mundo, a saber, construir forças entre elétrons e matéria ordinária em bases eletromagnéticas, produzir as periodicidades dos elementos químicos e reduzir toda a matéria a agregados de elétrons de maneira a produzir as corretas forças moleculares e gravitacionais (ibid.).

Como argumenta McCormmach, o ímpeto do programa eletromagnético foi freado pelos crescentes números de constatações de fenômenos anômalos que escapavam do poder explicativo da teoria eletrodinâmica e termodinâmica, tendo com exemplo mais patente a radiação de corpos negros. Por volta de 1900, Lorentz tomara como objetivo provar que as leis da termodinâmica poderiam ser reduzidas às equações de sua teoria dos elétrons. Nesse sentido, houve êxito parcial em explicar a absorção e emissão de radiação de longos comprimentos de onda em metais. Para tanto foi utilizado o modelo de metais de Paul Drude, que tratava os elétrons em materiais metálicos como um gás aprisionado, ou seja, os elétrons gozariam de movimentos livres e aleatórios no interior do metal. Segundo esse modelo, o movimento livre era superposto por um movimento mais ou menos ordenado, ou tendencioso, ao ser aplicado uma diferença de

potencial no metal. Os trabalhos de Drude estavam fortemente relacionados com a teoria do elétron inclusive sendo um dos defensores da visão eletromagnética do mundo. Evidências experimentais mostravam que a emissão e absorção de longos comprimentos de onda dependiam apenas da condutividade do material, o que significava uma vitória para a visão reducionista do programa eletromagnético, uma vez que esta é uma propriedade puramente elétrica. Entretanto, se sabia que essa explicação não concordava com a teoria de Planck para os limites de curtos comprimentos de onda, região do espectro em que a teoria contínua da radiação gerava divergências (referida nos livros textos como a *catástrofe do ultravioleta*). A hipótese dos quanta de Planck gerava uma curva que se encaixava satisfatoriamente para qualquer comprimento de onda. Lorentz, ciente deste grave desacordo, deu preferência para a teoria dos quanta em uma palestra em que provava que a combinação da teoria do elétron com as equações de movimento de Hamilton e a teoria estatística de Gibbs levava exatamente à mesma lei da radiação de corpo negro de James Jeans, válida para longos comprimentos de onda. Em suma, a teoria de Lorentz era incapaz de conectar os vários ramos da física relacionados à radiação de corpo negro: o eletromagnetismo, a termodinâmica e a teoria cinética (ibid.).

Ao longo da primeira década do século XX ficavam claras as limitações da teoria clássica dos elétrons e da mecânica clássica para explicar fenômenos que se davam no nível molecular. O autor destaca as obras de Neils Bohr de 1911, sua tese de doutoramento em que propõe uma reformulação da teoria de Lorentz baseada em princípios mais gerais, e seu trabalho de 1913, fundada explicitamente na negação da mecânica convencional e na teoria clássica dos elétrons. Segundo McCormach, “a teoria de Lorentz continuou sendo utilizada, mas seus conceitos foram cada vez mais reconhecidos como inadequados para a reconstrução básica da física teórica demandada pela hipótese quântica”.

Buscamos nas últimas seções expor os avanços teóricos proporcionados pela teoria de Lorentz no domínio da ótica dos corpos em movimento com sua preocupação em reter o coeficiente de Fresnel (fosse esta retenção dentro de uma interpretação dinâmica, fosse dentro de uma interpretação cinemática) em uma teoria de éter estacionário; sua ousadia tanto na interpretação desmecanizada do éter, quanto na adição de hipóteses avessas à intuição e à visão mecânica do mundo, como as hipóteses da contração, tempo local, massa variável (mesmo que todas elas não fossem conectadas por princípios fundamentais); foi uma influente teoria no campo da física atômica, área que dominaria grande parte dos debates da física naquele começo de século. Buscamos também contextualizar a cena científica que Einstein vislumbrava quando publicou

seus famosos trabalhos de 1905, em especial aqueles referentes à teoria da relatividade restrita, quadro teórico que daria nova interpretação aos fenômenos ópticos e eletrodinâmicos de corpos em movimento, revolucionando a visão de tempo e espaço da física e dando nova interpretação para o coeficiente de arrastamento de Fresnel, objetivo último desta reconstrução histórica.

## 3.10 A reinterpretação relativística do coeficiente de Fresnel

### 3.10.1 A proposição da Teoria da Relatividade Restrita

A ausência de efeitos ópticos que denunciasses o movimento da Terra em relação ao referencial do éter foi tornada inteligível pela teoria dos elétrons de Lorentz ao introduzir um conjunto de transformações de coordenadas que mantinham invariantes as equações de Maxwell-Lorentz no vácuo. Desde a sua primeira proposição explícita, em 1895, passando pela sua formulação definitiva de 1904, estas transformações eram empregadas apenas como uma ferramenta de cálculo que estabelece correspondências entre sistemas em movimento e sistemas estacionários (STACHEL, 2005b). Podemos dizer que as transformações de Lorentz, assim batizadas por Poincaré (ibid), só receberam uma interpretação física profunda e deduzidas via princípios físicos fundamentais com o trabalho sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento de Einstein, em 1905.

Desde jovem Einstein nutria particular interesse pela eletrodinâmica, tendo formulado aos dezesseis anos sua primeira experiência de pensamento, na qual imaginou um observador que acompanha um raio de luz, estando assim em repouso em relação ao outro. Einstein pensou o que este observador “enxergaria” nesta situação, chegando a uma estranha contradição: seria observado um pulso imóvel de luz, uma ondulação estacionária sem propagação, ou seja, algo fisicamente inexistente (PATY, 2008, p. 51). Em seu primeiro artigo sobre a relatividade, nos é apresentado em sua introdução outra experiência de pensamento, esta diretamente ligada à eletrodinâmica dos corpos em movimento, na qual considerava a relatividade do movimento de uma espira metálica e um ímã, nos chamando atenção para o que ele considerava uma “assimetria” gerada pela teoria de Maxwell:

Como é bem conhecido, a eletrodinâmica de Maxwell [...], quando aplicada a corpos em movimento, produz uma assimetria que não parece ser inerente aos fenômenos. Considere-se, por exemplo, a interação eletrodinâmica entre um ímã e um condutor. O fenômeno observável, aqui, depende apenas do movimento relativo entre o condutor e o ímã, ao passo que o ponto de vista usual faz

uma distinção clara entre os dois casos, nos quais um ou outro dos dois corpos está em movimento. Pois, se o ímã está em movimento e o condutor está em repouso, surge, nas vizinhanças do ímã, um campo elétrico com um valor definido de energia que produz uma corrente onde quer que estejam localizadas partes do condutor. Se o ímã, contudo, estiver em repouso, enquanto o condutor se move, não surge qualquer campo elétrico na vizinhança do ímã, mas, sim, uma força eletromotriz no condutor, que não corresponde a nenhuma energia *per se*, mas que, supondo uma igualdade do movimento relativo, nos dois casos, dá origem a correntes elétricas de mesma magnitude e sentido, que as produzidas no primeiro caso, pelas forças elétricas.

A assimetria que Einstein se refere consiste na inadmissível – segundo sua forma de pensamento – distinção entre as explicações usadas para o caso em que se atribui repouso absoluto ao ímã, por um lado, e ao condutor, por outro, mesmo que não haja contrapartida empírica para que se decida qual dos dois fenômenos está realmente acontecendo. Em seguida argumenta que, assim como os fenômenos da mecânica, não existe nos fenômenos da eletrodinâmica quaisquer propriedades que correspondam ao repouso absoluto (Einstein, 1905, apud. [STACHEL, 2005b](#)). Esse tipo de fenômeno, somado à ausência da anisotropia terrestre acusada por vários experimentos já mencionados neste capítulo, levaram-no a estender o princípio da relatividade da mecânica para a ótica e a eletrodinâmica, tornando-se o primeiro princípio fundamental de sua teoria, chamando-o de “princípio da relatividade”. Einstein enfatiza que o princípio da relatividade já havia sido demonstrado para fenômenos eletromagnéticos e ópticos de primeira ordem, ou seja, aqueles que dependem do coeficiente de Fresnel.

Durante sua formação, Einstein tivera apenas contato com a eletrodinâmica de Hertz, que assumia o arrastamento total do éter por corpos em movimento, o que preservava o princípio da relatividade, algo importante para seu estilo de pensamento, que buscava sempre refletir sobre os princípios gerais e a coerência interna de uma teoria física ([PATY, 2008](#)). Mas, entre os anos de 1901 e 1902, quando tomou conhecimento da teoria de Lorentz ([1895](#)), deu à ela preferência, pela vantagem de explicar diretamente o experimento de Fizeau e conter o coeficiente de arraste de Fresnel. Por um lado, esta escolha era vantajosa no sentido abranger mais fenômenos conhecidos, a saber, todos aqueles em que eram imprescindíveis o emprego do coeficiente de arrastamento, mas por outro perdia na elegância ao privilegiar o referencial absoluto de éter se alienando do princípio da relatividade. A tarefa empreendida por Einstein foi a de tornar compatíveis os sistemas teóricos da mecânica e da eletrodinâmica, reformando ambas e



reconceitualizando a visão de espaço e tempo.

Nesse sentido, o programa de pesquisa de Einstein difere muito daquele de Lorentz e dos físicos que defendiam a redução da mecânica às leis do eletromagnetismo, uma vez que não se preocupava com as mesmas questões, por exemplo, a deformabilidade ou não do elétron ao se deslocar através do éter (MCCORMMACH, 1970), mas se preocupada sim em eliminar as contradições entre os dois ramos da física, preservando de cada um deles aquilo que julgava inegociável (PATY, 2008): do lado da mecânica, buscava preservar o princípio da relatividade, cuja extensão já foi comentada; do lado da teoria de Maxwell, buscou preservar a constância da velocidade da luz, derivada diretamente de suas equações fundamentais. Este último configura o segundo princípio de sua teoria, a velocidade da luz assume sempre o mesmo valor no vácuo, independente do estado de movimento de sua fonte.

À primeira vista, estes dois princípios parecem incompatíveis, e tal incompatibilidade tinha origem no fato de que a velocidade da luz *deveria* ser diferente quando observado em diferentes referenciais ou em diferentes estados de movimentos: a contradição era encontrada na implícita aceitação universal da soma galileana de velocidades, regra na qual está implícita também as próprias noções newtonianas de espaço e tempo absolutos. Tais noções estão intimamente ligadas à ideia de ação instantânea à distância, que compunha o âmago da gravitação de Newton, conceito não admitido pelo eletromagnetismo de Faraday e Maxwell, cujas ações são sempre contíguas e mediadas pelo campo eletromagnético. Einstein buscou ressignificar a noção de velocidade levando em consideração manter uma teoria geral de campos, o que o levou a “interrogar-se em primeiro lugar sobre a noção de *simultaneidade*” (ibid, p. 59). Influenciado pelas concepções da mecânica relacional Mach e pela crítica do espaço e tempo absolutos de Poincaré, Einstein concluiu que a simultaneidade absoluta deveria ser sacrificada, uma vez que sinais (óticos, por exemplo) são propagados com velocidade finita. Assim, a simultaneidade deveria ser relativa ao estado de movimento do observador, uma vez que o tempo de propagação de sinais associados a dado evento pode mudar dependendo do estado de movimento daquele que mede o evento: caso esteja se afastando dele, o tempo parecerá maior, enquanto que parecerá menor caso esteja se aproximando (ibid, p. 60). Ao se relativizar a noção de intervalos de tempo, a fim de manter absoluta a velocidade da luz, conseqüentemente teria de se relativizar a noção de distância. Einstein deduz estas novas concepções a partir dos dois princípios por ele postulados, obtendo as transformações de Lorentz (antes apenas assumidas de antemão). A partir destas transformações deduz também uma nova regra de adição de velocidades que eliminou

a aparente contradição entre os dois princípios. Segundo a lei de Galileu, a composição  $u$  das velocidades de dois corpos, digamos, uma com velocidade  $w$  e outro com velocidade  $v$ , colineares entre si, é dada pela simples fórmula  $u = w + v$ . A nova regra impunha que qualquer que fosse o resultado da soma da velocidade de um referencial inercial com a velocidade da luz, este nunca excederia o valor  $c$ . Assim, a nova lei de soma de velocidades (já obtida anteriormente por Poincaré) toma a forma  $u = v + w / (1 + \frac{vw}{c^2})$  (ibid. p.59-62).

Uma das consequências deste novo sistema teórico é, como Einstein comentou explicitamente no início de seu artigo, o abandono do éter, entidade por ele interpretada como supérflua, uma vez que se eliminou a necessidade de um referencial privilegiado. É notável que o éter luminífero, talvez a entidade mais importante e protagonista da física teórica do século XIX e absolutamente necessária para uma visão mecânica do mundo, se tornava obsoleto. Dificilmente podemos imaginar que a desmecanização do éter promovida por Lorentz e outros na década de 1890 não cumpriu um papel para sua eliminação, uma vez que Einstein admitia que os “campos elétricos e magnéticos são estados de um meio físico, mas não material, que preenchia todo o espaço” (ibid. p. 51).

Dessa maneira, a teoria de Einstein, que ainda seria reformulada por ele e por outros cientistas, como Minkowski, eliminou as contradições entre os dois principais sistemas teóricos da física, preservando a estrutura matemática da teoria dos elétrons, bem como todas as suas consequências empíricas, mas com a vantagem de se basear em apenas dois princípios postulados e sem a necessidade de hipóteses subsidiárias que marcava a ótica dos corpos em movimento desde a época de Fresnel.

### 3.10.2 A dedução de Max von Laue do coeficiente de arrastamento Fresnel

O trabalho de Einstein, marcado por um lado pela manifesta continuidade formal em relação à teoria de Lorentz, e por outro pela radical reconceitualização de ideias solidificadas por mais de 300 anos de mecânica newtoniana, chamou a atenção, no mesmo ano de sua publicação, do renomado físico Max Planck, com quem passou a se corresponder para discutir aspectos e implicações de sua nova teoria. Nos anos subsequentes Planck “desenvolveu ainda mais as consequências do princípio da relatividade e provocou o interesse de seu assistente, Max Laue” (STACHEL, 2005a), que desenvolveu uma série de artigos sobre o tema.

Dentre estes, aquele que nos interessa data de 1907, cuja tradução do título é “O arrasta-

mento da luz por corpos em movimento de acordo com o princípio da relatividade” (*Die Mitführung des Lichtes durch bewegte Körper nach dem Relativitätsprinzip*), no qual Laue deduziu o coeficiente de Fresnel diretamente da nova cinemática relativística. Para tal, Laue considera dois sistemas de coordenadas ( $S$  e  $S'$ ) um se movendo em direção ao outro com velocidade relativa  $v$ . Uma velocidade  $w$  que é observada por  $S$  se relaciona com a velocidade  $w'$  da seguinte maneira, segundo a adição de velocidades de Einstein-Poincaré:  $w = w' + v / (1 + \frac{vw'}{c^2})$ . Considerando que  $w'$  seja a velocidade com que a luz se propaga em um corpo transparente em movimento no mesmo referencial que  $S'$ , então  $w' = c/n$ . Substituindo na lei de adição temos:  $w = \frac{c}{n} + v / (1 + \frac{vc}{n})$ , em que  $w$  agora é igual à velocidade da luz dentro do corpo transparente medida pelo referencial  $S$ . Ao se aplicar a expansão de Taylor nesta equação e generalizar para o caso em que os dois sistemas podem se tanto se afastando quanto se aproximando, obteremos:

$$w = \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \left(\pm v - \frac{v^2}{cn} \pm \frac{v^3}{(cn)^2} - \frac{v^4}{(cn)^3} + \dots\right). \quad (3.15)$$

Ao negligenciarmos os termo de ordem dois em diante recaímos na velha fórmula de Fresnel para a velocidade da luz em um corpo transparentes em movimento:  $w = \frac{c}{n} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) v$ . Neste sucinto artigo, Laue mostra que o coeficiente de Fresnel - quase 90 anos depois de sua proposição original - emerge naturalmente das novas relações entre o espaço e o tempo, estruturalmente ligadas na teoria da relatividade restrita. Ao fim do trabalho, Laue endossa o caráter agora supérfluo do éter concordando com Einstein ao dizer que o princípio da relatividade nos livra da necessidade de introduzir um éter ótico (LAUE, 1907), uma vez que o coeficiente é deduzido sem fazer quaisquer suposições sobre o éter ou sobre sua interação com a matéria, sem quaisquer hipóteses sobre a estrutura matéria ou sobre a natureza do líquido pelo qual a luz passa, emergindo apenas das íntimas relações entre espaço e tempo. Esta dedução é matematicamente equivalente daquela de Lorentz em 1895, mas atribuiu profundo significado físico do termo dependente das coordenadas do eixo  $x$  (presente na expressão do tempo local e nas transformações de Lorentz) diretamente relacionado à relatividade da simultaneidade (JANSSEN, 2013). O coeficiente de Fresnel não pode ser tributário então de novas explicações dinâmicas de interação entre o éter e matéria, mas sim fruto de uma nova cinemática do espaço-tempo.

## Capítulo 4

# Pesquisa de campo sobre tópicos não-consensuais da Natureza da Ciência na formação inicial de professores

### 4.1 Introdução

Ao longo deste trabalho, dedicamo-nos a refletir sobre aspectos não consensuais da Natureza da Ciência. Questões filosóficas envolvendo as intrincadas relações entre teoria e realidade, o problema da mudança científica e todo o debate acerca do realismo científico são ricas e perenes fontes de discussões epistemológicas bastante controversas. Por meio do episódio histórico, buscamos tornar tais reflexões menos abstratas, ao mostrar que a retenção estrutural do coeficiente de arraste de Fresnel pela Relatividade Restrita ocorreu mesmo abandonando a referência teórica ao éter. Tal estudo histórico-epistemológico serviu como um material de base para que pudéssemos realizar uma intervenção didática que contemplasse os conteúdos e inquietações desta pesquisa.

Fomentar debates sobre aspectos controversos da NdC em cursos de licenciatura é uma peça-chave para que esses futuros professores se sintam aptos e intelectualmente autônomos para implementarem tais temas em contextos de ensino. Estudos importantes de HFSC já apontavam para a necessidade de se investir na formação de professores para que o projeto de inserção da NdC no ensino realmente possa se efetivar (MARTINS, 2007; HÖTTECKE & SILVA, 2011). Como indicam os estudos, sem que os professores em formação tenham contato com conteúdos metacientíficos e com intervenções de inserção da HFSC no ensino, torna-se mais difícil mudar a cultura didática vigente, geralmente voltada para a tradicional transmissão de conteúdos. Para tal, a formação de professores é o ponto de partida para que os conteúdos metacientíficos se façam presentes na educação científica. Considerando tal importância da for-

mação do professor, foi planejado, como parte dos objetivos desta pesquisa, uma investigação de campo baseada em uma intervenção didática em uma disciplina dos cursos de Licenciatura em Física e Licenciatura em Matemática.

Uma vez que estamos tratando de assuntos sofisticados e não consensuais sobre a NdC, ao invés do ensino estanque de declarações das listas de Visões Consensuais, julgamos que uma abordagem orientada a questões, inspirada pela proposta de Martins (2015), seria mais coerente com nossos objetivos educacionais e de pesquisa (ver seção 1.3). Propomos aos alunos um conjunto de questões abertas a serem respondidas em um conjunto de textos, para que pudéssemos analisar a construção de argumentos utilizados pelos alunos para tratar do assunto proposto.

Para tanto, realizamos uma pesquisa de ensino qualitativa, uma vez que a argumentação dos alunos foi nosso principal objeto de investigação. Considerando o objetivo de pesquisa, a forma dos dados coletados e sua quantidade, encontramos na análise textual discursiva (MORAES, 2003) uma metodologia frutífera para compreendermos o entendimento dos alunos acerca das questões epistemológicas pertinentes a esta pesquisa. Buscamos então abordar, em situações de ensino, os temas da mudança científica e a querela entre a continuidade e descontinuidade da ciência. O ensino de tais tópicos se deu de maneira contextualizada em um episódio histórico, inspirado nos estudos desenvolvidos no Capítulo 3.

Isso torna este trabalho diferente de muitas outras pesquisas sobre NdC, as quais buscam analisar a adequabilidade da visão de alunos e professores, tendo como baliza as listas de Visões Consensuais, por meio dos questionários de *Views of Nature of Science* (VNOS) (ver seção 1.2) (LEDERMAN, 1992, 2007; TEIXEIRA, FREIRE JR., EL-HANI, 2009). Tais pesquisas, como comenta Moreira (2014, p. 161), permite a “coleta de dados sobre as visões de NdC de um grande contingente com uma ferramenta relativamente simples”. Além disso, permitem também o mapeamento e evolução das compreensões dos participantes, sendo um poderoso instrumento de pesquisa. No caso desta pesquisa, ao invés de analisar um amplo espectro de posições sobre a NdC, buscamos focar em um aspecto não-consensual específico, o que abre a possibilidade de diversos posicionamentos filosóficos por parte dos alunos que participaram da pesquisa e diversas formas de argumentação sobre o debate proposto na intervenção. Buscando referência em outras pesquisas sobre realismo científico no ensino, concordamos com Moreira (2014) ao afirmar que pesquisas sobre conteúdos metacientíficos dissensuais podem acusar uma riqueza de concepções e posições filosóficas sobre a ciência, ao invés nos acusar a “adequabili-

dade” ou “inadequabilidade” dos participantes a este ou aquele *tenet* das VCNdC. Além disso, a pesquisa foi planejada para ter curta duração, sendo bastante pontual e não abarcando fenômenos que envolviam mudanças na visão de ciência dos participantes ao longo de todo um percurso formativo, ao contrário do que comumente se objetiva com o emprego de questionário sobre VNOS.

A pesquisa de campo encontra seus subsídios teóricos nos três capítulos anteriores desta dissertação. Do ponto de vista do conteúdo metacientífico a ser abordado em sala de aula, buscamos levar as principais questões epistemológicas (as quais envolvem as implicações filosóficas da mudança científica no debate sobre o realismo científico) que permeiam esta dissertação para um curso de formação de professores. O episódio histórico sobre a ótica dos corpos em movimento, o coeficiente de arraste de Fresnel e a proposição da Relatividade Restrita foi utilizado como meio para se levantar questões sobre a (des)continuidade do conhecimento científico.

Os estudos sobre o ensino da Natureza da Ciência, apresentados no Capítulo 1, foram fundamentais tanto para justificar o conteúdo metacientífico escolhido para ser abordado na intervenção, quanto na formulação das atividades propostas aos participantes da pesquisa de campo.

O ensino de Natureza da Ciência, orientado exclusivamente pelas listas de Visões Consensuais, torna demasiadamente restrito o leque de conteúdos metacientíficos a serem objeto de estudo em sala de aula. O realismo científico, como nos lembra Matthews (2012), fica de fora dos conteúdos a serem privilegiados em contextos educacionais, por mais que seja um aspecto bastante presente no desenvolvimento histórico da ciência. Ao questionarmos o ensino estrito das listas das Visões Consensuais, não consideramos que Lederman e outros autores defensores do ensino de tópicos consensuais de NdC entendam debates não consensuais como desimportantes para o Ensino de Ciências. A defesa do ensino das visões consensuais, em detrimento de conteúdos dissensuais, está muito mais associada à falta de acordo entre especialistas sobre conteúdos controversos da HFSC. Coloca-se em questão a possibilidade e desejabilidade de tornar objeto de ensino assuntos que nem sequer os especialistas estão de acordo. Porém, consideramos que controvérsias, sejam filosóficas ou científicas, devem estar presentes no ensino. Buscando um exemplo: o caráter controverso da natureza e existência da energia escura justifica a privação dos alunos de conhecer tais querelas? Como o desenvolvimento da ciência e a filosofia se alimentam de controvérsias, entendemos que essas devam fazer parte do ensino tanto quanto seus conteúdos pacificados.

As questões epistemológicas desta pesquisa foram adaptadas a um contexto de ensino e dirigidas aos alunos e alunas que participaram da pesquisa. Buscamos levar o problema da mudança científica, das discontinuidades da ciência e suas implicações para o debate do realismo científico. Para tal, beneficiamos-nos da abordagem de ensino de Natureza da Ciências orientada por questões, como sugere Martins (2015), as quais foram respondidas em produções textuais, tornando possível o desenvolvimento da argumentação e do posicionamento filosófico dos alunos. Como exporemos mais adiante, buscamos explorar questionamentos associados à mudança científica e suas consequências tanto para a imagem de mundo construída pela ciência, quanto para as noções de verdade na ciência e sua capacidade de apreender a realidade do mundo natural.

O tema e as problematizações filosóficas relevantes para a pesquisa foram abordados durante uma intervenção didática constituída em duas etapas: (i) assistir uma sequência de duas aulas e (ii) responder uma atividade vinculada a cada uma das aulas. O conteúdo das aulas buscaram dar ensejo às questões filosóficas de interesse, contextualizando-as na exposição do episódio histórico desenvolvido no Capítulo 3. A primeira aula abarcou a proposição da relatividade restrita feita por Einstein e tinha o propósito de introduzir aspectos conceituais gerais da teoria, bem como algumas de suas motivações e contexto histórico. A segunda aula abordou suas origens conceituais e empíricas no século XIX, em especial, seus antecedentes da ótica física e da ótica dos corpos em movimento. A importância e o abandono do éter na física teórica entre o fim do XIX e início do século XX foi central na segunda aula. A mudança da compreensão da natureza do espaço-tempo, bem como o abandono da principal entidade teórica da física do século XIX, foi objeto de estudo dos alunos em um texto, preparado pelo proponente, para complementar a segunda aula, a fim de aprofundar tanto a importância histórica e científica da física do éter, quanto os questionamentos filosóficos que almejamos abordar (Apêndice E).

Em um primeiro planejamento da intervenção - que acabou não ocorrendo, devido à suspensão das atividades presenciais na USP em decorrência da pandemia de COVID-19 - pretendíamos realizar uma aula exclusivamente sobre o realismo científico e o realismo estrutural, e uma aula exclusivamente sobre o coeficiente de Fresnel e adição relativística de velocidades. O curso escolhido para essa fase empírica da pesquisa havia sido a disciplina optativa oferecida pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo chamada “Tópicos de História da Física Clássica”, oferecida no primeiro semestre de 2020. As duas aulas haviam sido cedidas

pela professora que ministrava a disciplina naquela ocasião. Para além de sua abordagem histórica, tal disciplina havia sido escolhida por ser cursada, em geral, por alunos que já tiveram contato com boa parte do currículo de Física da graduação, em especial as disciplinas sobre Mecânica Clássica, Relatividade Restrita e Ótica. Com tais conhecimentos, julgamos que os alunos estariam aptos a apreender de maneira mais estruturada o elo de continuidade entre a ótica dos corpos em movimento de Fresnel e a cinemática relativística, assunto nada trivial e que exige certos conhecimentos específicos. O objetivo deste planejamento era abordar de maneira mais explícita possível o realismo estrutural e as sutilezas do episódio histórico para que, então, propuséssemos as atividades escritas<sup>1</sup>.

A intervenção foi adaptada para o modo on-line de Ensino à Distância e foi realizada, ao fim do segundo semestre de 2020, na disciplina “Gravitação”, obrigatória nos cursos de Licenciatura em Física, do Instituto de Física da USP, e Licenciatura em Matemática, do Instituto de Matemática e Estatística da USP. A disciplina, de enfoque histórico, foi ministrada pelo orientador desta pesquisa e o proponente integrou a equipe de co-docentes. Como detalharemos mais adiante, essa disciplina é cursada, em geral, por alunos no início do curso de graduação. Com isso em mente, adaptamos as aulas de forma que a referência aos conteúdos mais sofisticados de relatividade foram suprimidos, uma vez que a maioria dos alunos matriculados não havia ainda cursado disciplinas mais avançadas da grade de Física.

Adiantamos ao leitor que essa adaptação da pesquisa de campo não prejudicou sua qualidade ou relevância educacional. Acreditamos, inclusive, que os dados coletados, produzidos pelos alunos e alunas do curso, foram ainda mais adequados aos intentos da pesquisa do que seriam caso tivessem sido obtidos com o plano inicial. Isso se deve a uma conjunção de fatores: o planejamento do curso de Gravitação e sua avaliação preveem atividades escritas semanais, contribuindo para a criação de um hábito de escrita por parte dos alunos, favorecendo a qualidade do *corpus* de análise; o orientador e o proponente da pesquisa planejaram a intervenção para que ela se encaixasse dentro da ementa da disciplina, que envolve a evolução histórica da compreensão da gravitação, desde a filosofia grega até a física contemporânea; a grande quantidade de alunos matriculados na disciplina garantiu um número minimamente adequado de voluntários para a pesquisa, algo que poderia não ter ocorrido no planejamento inicial, que envolvia uma disciplina optativa e com quórum baixo de alunos matriculados; a intervenção, bem

---

<sup>1</sup>Os imprevistos associados à pandemia e ao início da suspensão das atividades presenciais na USP acabaram por impossibilitar a realização deste planejamento.



como as atividades escritas a ela associadas, fez parte do curso regular, sendo obrigatória para todos os matriculados (dentre os quais apenas uma parcela concordou em ceder o texto para a pesquisa), o que gerou engajamento dos alunos e produções de boa qualidade, algo mais difícil de ser executado em um curso no qual o proponente não estava envolvido; o envolvimento do proponente como co-docente do curso beneficiou a análise dos dados, tornando-a mais rica e permitindo interessantes compreensões sobre o que foi produzido pelos voluntários. Dentro do planejamento inicial, o proponente participaria apenas de duas aulas do curso do “Tópicos de História da Física Clássica”, o que não permitiria uma compreensão mais profunda da intervenção e dos dados por não acompanhar de perto o processo formativo dos alunos, como felizmente ocorreu no curso de Gravitação. Em suma, o contexto da intervenção foi favorável a uma análise mais rica dos dados e ao um maior aproveitamento da mesma por parte das alunas e alunos da disciplina.

Em seguida, detalharemos esse contexto, explicando a estrutura do curso, o perfil dos alunos matriculados e dos voluntários da pesquisa, e a realização da intervenção, pormenorizando o conteúdo das aulas e a intencionalidade por trás das atividades propostas aos alunos.

## 4.2 Campo

### 4.2.1 Disciplina de Gravitação

Nesta seção descreveremos a maneira como a disciplina de Gravitação (4300156) foi estruturada e executada. Essa disciplina foi criada e ministrada por anos pelo Prof. Dr. João Zanetic. Como explica o próprio Zanetic, na introdução das suas notas de aula do referido curso, que foi objeto básico de leitura dos alunos durante todo o semestre, o material

seguirá uma abordagem que, ao mesmo tempo, trabalhe com o algoritmo necessário para a solução de problemas clássicos associados a esse tema e sirva de exemplo de um modo de aplicação da História e da Filosofia da Ciência no ensino de Física, principalmente tendo em mente que isto será oferecido a alunos de Licenciatura, futuros professores de física do Ensino Médio. (ZANETIC, 2017 [1995], p. 1).

Assim, a disciplina é marcada pela sua abordagem histórica e filosófica acerca das raízes e desenvolvimento da gravitação, tornando-a um terreno fértil para a discussão e ensino de conteúdos metacientíficos como: a historicidade do conhecimento científico; a imbricada relação entre filosofia e ciência; a circulação social do conhecimento; disputas políticas envolvendo

novos conhecimentos (como o caso do julgamento de Galileu Galilei); modelos epistemológicos sobre o desenvolvimento da ciência; processos de institucionalização da ciência; relações entre tecnologia e ciência; relações entre teoria e realidade, entre outros. Além disso, como comentado por Zanetic, o curso não deixa de abordar os conhecimentos específicos, a resolução de problemas e a formalização dos conteúdos.

Podemos considerar que esse curso de gravitação efetiva o projeto de ensino exposto na tese de João Zanetic (1989), *Física também é cultura*, segundo o qual a ciência é um empreendimento humano profundamente imbricado com outras manifestações culturais e sociais humanas, como a política, a indústria, o comércio, as artes, a literatura, etc. Em outras palavras, a disciplina tenta “mostrar a física como um rico ‘laboratório’ cultural, muito mais complexo, vivo e mutante” (ZANETIC, 1989, p. v) do que poderia ser sugerido por abordagens de ensino ditas tradicionais. Como pretendemos deixar claro mais adiante, o perfil da disciplina foi determinante para a interpretação dos resultados obtidos em campo.

A disciplina é oferecida aos cursos de licenciatura em Física (vinculado ao Instituto de Física da USP) e licenciatura em Matemática (vinculado ao Instituto de Matemática e Estatística da USP), contando com duas turmas, diurno e noturno, em cada um dos cursos de graduação. O período ideal de realização da disciplina é o segundo semestre, sendo, portanto, uma disciplina cursada, em geral, por estudantes recém-ingressos, ou ainda no início de seu processo de formação docente.

Devido à pandemia de COVID-19, o curso foi oferecido a todas as turmas de maneira remota e assíncrona. Os vídeos eram disponibilizados semanalmente no portal de videoaulas da USP, o *e-aulas*. Foi fundamental para o bom andamento do curso a organização de uma página no “moodle” da disciplina abrigado no *e-disciplinas*, plataforma de apoio às disciplinas da Universidade de São Paulo. Nela foram disponibilizados todos os materiais e instruções necessárias aos alunos e alunas para que acompanhassem o curso: o material de leitura mínima (as notas do Prof. João Zanetic, como já comentado); leituras complementares; orientação para as atividades avaliativas; avisos e informações gerais; realização e entrega de atividades. O curso teve a duração de dezessete semanas e o programa da disciplina, estruturado e ministrado pelo orientador desta pesquisa, consta abaixo:

- Do Mito à Razão: As Origens da Filosofia Grega;
- Matemática e Realidade: As Filosofias de Platão e Aristóteles;

- A Terra é Redonda: O Tamanho do Mundo Grego;
- O Surgimento das Universidades e a Mecânica na Idade Média;
- Copérnico e a Revolução Copernicana;
- Os Métodos da Ciência e a Elaboração das Leis de Kepler;
- Operando com as Leis de Kepler;
- Galileu e o Livro da Natureza;
- A Ciência Moderna e a Filosofia Mecanicista;
- Unificando o Universo: A Síntese Newtoniana;
- A Mecânica Celeste Newtoniana;
- O Éter como Espaço Absoluto;
- As Origens Históricas da Relatividade Restrita<sup>2</sup>;
- A Geração da Relatividade Geral;

A dinâmica do curso foi marcada por um sistema de avaliação continuada. Todas as semanas eram propostas atividades associadas ao tema tratado em aula a serem realizadas pelos estudantes. Em geral, as atividades consistiam em uma proposta de produção textual, ou na participação em fóruns de discussões no moodle, sendo mais frequente a primeira do que a segunda. O curso também previu, como parte da avaliação, a realização de dois trabalhos: uma resenha individual a respeito de um artigo sobre História ou Filosofia da Ciência e um trabalho, escrito em grupo, de divulgação científica sobre um tema de escolha dos alunos que contemplasse também a abordagem histórica ou filosófica sobre a ciência. Foram conferidos o mesmo peso às três frentes de avaliação. Comentaremos em mais detalhes as atividades semanais, uma vez que a intervenção realizada contava também com a proposição de atividades sobre suas aulas, e foram a matéria-prima para a análise que será exposta mais adiante. Alguns

---

<sup>2</sup>Quando o curso foi efetivamente ministrado, invertemos a ordem das aulas “O Éter como Espaço Absoluto” e “As Origens Históricas da Relatividade Restrita”. Baseando-nos em implementações anteriores (como nos cursos de Relatividade e Evolução dos Conceitos da Física), consideramos que os alunos apreenderiam melhor a discussão do Éter e suas relações com a Mecânica Clássica e a Relatividade caso fosse abordada após um primeiro contato com aspectos introdutórios da Relatividade Restrita e suas origens históricas.

exemplos de atividades ajudarão a entender algumas das reflexões históricas pretendidas pelo curso e como o ensino de conteúdos históricos sobre a Gravitação foram abordados.

#### 4.2.2 Exemplificando atividades sobre História da Ciência no Ensino

Como é muito comentado na literatura especializada, os potenciais benefícios da inserção da História e Filosofia da Ciência no ensino são contrapostos com seus potenciais riscos. É importante refletir sobre a qualidade dessa abordagem. Qual história/filosofia da ciência é a mais adequada para tais propósitos? Brush (1974, p. 1166) chama a atenção para esse ponto ao defender que professores devem estar atentos a não reproduzirem uma historiografia ultrapassada da ciência, que acaba reforçando algumas visões distorcidas sobre a Natureza da Ciência:

Muitas pessoas ainda acreditam (junto a George Sarton, que chamou Auguste Comte de fundador da história da ciência) que o propósito do historiador é registrar o processo de acumulação de conhecimento positivo, sem esquecer dos erros e confusões ao longo do caminho, mas também não esquecendo de classificá-lo claramente como tais.

Martins (2006) também nos alerta para os maus usos da história da ciência, que muitas vezes a reduzem a nomes, datas e anedotas, ou às ‘grandes descobertas’. Tanto Martins quanto Brush sugerem cautela e precaução aos perigos da “historiografia *whig*”, que seria justamente esse tipo de historiografia que considera o passado da ciência como a história dos seus erros e acertos rumo a um progresso linear até o estado atualmente aceito das disciplinas científicas. Para evitar esse tipo de efeito indesejável, Martins prescreve a necessidade de se “estudar o contexto, as bases experimentais, as várias alternativas possíveis da época, e a dinâmica do processo de descoberta (ou invenção), justificção e difusão de ideias.” (2006, p. xxiv-xxv). Ambos os autores nos alertam para o risco de se incorrer a anacronismos ou visões empírico-indutivistas ao abordar o passado das ciências em sala de aula. No texto de apresentação do livro *A Tensão Essencial*, Thomas Kuhn (2011 [1977]) relata o primeiro contato que teve com a Física Aristotélica, em 1947, quando foi convidado a participar de uma série de conferências sobre as origens da Mecânica Clássica. Em um primeiro momento, o autor confessa ter cometido anacronismos ao tentar ler a Física aristotélica tendo em mente os termos da mecânica newtoniana. Kuhn diz que abordou os textos de Aristóteles com duas questões em mente: “Quanto se conhecia da mecânica na tradição aristotélica? Quanto foi deixado para os cientistas do século XVII descobrir?” (KUHN, 2011 [1977], p. 11). Ao recordar de maneira autocrítica o início de

seus trabalhos como historiador da ciência, Kuhn nos traz um clássico exemplo de pensamento anacrônico. Ao tentar julgar o modo como a tradição aristotélica entendia o movimento dos corpos e suas causas sem se desvincular do sistema newtoniano, nem se abrir ao entendimento do abrangente sistema de mundo aristotélico, Kuhn compromete a qualidade de sua análise histórica. Fica interdita a possibilidade de se entender aquele sistema de pensamento segundo seus próprios princípios e critérios epistêmicos, tornando viciada e infrutífera sua apreciação.

Ao longo do curso de Gravitação, os alunos foram estimulados a prevenirem-se de fazer leituras sobre a ciência do passado com as “lentes” da ciência atualmente aceita. Além de as exposições das aulas abordarem a ciência do passado de maneira a evitar anacronismos, e buscando deixar claro em qual contexto intelectual e histórico está inscrito determinado sistema de pensamento, os alunos foram convidados a fazer por conta própria tal exercício. Foi o caso em uma das atividades semanais, durante a terceira semana do curso, dedicada ao sistema aristotélico do Universo. A equipe docente do curso propôs que os alunos escrevessem uma carta a Aristóteles, na qual buscassem convencê-lo sobre a inadequação de suas ideias. Para tal, os alunos tinham como base a aula online disponibilizada naquela semana e um texto didático de apoio sobre o sistema aristotélico, escrito pelo ministrante. Segue a proposta como foi apresentada aos alunos no moodle da disciplina:

Esta atividade pode ser realizada individualmente, em dupla ou em trio. Primeiramente leiam o texto 'O Cosmos Aristotélico' e, em seguida, respondam à questão apresentada abaixo. Imagine a seguinte situação. Você pôde realizar uma viagem no tempo e tem a oportunidade de conversar com Aristóteles durante uma hora. Sabendo que suas ideias sobre o Universo não são mais aceitas atualmente, o que você diria a ele para convencê-lo que não está correto? Destacamos que não vale argumentos de autoridade, do tipo 'já foi comprovado que a Terra não está no centro'. Ou, 'Galileu mostrou que .....'. Você precisa dar argumentos que possam fazer sentido a alguém da época!

Exercitar certo distanciamento histórico e conceitual para melhor apreender teorias do passado, e de forma a dialogar com elas, não é um esforço trivial. É necessário se despir dos aparatos conceituais aos quais se está acostumado (ou, pelo menos, deixá-los de lado por um tempo) e se propor a pensar por meio de uma lente conceitual estranha ao modo habitual de pensar. Por tais motivos, foi exigido que os alunos não utilizassem conhecimentos da ciência moderna, nem argumentos de autoridade. O exercício era se colocar como um interlocutor que

conversasse de maneira horizontal com Aristóteles, buscando compartilhar sua visão de mundo e critérios epistêmicos.

Apesar de desafiador, esse distanciamento é essencial para o estudo da História da Ciência. Durante a sétima semana do curso, na qual foi tratada a Revolução Copernicana e a perspectiva kuhniana sobre o desenvolvimento da ciência, foi proposta aos alunos e alunas outra produção textual com objetivo semelhante:

Copérnico, ao propor que a Terra não estaria no centro do Universo, deu início a um movimento intelectual revolucionário. Sobre isso, Arthur Koestler comenta: "O universo aristotélico era centralizado. Tinha um centro de gravidade, um núcleo sólido, ao qual se referiam todos os movimentos. Tudo quanto fosse pesado caía para o centro, tudo quanto fosse fluido como o fogo e o ar, tentava afastar-se dele; os astros, nem pesados, nem fluidos, e de natureza inteiramente diversa, moviam-se em círculos, em torno dele. Os pormenores do esquema podiam ser corretos ou errados, mas o esquema era simples, plausível e tranquilizadamente ordenado. O universo copernicano não somente se expande para o infinito, como também, ao mesmo tempo, é descentralizado, desconcertante, anárquico. Não possui centro natural de orientação a que se possa referir tudo. As direções para cima e para baixo não são mais absolutas, nem tampouco o são o peso e a fluidez. O peso de uma pedra significava antes, a sua tendência a cair para o centro da Terra: era o significado de gravidade. Agora o Sol e a Terra tornam-se centros de gravidade por conta própria. Já não há mais qualquer direção absoluta no espaço. O universo perdeu o núcleo, não tem um coração, tem milhares". Comente, na forma de um texto explicativo, as duas questões a seguir: I) Por que você acha que a visão de mundo decorrente das ideias de Copérnico foram polêmicas à época? II) Dê um exemplo de novo paradigma científico que possa ter causado um impacto cultural semelhante ao heliocentrismo. Imagine que o texto que irá redigir com base nestas duas questões irá compor um box de um livro didático [isto é, aqueles textos que ficam em destaque nos livros, nos quais desenvolvem um tópico específico do conteúdo tratado]. Redija um texto de no mínimo 20 linhas [times new roman, tamanho 12, margens laterais 3 cm, cerca de 250 palavras]. Isto é, redija o texto como se fosse uma

redação que deve contemplar o tema das duas questões. Não o elabore como se fosse uma resposta a uma prova objetiva (quando normalmente você só apresenta “a resposta direto”).

Nessa atividade, foi novamente exigido dos estudantes que se colocassem no lugar de um pensador do passado que, dessa vez, se confronta com uma nova visão de mundo que desafia os sistemas de crenças e conhecimentos vigentes. Sem esse esforço a atividade proposta perde o sentido. É interessante notar como a atividade procura estimular os alunos a reconhecerem que certos padrões do desenvolvimento científico do passado se repetem ao longo da história, como sugere Thomas Kuhn (2013 [1962]). Em seu modelo epistemológico, o estabelecimento de um paradigma ampara a ciência normal, a qual invariavelmente experimenta momentos de crise que desembocam em uma revolução científica. Por isso, foi pedido aos alunos que refletissem sobre qual outra grande mudança científica poderia representar semelhante impacto na cosmovisão científica e na cultura, de maneira geral, em relação ao que foi a Revolução Copernicana. Buscou-se inculcar nos alunos certo senso de simetria entre a dinâmica do desenvolvimento do pensamento científico de tempos remotos (séculos XVI e XVII) e da ciência mais próxima a dos nossos tempos. O item II desta atividade foi pensado para os alunos enxergarem semelhanças entre a natureza das mudanças científicas da época da Revolução Copernicana e as revoluções quântica e relativística no século XX. Essa simetria entre ciência do passado e ciência do presente (ou de um passado próximo) é particularmente necessária quando pensamos o problema da metaindução pessimista de Laudan e o *principle of no privilege* de Hesse (ver seção 2.3.3), que foram objeto de reflexão filosófica dos alunos nas atividades associadas à intervenção didática, como exporemos em breve.

À guisa de conclusão desta seção, exporemos mais uma das atividades cujo objetivo educacional foi exercitar a habilidade de se colocar dentro de um sistema de pensamento que não o seu. Dessa vez, buscando também incentivar a criatividade narrativa dos estudantes, foi proposto que eles escrevessem uma carta a Galileu e Kepler, tomando como ponto de partida trechos de cartas trocadas entre esses dois cientistas:

Carta a Kepler e Galileu. No final do século XVI poucas pessoas conheciam as ideias de Copérnico, mesmo que ele as tivesse publicado há quase 50 anos. Neste período – antes de escreverem suas principais obras – tanto Kepler quanto Galileu começam a defendê-las e trocam as seguintes cartas: No dia 4 de agosto de 1597, Galileu escreveu sua primeira carta a Kepler:

“Não recebi há alguns dias, mas apenas há algumas horas, meu culto doutor, o livro que me enviastes por intermédio de Paulus Amberger, visto que o mesmo Paulus me informou de seu regresso iminente à Alemanha. Seria um ingrato realmente se vos não agradecesse imediatamente. Aceito o vosso livro com tanto mais gratidão, pois o tenho por prova de ter sido considerado digno de vossa amizade. Até agora só corri os olhos pelo prefácio, mas adquirir com isso uma idéia do intento, e me congratulo por ter, no estudo da Verdade, um associado que é amigo da Verdade. É uma pena existirem tão poucos que persigam a Verdade e não pervertam a razão filosófica. Contudo, não cabe aqui deplorar as misérias deste nosso século e sim congratular-vos pelos brilhantes argumentos que apresentais em favor da Verdade. Só acrescentarei que prometo ler a obra tranquilamente, certo de nela descobrir as coisas mais admiráveis, e fa-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 inúmeros argumentos em apoio e 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, constitui ainda, para uma infinita multidão de outros, (que tal é o numero 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” Kepler responde a Galileu em 13 de Outubro de 1597: “Gratz, 13 de outubro de 1597. A vossa carta, meu excelentíssimo humanista, que me escrevestes em 4 de agosto, recebi-a em 1º de setembro, e me deu motivos para um duplo júbilo: primeiro, por simplificar o começo de uma amizade com um italiano; segundo, porque estamos de acordo quanto à cosmografia copernicana (...) Suponha que, se tivestes tempo, já travastes melhor conhecimento com o meu livrinho, e desejo ardentemente saber a vossa opinião crítica, pois é do meu feitio instar com todos aqueles a quem escrevo que me deem uma opinião franca, e, crede-me, prefiro a crítica mais acerba de um só homem iluminado ao aplauso insensato da multidão. Gostaria, entretanto que, pos-



suidor de tão excelente inteligência, assumisse uma posição diversa. Com os vossos hábeis modos sigilos sublinhais, com o exemplo, a advertência de que deveríamos recuar perante a ignorância do mundo, e não deveríamos levemente provocar a fúria dos professores ignorantes; a esse respeito seguis Platão e Pitágoras, os nossos verdadeiros mestres. Mas considerando que na nossa época, primeiro Copérnico, em imenso empreendimento, de modo que o movimento da Terra já não constitui nenhuma novidade, preferível seria que ajudássemos, com os nossos esforços, a empurrar para casa essa carruagem que já se movimenta (...) Não são apenas os italianos que se recusam a acreditar que se movem por nada sentirem; na Alemanha também não nos tornamos populares sustentando essas opiniões. Mas há argumentos que nos protegem em face de tais dificuldades (...) Comunicai-me, pelo menos em particular, se não desejais fazê-lo em público, o que descobristes em apoio a Copérnico (...)” Faça parte dessa discussão! Imagine que você vive à época e toma conhecimento da obra de Copérnico. Uma cópia das cartas trocadas por Kepler e Galileu chega a suas mãos, com um pedido desses dois pensadores para que exponha sua opinião sobre as ideias de Copérnico. Redija um texto que seja a carta a ser enviada a Kepler e Galileu. Os monitores da disciplina garantirão que chegará às mãos deles dois. <sup>3</sup>

Após deixar claro alguns dos objetivos e metodologias de ensino de História da Ciência na disciplina de Gravitação, relataremos o conteúdo das aulas da intervenção didática e as propostas de produções textuais que acompanharam as duas aulas que deram origem ao *corpus* de análise desta pesquisa.

### 4.2.3 A intervenção e as atividades

A intervenção que deu origem à parte empírica desta pesquisa de mestrado ocorreu no final do curso de Gravitação, durante a 15<sup>a</sup> e 16<sup>a</sup> semana de aula, e foi ministrada pelo orientador deste trabalho. Consistiu em duas aulas, a primeira abordando diversos aspectos da Teoria da Relatividade, desde seus fundamentos conceituais e antecedentes históricos, até seu impacto cultural e sua relação com o contexto histórico e social dentro do qual foi proposta. A segunda

---

<sup>3</sup>Textos retirados de ZANETIC (2017 [1995])

aula, mais próxima do episódio histórico apresentado no capítulo anterior, foi dedicada às relações entre a relatividade e a ótica do século XIX, e explorava o papel do éter nas investigações teóricas e experimentais sobre a velocidade da luz.

No início da primeira aula, intitulada “Einstein e a visão de mundo da Relatividade”<sup>4</sup>, foram recapituladas as concepções clássicas de espaço e tempo absolutos, assunto central durante a 12ª aula do curso. Foi enfatizada a independência ontológica entre essas entidades, bem como a importância da adoção de referenciais para a descrição do movimento. Foi retomada a forma galileana de transformação de coordenadas que, mais adiante, foi contrastada com as transformações de Lorentz. Resgatados esses importantes conceitos básicos, a aula foi encaminhada a uma exposição histórica e conceitual sobre problemas do eletromagnetismo que antecederam a relatividade. Mais especificamente, tratou-se do paradoxo apresentado na seção 3.10.1, sobre a assimetria envolvendo a indução eletromagnética e a força de Lorentz para explicar a condução de corrente em um condutor que se move em relação a um ímã, ponto de partida do famoso artigo de Einstein de 1905 sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento. Em seguida foram apresentados os dois postulados da relatividade restrita e suas consequências, como a quebra da simultaneidade, as transformações de Lorentz e a emergência de grandezas físicas quadridimensionais.

A relativização do espaço e do tempo, e o caráter absoluto e invariante das quadridistâncias, fez a ponte entre a etapa mais histórica e conceitual da aula, e uma parte na qual se privilegiou indagações filosóficas sobre a interpretação dessa teoria. Fazendo referência a obra *Histoire du principe de relativité*, da filósofa e historiadora M. A. Tonnelat (1971), e à dissertação intitulada *Interpretando a relatividade especial: discutindo o debate realismo e antirrealismo científicos no ensino de ciências*, de Moreira (2014), o ministrante expôs duas interpretações filosóficas da relatividade: a realista e a positivista.

Segundo a interpretação realista, a realidade do espaço-tempo não se apresenta aos nossos sentidos, que são mais solidários a uma concepção clássica da estrutura espaço-temporal. Em geral, uma interpretação realista considera que grandezas observáveis de comprimento e duração temporal são, de certa maneira, mutiladas da realidade, uma vez que são medidas associadas a uma grandeza realmente objetiva: o invariante relativístico. Munido da compreensão de que a realidade objetiva não pode mudar conforme muda o observador, como acontece no caso

---

<sup>4</sup>O slides da aula se encontram no Apêndice C.

de medidas de espaço e tempo, a interpretação realista da relatividade atribui realidade àquela grandeza que não depende de qualquer estado de movimento de um referencial. Assim, a realidade do mundo seria, de fato, quadridimensional, pois apenas grandezas quadridimensionais têm essa propriedade.

De acordo com a interpretação positivista da relatividade, apenas se poderia atribuir realidade às grandezas que são de fato mensuráveis. Segundo essa interpretação, é possível falar sobre a realidade, mas apenas sobre realidades verificáveis observacionalmente. No caso, as medidas de espaço e tempo seriam o único aspecto da teoria que podemos confiar que versa sobre a realidade. Pode ser feita referência a objetos não observáveis como as grandezas quadridimensionais, porém apenas de uma maneira instrumental, como meio para realizar cálculos e previsões, sem o comprometimento de que representações em quatro dimensões se refiram ao mundo real, mesmo que de maneira aproximada, como o realista geralmente assume.

A última parte da aula foi dedicada a uma apreciação histórica contextualista do surgimento da relatividade baseada no livro *Os relógios de Einstein e os mapas de Poincaré*, de Peter Galison (2003). A obra constrói uma história contextual das origens da teoria, mostrando como o contexto social, político e tecnológico na Europa se relacionava com questões muito próximas ao conteúdo da teoria: ao final do século XIX, a Europa passava por processos de unificação territorial por linhas férreas e, também, de modernização das cidades, o quais foram impulsionados pela segunda revolução industrial e pelos avanços teóricos e tecnológicos do eletromagnetismo. Essas duas demandas impunham a necessidade de uma espécie de “domesticação do tempo”, uma vez que a integração ferroviária exigia uma fina sincronização de relógios em diferentes estações. O problema que se colocava era: como saber se dois relógios distantes um do outro estão sincronizados? Como sincronizá-los? Para tal tarefa se buscavam formas mais precisas de sincronização do que os antigos métodos que utilizavam dutos pneumáticos. Sinais telegráficos logo foram empregados para a investigação e construção de soluções desse problema. Entretanto, outro problema se impunha: como saber o tempo que um sinal elétrico leva para chegar de um ponto a outro, e fazer o caminho de volta? O movimento da Terra influencia o intervalo de tempo? Lembremos que, à época, os sinais elétricos e luminosos ainda eram entendidos como ondulações no éter e as querelas sobre a influência do movimento da Terra em relação ao éter ainda eram problemas teóricos relevantes; nesse caso, portanto, também tinham consequências práticas e técnicas. A obra de Galison, abordada em aula, revela que a proposição da Teoria da Relatividade, muitas vezes vista como um esforço intelectual puramente abstrato e distante dos

problemas mais práticos, estava, na verdade, bastante imbricada no seu contexto político, social e cultural.

A segunda aula<sup>5</sup> guardou relações mais diretas com o episódio histórico estudado nesta dissertação. No início da aula foram retomados alguns aspectos conceituais e formais da Relatividade Restrita, como os papéis desempenhados na teoria pelo fator gama e os dois postulados de Einstein. Como já comentado na seção 3.10.1, os dois postulados tornaram, segundo Einstein, obsoleta a necessidade teórica de um substrato que representasse o espaço absoluto. Como exposto nas seções 3.9.3 e 3.9.4, a crise da visão de mundo mecanicista e a desmecanização do éter já abriam as portas para a independência ontológica do campo eletromagnético, tornando-se, então, uma entidade física primária e independente de supostas reduções mecânicas. Einstein, ao dispensar a necessidade do éter, retirou suas funções no universo newtoniano: ser o suporte mecânico da propagação da luz e de influências eletromagnéticas, e seu papel de substancialização do espaço absoluto. Ambas as funções foram bastante enfatizadas na aula, bem como o fato de Einstein ter, de certa forma, retirado o problema da existência e necessidade do éter do *hall* de preocupações da física teórica.

Após essa introdução e revisão de conteúdos da aula anterior, o ministrante entrou no tema principal da aula, isto é, a proposição da Relatividade pelo itinerário histórico das tentativas de medição da velocidade da luz em relação ao movimento da Terra pelo éter. Não raro em livros-texto, a história da proposição da relatividade e da eliminação do éter é resumida à realização e aos resultados dos experimentos de Michelson e Morley. Esta narrativa histórica é bastante contestada por ignorar tentativas de detecção do movimento da Terra antes desses experimentos (MARTINS, 2012). Além disso, recai-se em uma visão empírico-indutivista sobre o episódio em questão ao insinuar que houve um *experimentus crucis* que refutou, de uma só vez, as teorias do éter, o que não se sustenta mediante uma análise histórica um pouco mais rigorosa. Por esses motivos, o ministrante iniciou a exposição do episódio histórico relativizando a importância do experimento. Porém, como foi desenvolvido ao longo da aula, foram abordadas as motivações que precederam o experimento. Buscamos deixar claro o que se perseguia com os experimentos ópticos, como os de Michelson e Morley, e também outros experimentos como as observações astronômicas realizadas por Arago em 1810. O problema, como colocado em aula, foi o seguinte: caso exista o espaço absoluto, substancializado pelo éter, deve ser pos-

---

<sup>5</sup>Os slides da aula se encontram no Apêndice D.

sível evidenciá-lo; além disso, o éter é a substância responsável pelo transporte das vibrações luminosas através do espaço; logo, se a Terra se move no espaço, deve ser possível detectar seu movimento relativo ao éter por meio de experimentos ópticos.

Essa problemática foi o ponto de partida do percurso histórico narrado ao longo da aula, bastante baseado nos estudos realizados para a escrita do Capítulo 3. A querela sobre o movimento da Terra motivou a exposição sobre as observações de Bradley (da aberração estelar e da constância do ângulo de aberração) como um episódio precursor da celeuma ótica e das controvérsias sobre a ótica dos corpos em movimento. Foram discutidas, com bastante detalhes, as motivações e conteúdo da teoria de Fresnel para o arraste parcial do éter, bem como sua corroboração experimental pelo experimento de Fizeau de 1851, e sua semelhança estrutural com a cinemática relativística. No encerramento da aula, o ministrante antecipou questões relacionadas à atividade que seria realizada pelos alunos: por um lado, a teoria do éter parcialmente arrastado parece absurda sob o olhar da física atualmente aceita, ao fazer referência a uma entidade abandonada e a um mecanismo *ad hoc* baseado em uma visão mecanicista de mundo; por outro lado, seria justo desprezar a validade de sua hipótese de arrastamento e sua relevância naquele contexto histórico? Buscamos deixar claro que a hipótese do arrastamento foi objeto de debates entre cientistas da época e a manutenção do coeficiente obtido por Fresnel era vislumbrado em teorias óticas futuras (ver seção 3.8). Em outras palavras, em que medida Fresnel estava correto ao propor o arrastamento parcial do éter?

Como de praxe no curso de Gravitação, após cada uma dessas aulas foi proposta aos alunos uma atividade escrita obrigatória. Ambas as atividades tinham como objetivo estimular os estudantes a pensarem sobre os limites da continuidade e da cumulatividade do conhecimento científico em dois sentidos diferentes: a primeira apontava para rupturas em nível teórico, enfatizando as diferenças entre as imagens de mundo clássica e relativística, enquanto a segunda fez referência a descontinuidades no nível das entidades associadas às teorias físicas. Ambas buscam emular o dilema da metaindução pessimista: qual implicação das mudanças científicas no estatuto ontológico e epistemológico da ciência? Os enunciados das atividades foram os seguintes:

- **Enunciado da Atividade A: Mecânica x Relatividade**

No sistema da física newtoniana, o espaço e o tempo eram consideradas entidades absolutas e independentes entre si. O espaço se parecia com um grande palco preenchido pelos objetos e fenômenos físicos. O tempo, cujo padrão

dos tic-tacs era único e invariável, ditava o ritmo dos acontecimentos que no espaço ocorriam.

Já na concepção relativística outro paradigma se estabelece. Espaço e tempo estão intimamente imbricados e as medidas de distância e duração podem variar de acordo com o observador. Com base na aula sobre Relatividade, nos seus conhecimentos e nestes apontamentos, construa um texto de 500 a 800 palavras que busque refletir sobre as seguintes questões:

Podemos dizer que, por séculos, os cientistas estavam fundamentalmente enganados sobre a natureza do espaço e do tempo? Ou será que, em alguma medida, estavam corretos em considerá-los absolutos? Você acha que os atuais conceitos e teorias científicas serão abandonados no futuro? Ou existe neles algum "conteúdo verdadeiro", que deve sobreviver ao tempo?

- **Enunciado da Atividade B: Éter e Mudanças na Ciência**

A física contemporânea se utiliza de uma diversidade de objetos teóricos inobserváveis para se referir ao mundo natural, essenciais à nossa atual imagem científica de mundo. Dentre estes objetos podemos falar dos elétrons, quarks, matéria escura, radiações eletromagnéticas, entre muitos outros.

Durante a aula desta semana tratamos sobre uma entidade teórica que não compõe mais nossa visão de mundo, o éter, mas cuja importância para a física do século XIX é comparável à importância que as entidades como as citadas acima desempenham na física atual. Por mais que o éter tivesse centralidade na física teórica e experimental da época, aos poucos sua existência foi sendo questionada, até que teve o destino de várias outras entidades da ciência do passado, como o calórico, o flogisto, as esferas cristalinas, sendo descartado.

Com estes apontamentos em mente, e com base nos seus conhecimentos, na aula desta semana e no texto “O éter na física do século XIX”, construa um texto de 500 a 800 palavras que busque refletir sobre as seguintes questões:

Os objetos aos quais a ciência se refere (como o átomo) realmente existem na natureza? A ciência é capaz de “pintar o mundo” como ele realmente é, ou pelo menos, pintá-lo de maneira cada vez mais fiel? Ou será que a imagem de mundo que temos será radicalmente alterada, como já aconteceu tantas vezes no passado?

O objetivo por trás de ambas as atividades era incutir reflexões sobre o realismo científico e analisar como os estudantes articularam seus conhecimentos para tecer um breve texto argumentativo que abordasse as controvérsias filosóficas presentes em seus enunciados. Para a Atividade A, foi disponibilizada apenas a videoaula daquela semana. Já para a Atividade B, além da videoaula, foi disponibilizado também um texto paradidático produzido pelo proponente da pesquisa (Apêndice E), abordando as origens históricas do conceito de éter, seu papel para a ótica e para a física teórica do século XIX de maneira geral, e seu eventual abandono no contexto da crise da visão mecânica de mundo.

A primeira atividade buscava uma reflexão mais orientada para a dimensão epistemológica do realismo, que abrange questões como: podemos conhecer o mundo natural?; é possível construir conhecimentos sobre o mundo que possam ser considerados corretos ou verdadeiros?; teorias que foram abandonadas são capazes de gerar conteúdos verdadeiros sobre o mundo natural? A segunda atividade foi orientada para a dimensão ontológica do realismo científico: as entidades teóricas da ciência podem ser consideradas reais?; a imagem de mundo construída pela ciência converge progressivamente à imagem real das coisas em si?; as mudanças científicas que ocorreram ao longo da história da ciência minam a confiança que podemos ter sobre as entidades da ciência contemporânea?

Em suma, nossos esforços foram dirigidos para levar um debate epistemológico específico (mudança científica e sua relação com o realismo científico) para um curso de formação de professores. O debate foi contextualizado em um episódio histórico, abordado em detalhes em sala de aula. As questões motivadas pelas aulas que abordaram o episódio exigiram explicitamente uma tomada de posição dos alunos sobre temas caros ao realismo científico: tanto a relação entre ciência e verdade, quanto entre teoria e realidade, bem como continuidades e rupturas na ciência. Atividades orientadas por questões abertas, inspiradas pela sugestão de Martins (2015), foram escolhidas para criar um terreno fértil para que os estudantes pudessem se posicionar de maneira autêntica e diversa, incentivando um pluralismo de atitudes filosóficas sobre o tema em questão.

As próximas seções serão dedicadas a explicar como foi empregado o referencial metodológico da análise textual discursiva (MORAES, 2003), base para a realização da análise da produção dos participantes voluntários da pesquisa, além de apresentar os resultados da análise.

## 4.3 Metodologia e análise de dados

### 4.3.1 O referencial metodológico da análise textual discursiva

A metodologia escolhida para fundamentar a análise qualitativa da produção dos estudantes foi a análise textual discursiva, proposta e sistematizada por Moraes (2003). Um aspecto interessante sobre esse referencial metodológico é o fato de ele não lidar com testagem de hipóteses, mas com a compreensão de fenômenos. No caso desta pesquisa, o fenômeno em questão foi gestado durante as duas aulas descritas na seção anterior, juntamente com a proposição das atividades escritas, e concretizado com as produções textuais, frutos das aulas e das indagações filosóficas presentes nos enunciados das propostas. Esse conjunto de produções integra o *corpus* de análise, ou seja, a matéria-prima do estudo. Não iniciamos a pesquisa de campo, nem a análise dos dados, com hipóteses formuladas de antemão sobre o posicionamento epistemológico dos participantes. Pelo contrário, abrimo-nos para um tipo de análise que busca a compreensão dos fenômenos por meio da atribuição de sentidos e significados das linhas argumentativas dos voluntários.

O emprego da análise textual discursiva não dá origem a resultados objetivos, mas sim qualitativos, nos quais a subjetividade do proponente e seus referenciais teóricos desempenham papel decisivo na atribuição de sentido do *corpus*. Segundo explica Moraes, a análise envolve o esforço de encontrar sentidos que vão além dos conteúdos explícitos e denotativos dos textos do *corpus*. Ao adotar tal metodologia, o proponente busca encontrar e construir sentidos que se encontram nas entrelinhas, sentidos latentes não facilmente perceptíveis a qualquer leitor, tendo uma dimensão conotativa.

A subjetividade do proponente da pesquisa e os subsídios teóricos que balizam sua análise são características fundamentais desse tipo de metodologia. O pesquisador torna-se o principal construtor dos sentidos e das interpretações do *corpus*, um objeto cujo sentido não é estático nem absoluto. Nas palavras de Moraes (ibid., p. 194), “os textos não carregam um significado a ser apenas identificado; são significantes exigindo que o leitor ou pesquisador construa significados com base em suas teorias e pontos de vista”. O mesmo *corpus* de análise pode ser uma fonte inesgotável de interpretações e significados, uma vez que a capacidade criativa do analista, que deve colocar-se como autor das próprias leituras, é peça-chave para o bom andamento da pesquisa.

Moraes explicita as etapas dentro das quais se dá análise textual discursiva: *unitariza-*



ção, categorização e comunicação, que serão detalhados a seguir. Apesar de contar com uma sequência recursiva bem definida, os potenciais caminhos abertos pela análise são múltiplos e, a princípio, não se sabe de antemão o ponto de chegada. Nas palavras de Moraes e Galiazzi:

A análise textual discursiva mais do que um conjunto de procedimentos definidos constitui metodologia aberta, caminho para um pensamento investigativo, processo de colocar-se no movimento das verdades, participando de sua reconstrução. (MORAES & GALIAZZI, 2006, p. 119).

#### • Desmontagem/desconstrução dos textos

O primeiro passo para a elaboração de novos sentidos ao *corpus* é a desmontagem e unitarização dos textos. Esse é, fundamentalmente, um processo de desorganização do *corpus*, que se dá pela escolha de unidades de análise. Tais unidades, que consistem em trechos dos textos a serem analisados e posteriormente categorizados, são selecionados tendo em vista os objetivos de pesquisa do proponente. As unidades de análise são, portanto, manifestações do fenômeno que busca-se estudar, cuja relevância depende do julgamento do pesquisador.

É importante que o proponente crie códigos de identificação das unidades de análise, fazendo referência a qual documento do *corpus* aquela unidade pertence. No nosso caso, cada documento do *corpus* ganhou um código de identificação e a cada unidade foi conferida uma numeração, cujo prefixo faz referência ao seu documento de origem.

O processo de fragmentação dos textos a partir da seleção das unidades deve levar o *corpus* original a um estado de desorganização e “caos”. Segundo Moraes (ibid.) e conforme pudemos constatar, a emergência de novos significados depende fortemente do estabelecimento dessa desordem e fragmentação. Mas, para tal, é imprescindível que o pesquisador justifique a escolha de suas unidades de análise, buscando criar pequenos textos que busquem atribuir potenciais sentidos que aquela unidade pode adquirir. Além disso, a posterior análise e categorização das unidades é facilitada mediante a atribuição de uma ideia central, um título, que sintetize o porquê de sua escolha e sua relevância dentro do contexto de produção.

A partir da criação, identificação e seleção de unidades de significados, inicia-se um lento processo de surgimento de novos significados. Essa identificação dá-se ao longo de um árduo e contínuo e repetitivo processo de imersão do pesquisador em seu *corpus* de análise.

Conforme multiplicam-se as unidades, começam a emergir suas possíveis categorizações. A proposição das categorias pode acontecer *a priori*, ou seja, antes do início efetivo das análises, e baseado nos subsídios teóricos da investigação. Porém, é comum a emergência de categorias de análise insuspeitas ao pesquisador em primeiro momento. Aos poucos, o caos gerado pela fragmentação começa a se diluir com a emergência de novos significados e uma nova ordem, que começa a ser estruturada pelo processo de *categorização*.

- **Categorização**

Em um intenso processo de impregnação do pesquisador em seus elementos de análise, é realizada a comparação constante entre as unidades definidas no processo de unitarização, agrupando, dessa forma, os elementos semelhantes. É com o surgimento gradual das categorias de análise que começam a se estabelecer - e ficar claras - as relações entre as unidades de análise. Moraes ressalta que é possível que se crie diferentes níveis de categorização, como subcategorias, ou a organização por classes de categorias. “Por meio do retorno cíclico aos mesmo elementos”, a definição das categorias e grupos de categorias vai se tornando cada vez mais precisa (MORAES, 2003, p. 197), sendo um processo de invenção e reinvenção.

A produção das categorias pode dar-se por um *método dedutivo* alimentado pela teoria que fundamenta a pesquisa. As categorias formadas dedutivamente organizam as unidades de análise, formando um agrupamento “*a priori*”. Isso ocorre quando o próprio subsídio teórico da pesquisa permite de antemão a dedução de categorias de análise.

O autor ressalta também a importância e possibilidade de surgimento de categorias via *método indutivo*. As categorias podem ser obtidas por indução ao emergirem dos contrastes entre as unidades de análise, revelando semelhanças e diferenças entre os elementos. Nesse caso, as categorias emergem com base no conhecimento tácito do pesquisador e formulam-se partindo do particular (as unidades de análise) para o geral (as categorias). Ao contrário do *método dedutivo*, o qual busca estabelecer a ordem partindo do geral ao particular, as categorias induzidas são emergentes, “construções teóricas que o pesquisador elabora a partir das informações do *corpus*” (ibid, p. 198).

Moraes frisa que as categorias não carregam a propriedade de serem mutuamente exclusivas. Uma mesma unidade de análise pode encaixar-se em mais de uma categoria, distanciando a análise textual discursiva das tradicionais análises de conteúdo, na quais

são exigidos critérios de exclusão mútua, opondo-se a uma visão reducionista segundo a qual o conteúdo das unidades poderia ser esgotado pela sua classificação. O tipo de análise que o autor propõe pressupõe que a mesma unidade de análise pode ser lida por diferentes perspectivas:

Mesmo que nas formas mais tradicionais de análise de conteúdo se exija que um mesmo dado seja categorizado em uma única categoria, o critério da exclusão mútua, entendemos que esse critério já não se sustenta frente às múltiplas leituras de um texto. Uma mesma unidade pode ser lida de diferentes perspectivas, resultando em múltiplos sentidos, dependendo do foco ou da perspectiva em que seja examinada. Por essa razão, aceitamos que uma mesma unidade possa ser classificada em mais de uma categoria, ainda que com sentidos diferentes. Isso representa um movimento positivo no sentido da superação da fragmentação, em direção a descrições e compreensões mais holísticas e globalizadas. (MORAES, 2003, p. 199).

Ao longo do processo de categorização, vai se dispersando o estado caótico e desordenado que a fragmentação e unitarização lhe impuseram. As partes e sua organização, cada vez mais, vão dando forma a novas perspectivas de significação do *corpus*. Essa dispersão da desordem depende do esforço do pesquisador em estruturar e redigir argumentos que justifiquem a proposição das categorias, tornando explícito os *insights* que motivaram sua construção. Os argumentos que fundamentam as categorias, e a maneira como elas são subdivididas, devem ter um efeito aglutinador, mostrando como a unidade se expressa no meio da diversidade.

Durante a construção dos argumentos qualitativos que fundamentam as categorias, deve-se formar hipóteses de trabalho que iniciam o processo de estabelecimento de pontes entre as categorias que organizam as unidades de análise. A construção dessas relações visa a criação de um *metatexto*, ou seja, um novo texto cujos sentidos não se resumem ao conjunto inicial de documentos e que emerge da intensa interação entre o pesquisador e o *corpus*. Novamente, os esforços argumentativos do proponente o guiarão à construção de argumentos aglutinadores que, dessa vez, darão sentido e estabelecerão as conexões entre as categorias. Esses argumentos descritivos-interpretativos devem dar coesão ao metatexto, de forma que emerja um novo sentido do todo e o sistema se auto-organize de

maneira quase espontânea.

- **Emergência do novo: Construção do metatexto**

Em última análise, todos os esforços envolvidos na análise textual discursiva desembocam na construção de um metatexto que expressa “os sentidos lidos em um conjunto de textos” (ibid. p. 202), de modo a criar uma nova compreensão do *corpus* e do fenômeno de interesse do pesquisador. O metatexto é gestado desde o processo de justificação da unitarização, da separação das unidades de análise em categorias, até o estabelecimento de pontes entre as diferentes categorias. O desafio do pesquisador, segundo Moraes (2003, p. 201-2), é conseguir tecer “argumentos centralizadores”, ou “teses parciais” para cada categoria, enquanto elabora uma “tese” ou “argumento central”. Assim, mediante um processo de escrita e reescrita, os textos parciais que tinham a função de dar fundamentação descritiva-interpretativa às categorias podem ser adaptados de maneira a integrar e estruturar o metatexto.

Um olhar abrangente tanto do material analisado, quanto do material já produzido pelo pesquisador, deve permitir um novo processo de aglutinação dos argumentos parciais em torno do argumento central como uma última etapa para a superação da fragmentação iniciado na fase de desconstrução do *corpus*. Nas palavras de Moraes (ibid. p. 203): “A tese geral servirá de elemento estruturador e organizador de todos os elementos componentes do texto, permitindo não apenas fugir da excessiva fragmentação, mas também possibilitando ao pesquisador assumir-se efetivamente autor de seu texto”.

Em última instância, a construção do metatexto é um exercício de comunicação das compreensões e interpretações originais que emergiram ao longo do processo de análise. Alcançar este tipo de compreensão inédita sobre um conjunto de textos é um processo que envolve ciclos de reiteração e reconstrução, nas palavras de Moraes (ibid. p. 209), formando um processo vivo de interação entre o pesquisador e seu objeto de análise. O caráter imprevisível e o “movimento gradual e tateante” (MORAES & GALIAZZI, 2006, p. 119) da análise pode gerar incertezas e inseguranças, como relatado por alunos de mestrado (ibid.). Mas a insistência na metodologia, a intensa imersão do pesquisador nos dados coletados e o contínuo exercício da escrita do metatexto geram resultados inesperados que emergem como se a interação entre o proponente e seu objeto de pesquisa se comportassem como um fenômeno complexo e auto-organizado. Na metáfora escolhida

por Moraes (2003), a análise textual discursiva se assemelha a uma grande tempestade, na qual, em primeiro momento, só se reconhece o caos e a desorganização das gotículas de água e das cargas elétricas, mas que, eventualmente, dá origem a aos raios, que iluminam o todo em uma grande “tempestade de luz”.

Na próxima seção, relataremos como foi coletado o *corpus* de análise e o perfil dos participantes voluntários.

### 4.3.2 Participantes e o *Corpus* de análise

Como já explicado na seção 4.2.3, o *corpus* de análise foi integrado por duas produções textuais diferentes, propostas em duas semanas consecutivas e realizadas pelos alunos ao fim do curso de Gravitação. A disciplina foi oferecida no segundo semestre de 2020 à Licenciatura em Física<sup>6</sup>, e parcela considerável da turma era composta por calouros. Como o curso foi ministrado de forma remota e assíncrona, devido à pandemia de COVID-19, as turmas das duas licenciaturas realizaram o mesmo curso, o que não acontece em condições normais de oferecimento. No total, havia 164 alunas e alunos formalmente matriculados na disciplina. Destes, apenas 45 realizaram pelo menos uma das duas atividades associadas à intervenção didática<sup>7</sup>.

Após a realização e avaliação de ambas as atividades, o proponente da pesquisa enviou um e-mail aos 45 estudantes que haviam efetuado a entrega, convidando-os a participar, de maneira voluntária, da pesquisa de campo em questão. Para que a produção dos alunos pudesse ser utilizada como fonte de dados, o proponente formulou um Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, buscando se alinhar com as melhores práticas de ética em pesquisa em educação (ANPEd, 2019). O termo pode ser lido no Apêndice B.

Com intuito prover o máximo de informações possível aos alunos logo no primeiro contato, foram adiantados os principais pontos do termo no corpo do e-mail, importantes para que os estudantes tomassem uma decisão informada. Consideramos que essa estratégia facilitaria

---

<sup>6</sup>A matrícula estava aberta também para alunos fora do curso de Licenciatura em Física. Houve quantidade significativa de alunos da Licenciatura em Matemática que se matricularam. Entretanto, a grande maioria dos alunos eram do curso de Física.

<sup>7</sup>Cabe aqui explicar a adesão baixa a essas atividades. Ao longo de todo o curso, houve um total de 17 atividades semanais. Destas 17, os alunos tinham a obrigação de realizar pelo menos 10. Em outras palavras, dentre as 17 atividades, a média desta frente de avaliação seria dada pelas 10 melhores notas. Ao final do semestre, quando foi realizada a intervenção, muitos dos alunos já não dependiam da realização das últimas tarefas do curso para obter a aprovação, o que explica a baixa adesão.

a comunicação, aumentando as chances de conseguirmos uma quantidade considerável de material para a análise. Foram ressaltados os seguintes aspectos do Termo: “1) A participação ou não na pesquisa não terá qualquer relação com a avaliação no curso de Gravitação. Não haverá recompensas como acréscimo de notas, ou algo do gênero, aos participantes que consentirem, muito menos punições aos que declinarem o convite; 2) A identidade e identificação dos participantes será **rigorosamente sigilosa**. Não serão divulgadas ou publicadas **quaisquer informações pessoais** que possam tornar possível a identificação dos participantes, garantindo total confidencialidade; 3) Os dados e resultados desta etapa da pesquisa se tornarão públicos quando a dissertação resultante estiver disponível virtualmente no banco de teses da USP ou fisicamente na biblioteca do Instituto de Física. Reforçamos que, apesar disso, **não serão divulgados quaisquer dados pessoais dos participantes, mantendo sua identidade em sigilo**; 4) A referência aos autores dos textos analisados (ou seja, o nome dos/as participantes) serão substituídos por números ou pseudônimos. Caso seja escolhida a segunda opção, o pseudônimo pode ser negociado com o/a participante; 5) Todo e qualquer participante que consentir em ceder os textos para análise tem o direito mudar de ideia e retirar sua anuência, sem quaisquer consequências negativas ou represálias por parte dos pesquisadores; 6) Reforçamos que a participação de vocês nos ajudará muito, trazendo benefícios não só à realização da pesquisa e para a linha de pesquisa em História e Filosofia da Ciência no Ensino, mas também aos próprios participantes.”

No corpo do e-mail constava também um *link* que os direcionava a um “*Google Forms*”, contendo a íntegra do “Termo de Consentimento Livre e Esclarecido” e um conjunto de perguntas objetivas sobre os participantes. Além de perguntar se o estudante concordava com o termo, foram coletadas informações básicas e obrigatórias sobre os voluntários, como nome, data de nascimento, curso e ano de ingresso na graduação. Havia dois campos de preenchimento optativo no formulário: sugestão de pseudônimo do voluntário e um espaço para que os alunos deixassem seu endereço de e-mail, caso tivessem interesse em receber uma cópia digital da dissertação para ter contato com os resultados da pesquisa na qual estavam implicados.

Dos 45 estudantes que realizaram pelo menos uma das atividades da intervenção e que receberam o convite de participação voluntária, apenas 10 responderam o formulário<sup>8</sup>, todos

---

<sup>8</sup>Apesar de os textos efetivamente utilizados na pesquisa serem minoria dentre todos os textos realizados, consideramos que eles representam bem desempenho geral dos alunos. Notamos certa homogeneidade na qualidade do texto entregues, de forma que aqueles que integraram o *corpus* são uma boa representação do todo.

autorizando a utilização de seus textos. Destes, oito haviam ingressado na graduação naquele ano, em 2020. Dois ingressaram em 2019. Oito deles cursavam a Licenciatura em Física e dois Licenciatura em Matemática. Os voluntários tinham entre 18 e 26 anos, sendo que mais da metade dos participantes (seis deles) tinham 20 anos ou menos. Nove deles manifestaram interesse em receber uma cópia da pesquisa e oito sugeriram seu pseudônimo, todos acatados pelo proponente. Do ponto de vista do percurso formativo, o grupo de participantes é bastante uniforme, já que todos se encontravam no primeiro ou segundo ano da Licenciatura.

Apesar de a adesão ter sido menor do que esperávamos, a quantidade de material coletado foi suficiente para a realização da análise. No total, 17 textos integraram o *corpus*. Nove deles referentes à Atividade A e oito à Atividade B. A disparidade se dá pelo fato de que nem todos os voluntários haviam realizado ambas as atividades.

Na seção seguinte, serão comunicados os resultados da análise textual discursiva e será dividida em duas partes: o percurso do estabelecimento das categorias e o metatexto.

## 4.4 Análise dos dados e Resultados

### 4.4.1 Estabelecimento das categorias

Antes de comunicarmos o metatexto resultante da análise textual discursiva, é relevante darmos alguns detalhes sobre o processo de estabelecimento das categorias e subcategorias de análise. A justificação de tais categorias será auxiliada com o uso de excertos do *corpus*, que serviram de exemplos para sua caracterização.

O objetivo da pesquisa, como já comentado anteriormente, era induzir reflexões sobre aspectos não-consensuais da Natureza da Ciência relacionados às implicações da mudança científica no debate sobre o realismo científico. As atividades foram formuladas de maneira a incentivá-los a se posicionarem sobre suas percepções a respeito dos elementos de continuidade e descontinuidade do conhecimento científico e sua relação com o Real. Considerando tais objetivos, foram estabelecidas duas categorias *a priori* orientadas pelas discussões teóricas presentes nesta dissertação: a primeira categoria idealizada refere-se ao espectro de posições subjacentes ao debate do realismo científico; a segunda categoria faz referência ao eixo que contempla argumentos que destacam elementos de continuidade ou descontinuidade na construção do conhecimento científico. Ao longo da análise, ambas as categorias foram complexificadas *a posteriori*, contando com subcategorias e intersecções entre elas. As intersecções foram fundamentais para caracterizar os argumentos dos participantes.

A categoria denominada Realismo Científico abrange duas subcategorias. Uma delas chamamos de Críticas ao Realismo. Essa subcategoria é referente a posições que apontam para os limites do realismo científico, ou formas mais ingênuas de realismo. Em geral, buscavam defender a visão de que as relações entre os construtos teóricos e a realidade à qual eles se referem dão-se de maneira indireta. Nela mostraram-se presentes tanto posições antirrealistas no domínio das entidades, quanto posições que procuravam deixar explícita a dimensão construtiva e, em alguma medida, artificial das entidades e sistemas teóricos da Física. Consideramos que essa subcategoria é bem exemplificada pelas pertinentes colocações feitas pelo participante citado a seguir:

Dizer se o átomo realmente existe ou não é uma pergunta que pode ter múltiplas respostas, mas a melhor, pelo menos em minha opinião, é que sim, ele de fato existe, mas a sua existência não é concebida como algo real, mas sim, algo criado por nós. O átomo apenas existe na medida em que é uma representação, mas ele não é o próprio objeto ao qual nomeamos de “átomo”, sendo as duas coisas completamente diferentes, mas que, ao mesmo tempo, estão relacionados um com o outro. (Teodorov, Atividade B)

Essas linhas argumentativas carregam grande criticidade sobre a dinâmica de construção do conhecimento científico, sobre as relações entre conhecimento científico e realidade concreta, e sobre o papel das entidades teóricas na Física, como desenvolveremos na próxima seção.

A categoria Realismo Científico conta com outra subcategoria que denominamos Posturas Realistas. As unidades de análise que a integram contam com defesas mais contundentes de posições realistas. Estas posturas não se diferenciam das Críticas ao Realismo por serem acrílicas a respeito das relações entre teoria e realidade, mas são marcadas, em geral, pela adoção do realismo de entidades:

Os átomos realmente existem na natureza e com os aceleradores de partículas conseguimos entender muito mais sobre eles. Conforme a ciência avança, vamos cada vez mais conhecendo os pequenos detalhes dessa unidade básica de matéria. Passamos por diversos modelos atômicos, desde uma bolinha maciça proposta por Dalton, até o modelo atual, com subdivisões como os prótons, neutros [*sic*], glúons, quarks, etc. Acredito que não iremos parar por aí, acredito que não está consolidado em escalas



menores o que é um átomo e os elementos que o compõe [*sic*], acredito que a ciência ainda tem muito a descobrir sobre esse pequeno “objeto”. (Maristela Leite, Atividade B)

Nesse trecho a autora torna bastante explícita uma defesa mais enfática do estatuto ontológico dos inobserváveis, além de mostrar otimismo a respeito da possibilidade de progresso na ciência em direção a uma imagem científica cada vez mais sofisticada e profunda da realidade. Ficam claros os valores epistêmicos realistas, o que justifica o estabelecimento da subcategoria.

A segunda categoria definida *a priori*, chamada de Continuísmo/Descontinuísmo, foi desmembrada em uma quantidade maior de subcategorias, se comparada com a categoria Realismo Científico. Considerando as unidades de análise que valorizavam mais os aspectos contínuos e cumulativos da ciência, foram criadas duas categorias: Continuísmo Histórico e Continuísmo Formal/Estrutural. Como argumentaremos na próxima seção, os argumentos presentes nas unidades de análise que compõem a subcategoria Posturas Realistas também foram considerados de tendência continuísta, mostrando que a possibilidade de intersecções das categorias enriqueceram a análise.

A subcategoria Continuísmo Histórico desperta a sensação de continuidade e desenvolvimento gradual da ciência e foram empregadas, em geral, para ponderar a forma sugestiva com a qual formulamos os enunciados das questões. Neles, buscamos provocar os alunos a reconhecerem as rupturas na ciência, o que, em certa medida, ocorreu. Uma leitura superficial do *corpus* revela que todos os voluntários reconheceram o caráter mutante da ciência. Porém, o peso dado às rupturas variou nos diversos documentos *corpus* e as unidades que integram a subcategoria Continuísmo Histórico tendem a amenizar esse peso apontando para o processo histórico da construção dos quadros conceituais, como exemplificado pela unidade a seguir:

podemos perceber que nós de fato abandonamos o conceito de Aristóteles e o substituímos pelo conceito de modelo atômico, mas isso não significa que esquecemos das contribuições de Aristóteles para a ciência, muito pelo contrário, graças a ele, seus sucessores podemos desfrutar de tudo o que desfrutamos hoje, inclusive, a própria Teoria da Relatividade [*sic*] não obstante, sabemos então que o tempo é relativo, tanto na Teoria de Einstein, quanto na vida, em situações do cotidiano. Então, eu não posso simplesmente afirmar se alguma teoria científica sobreviverá aos efeitos do tempo ou se tudo permanecerá como está. (Ártemis, Atividade A)

A busca por uma posição que ponderasse os elementos de continuidade ao longo das mudanças científicas foram representadas também por argumentos que valorizam a continuidade entre os formalismos de teoria sucessivas. Alguns participantes se valeram das continuidades formais e matemáticas entre a mecânica clássica e a relativística, considerando que a primeira é recuperada da segunda em casos limite:

Os pensadores anteriores à Einstein não estavam completamente “errados” aos [*sic*] pensar no espaço e no tempo como grandezas absolutas. Isso porque nas situações que lidamos no nosso cotidiano, essa ideia se aplica perfeitamente. Inclusive nos casos do nosso cotidiano, nas transformações de Lorentz, vemos que elas são exatamente iguais às definições de espaço e de tempo “clássicas”, como tanto estudamos em disciplinas como a Mecânica. Isso porque o “fator gama” da transformação seria igual a um nesses casos [...], resultando em equações de movimento exatamente iguais às clássicas. (Parzival, Atividade A)

Como comunicaremos na próxima seção, argumentos descontinuístas foram mais raros do que os continuístas. As unidades de análise consideradas descontinuístas são as mesmas que aceitavam o abandono de entidades teóricas como parte do processo natural de desenvolvimento da ciência. Por este motivo, a subcategoria Descontinuísmo insere-se na subcategoria Críticas ao Realismo, representando uma importante intersecção entre as grandes categorias Realismo Científico e Continuísmo/Descontinuísmo. Vale ressaltar que nem todas as Críticas ao Realismo expressam argumentos descontinuístas, como pudemos notar no trecho destacado acima, retirado da Atividade B do participante Teodorov.

Fez também parte da análise uma categoria estabelecida totalmente *a posteriori*, com implicações importantes na argumentação filosófica dos participantes, e foi chamada de Noções de Verdade. O enunciado da Atividade A problematizava os “conteúdos de verdade” das teorias do passado, o que estimulou os alunos a manifestarem suas posições sobre as relações entre ciência e verdade, um importante aspecto do debates sobre o realismo científico. Dessa categoria surgiram duas subcategorias: Noções Não-Binárias de Verdade e Noções Perspectivistas de Verdade. As unidades de análise que se encaixam na primeira tendem a conter argumentações que se opõem ao entendimento de que quaisquer conhecimentos científicos podem ser julgados por conceitos bivalentes de verdade, sugerindo que é possível falar em graus de verdade, ou na inexistência de verdades absolutas e atemporais na ciência:

Julgar concepções históricas sobre como o Universo se comporta

não pode ser reduzido a dizer que eram certas ou erradas. A concepção newtoniana foi capaz de encontrar respostas a algumas das maiores questões de sua época (aqui, me refiro à época em que a concepção newtoniana perdurou, não apenas à época em que Newton viveu), como o problema das marés, o movimento dos planetas (embora nunca tenha funcionado para Mercúrio) e a descrição da balística, e, dentro da experiência limitada da época, dava conta de explicar quase tudo o que se conhecia. Isso parece ser o suficiente para se dizer que os cientistas pré-relativísticos estavam corretos dentro da realidade em que se encontravam. (Art Vandelay, Atividade A)

Esse é um caso exemplar de oposição a noções muito estritas de verdade e falsidade no conhecimento. Não raro, o fato de uma teoria do passado ser capaz de resolver problemas, prover meios para previsão de fenômenos, ou de dar prognósticos, foi utilizado pelos participantes como indicativos de graus de verdade atingidos pelo sistema conceitual em questão.

A segunda subcategoria, Noções Perspectivistas de Verdade, aglutina unidades de análise que expressam um entendimento também não-binário de verdade. Porém, tais argumentos tendem a defender que julgamentos de verdade não devem ser desassociados do contexto histórico dentro do qual a teoria vigorou, ou do paradigma científico à ela subjacente. A rigor, essa subcategoria engloba também a categoria anterior, mas o destaque a elementos históricos presentes nas argumentações justificaram a sua criação, como exemplificado a seguir:

Falando sobre paradigma, devemos, a princípio, considerar o tempo em que ela é/está [teorias e ideias das ciências] inserida, ou, de certo modo, aceita. Não podemos cair no erro de desprezar o momento histórico e toda a conjuntura que envolve os conceitos centrais de tal paradigma (Marcos H., Atividade A)

Ao longo da realização da análise, foram formuladas outras categorias, mas que acabaram não contribuindo para a argumentação final do metatexto, tendo sido, então, suprimidas da comunicação. Isso nos pareceu um movimento comum na Análise Textual Discursiva, pois é um processo de constante construção e reconstrução, criação e destruição. Como exposto por Moraes (2003) e Moraes e Galiuzzi (2006), esse tipo de análise é um processo vivo, cujo ponto de chegada não está predeterminado, e o caminho é por vezes tortuoso e cheio de instabilidades.

A próxima seção será dedicada à exposição do metatexto, o resultado final da análise. Nele, procuramos deixar claro como as categorias e subcategorias se relacionam e como as utilizamos para interpretar a argumentação dos alunos, com o objetivo de dar um novo sentido

ao *corpus*, buscando compreender como os alunos se mobilizaram para pensar as relações entre teoria e realidade, e os aspectos contínuos e descontínuos do conhecimento científico.

#### 4.4.2 Metatexto

Após um intenso processo de impregnação nos documentos do *corpus* de análise, fragmentação das unidades e gradual reorganização e emergência de novos sentidos, como prescreve o referencial metodológico (MORAES, 2003; MORAES & GALIAZZI, 2006), pudemos chegar a duas conclusões principais (imbricadas entre si) sobre a interação dos alunos com as atividades propostas e o conteúdo de sua argumentação.

Concluimos, em primeiro lugar, que o perfil do curso de Gravitação (ver seções 4.2.1 e 4.2.2), que busca cultivar a percepção da ciência enquanto empreendimento intelectual historicizado e cultural intimamente ligado a outras diversas manifestações culturais humanas - como a arte, a política, a economia, entre tantas outras -, desempenhou papel importante de influência na argumentação dos alunos. Como ficará claro em breve, o posicionamento filosófico dos alunos muitas vezes não se dissociava das reflexões históricas por eles assimiladas ao longo da disciplina. Chegamos também à conclusão de que as Atividades A e B suscitaram diferentes tendências na construção de argumentos dos participantes. Enquanto nos textos da Atividade A fizeram-se mais presentes argumentos de cunho continuísta e fazendo muitas referências à história da ciência, notamos tendências argumentativas mais descontinuístas nos textos da Atividade B, além do uso de um vocabulário e discurso mais próximo da filosofia da ciência do que da história. Interpretamos que a ênfase dada ao abandono do éter, tanto durante a aula quanto no texto de apoio, bem como a formulação do enunciado da Atividade B, que remete à metaindução pessimista, induziu os alunos a reconhecerem rupturas na dimensão ontológica e a possibilidade de novas rupturas ocorrerem no futuro.

Para evidenciar tais tendências por nós observadas, setorizaremos a comunicação da análise, ocupando-nos primeiramente de comentar as produções da Atividade A, sob a luz das categorias estabelecidas, para depois comentarmos os textos e unidades de análise da Atividade B.

Nos textos da Atividade A, foi notável a maneira como foram empregados argumentos históricos para se advogar contra uma suposta dominância da visão de mundo relativística sobre uma visão de mundo clássica, por mais radical que a revolução de Einstein tenha sido (segundo alguns dos próprios participantes). Essa classe de argumentos também foi invocada como forma

de se posicionarem contra a ideia de que é possível imputar erro às concepções de espaço e tempo da mecânica clássica.

Em nossa análise, consideramos que o privilégio dado a argumentos de cunho historicista demonstram visões de que o desenvolvimento da ciência é dado gradualmente, por acúmulos de conhecimentos das gerações passadas e que, sem eles, não seria possível a construção de novos conhecimentos, inclusive aqueles que representam rupturas do ponto de vista conceitual. A continuidade histórica do conhecimento científico, aspecto comum na argumentação dos alunos e que foi erigida ao status de subcategoria de análise dentro da categoria geral Continuísmo/Descontuísmo, pode ser exemplificada pela unidade de análise a seguir:

Considerar o espaço e o tempo absolutos é algo que encontramos até mesmo no início do curso de Física, então faz parte da construção do conhecimento, construção do saber científico. Em ciência, temos também o método científico, onde temos alguns processos necessários para a criação de uma teoria, e enxergo que considerar o tempo e espaço absolutos, seja apenas uma etapa desse método científico, não podemos descartar e dizer que etapas desse processo está incorreta, caso a teoria se comprove correta, porém, no tocante da teoria da relatividade esse processo foi involuntário e duradouro. (Mauro Henrique, texto da Atividade A).

Vemos que, nesse comentário, o autor tende a não fazer juízos de valor do ponto de vista epistêmico sobre concepções clássicas sobre o espaço e o tempo. A proposição e aceitação dessa concepção, assim como a proposição de novos entendimentos sobre essas entidades, fazem parte, nas palavras do autor, de um “método científico”<sup>9</sup>. Segundo ele, faz parte desse método o abandono de noções antes vigentes que possibilitam a emergência do novo. A concepção de espaço e tempo absolutos pode não estar completamente correta enquanto resultado, mas se justifica enquanto processo. Fica bastante pronunciada nessa fala o entendimento do conhecimento científico como um gradual processo histórico, no qual cada etapa depende fortemente da etapa anterior, conferindo certa continuidade ao empreendimento científico.

---

<sup>9</sup>Em geral, menções ao “método científico” revelam noções ingênuas sobre as ciências. O entendimento de que a ciência consiste em passos mecânicos que garantem seu sucesso é bastante recusada na literatura sobre a Natureza da Ciência no ensino. Apesar de a fala do aluno remeter, em alguma medida, a esta visão, o argumento é acompanhado de um fator histórico. Na argumentação em questão, a sucessão histórica de teorias mutuamente incompatíveis é parte integrante do desenvolvimento científico, de forma que teorias contemporâneas só poderiam ter sido formuladas devido à contribuições de teorias do passado.

A sensação de continuidade histórica e desenvolvimento gradual da ciência defendida por Mauro Henrique foi verificada em diversas das produções textuais que integram o *corpus* de análise. Buscando mais referências sobre importância histórica dos conhecimentos do passado, o participante de pseudônimo Parzival admite que a teoria da relatividade pode ser abandonada enquanto paradigma vigente, mas pontua que sua importância histórica perdurará no tempo, assim como as teorias do passado:

Talvez esse status atual que ela [a teoria da relatividade] possui não se mantenha nas próximas décadas e séculos, mas a inovação trazida no nosso modo de enxergar e interpretar o mundo é uma característica histórica, que com certeza ultrapassará as barreiras do tempo. (Parzival, Atividade A).

Aproveitando-nos do trecho já citado na seção 4.4.1, retirado da Atividade A de Ártemis, a autora faz referência a conteúdos estudados na disciplina ao pontuar as discontinuidades entre as visões de mundo aristotélica e atomista. Esta última é bastante associada ao Universo mecanicista composto apenas pelo vazio e por corpúsculos dotados de forma e movimento (KUHN, 1992 [1958]), que substituiu o sistema de mundo aristotélico-ptolomaico composto por esferas cristalinas. Constatamos que, apesar do reconhecimento de que o abandono de conceitos e visões de mundo é uma parte importante da história da ciência, a autora prioriza e valoriza, em sua argumentação, o processo histórico, destacando as contribuições do passado para a concepção de novas ideias. Interpretamos que tais argumentos de vieses continuístas se opõem à noções de mudanças de *gestalt* nas visões de mundo da ciência, que dão ênfase às rupturas e incompatibilidades entre tais visões. Os alunos se mostraram mais inclinados a enxergar as mudanças científicas como um processo semelhante à transformação de um girino em um sapo, isto é, como um processo contínuo no qual cada estágio de transformação se comunica de maneira muito direta com o estágio anterior<sup>10</sup>. Essa tendência pode ser verificada na maneira como Mauro Henrique se expressou na abertura do seu texto da Atividade A:

Quando tratamos da teoria da relatividade, sempre pensamos em uma teoria disruptiva com conceitos até então tidos como verdade absoluta no mundo científico, como a mecânica clássica de

---

<sup>10</sup>Retiramos esta analogia do artigo de Worrall (1989), que a utilizou para problematizar a natureza das mudanças científicas, contraponto a noção de mudanças radicais à noção de mudanças contínuas, segundo a qual teorias sucessivas se aproximam umas das outras, de forma que “qualquer teoria presentemente aceita continuará aproximadamente correta, até sob luz de sua sucessora imediata” (p. 106)

Newton. Porém, é errado dizermos que a teoria da relatividade afunda e coloca as leis e teorias anteriores como inverdades ou fisicamente improváveis, mas sim, uma complementa a outra. (Mauro Henrique, Atividade A)

É notável como o discurso de Mauro Henrique pondera aspectos de continuidade e descontinuidade ao assumir que a teoria de Einstein foi “disruptiva”, ao mesmo tempo em que se pode notar uma resistência em assumi-las como referente a um mundo distinto daquele prescrito pela mecânica newtoniana. Tal tipo de ponderação está presente ao longo de toda a sua argumentação da Atividade A.

O olhar dos participantes perante o enunciado da Atividade A também foi bastante orientado por reflexões históricas quando buscaram responder às questões associadas ao conteúdo de verdade das teorias do passado. No comentário de Art Vandelay, categorizado dentre as Noções Não-Binárias de Verdade, retirado da Atividade A e já citado na seção 4.4.1, o autor se opõe de maneira veemente a empregar a noção bivalente de verdade para comparar as teorias de Newton e Einstein. Ele dá a entender que não é adequado usar nossos conhecimentos da ciência contemporânea para julgar um suposto teor de ‘verdade’ de uma teoria do passado. Segundo ele, a capacidade que uma teoria tem de explicar fenômenos e resolver problemas configurariam uma régua mais precisa para julgar o sucesso de uma teoria do passado.

No comentário de Dr. Martin van Nostrand, a noção de verdade ganha outros contornos e torna-se relativa ao paradigma científico associado a uma teoria. Para o autor, abordar conhecimentos do passado tendo como referência conceitos como o de ‘verdade’ beira o anacronismo. Segundo ele, as teorias científicas devem ser avaliadas segundo os parâmetros de cientificidade que a fundamentam e os paradigmas que a legitimam. Se apropriando dos conceitos de Thomas Kuhn, abordados no curso, o autor afirma:

dizer que os cientistas estavam enganados soa como um problema anacrônico, uma vez que, analisar do ponto de vista da época destes, não houve engano porque naquele momento aquela teoria era a que melhor compreendia seus fenômenos. Para nós, hoje, é um engano pensar o espaço e o tempo absolutos porque eles não o são na teoria da relatividade, que é nosso paradigma vigente; mas até pouco antes de Einstein, em que eram entidades absolutas nos paradigmas, não era um erro, pois tratá-las como era suficiente e aceito. (Dr. Martin van Nostrand, Atividade A)

Essa unidade de análise extraída do texto de van Nostrand se encaixa também na outra

subcategoria das noções de verdade bastante empregadas pelos alunos, segundo nossa interpretação do *corpus*, a noção Perspectivista de Verdade. Para opor-se à provocação por nós feita no enunciado da Atividade A, este participante argumentou que todos conteúdos da ciência precisam ser analisados dentro dos paradigmas científicos nos quais foram formulados:

pensando a ciência como um monólogo entre nós e a natureza, onde fazemos perguntas a ela e aguardamos respostas, ou mesmo pela analogia discutida por Rubem Alves no livro *Filosofia da Ciência*, onde os cientistas são pescadores e os métodos são anzóis, nossos resultados acabam por ser predeterminados por nossas teorias, estamos em busca de um peixe tal e vamos utilizar o anzol para pescar esse tipo de peixe que queremos. (Dr. Martin van Nostrand, Atividade A)

Nesse trecho, o aluno demonstra o entendimento de que os métodos de investigação, as observações e experiências científicas, estão sempre carregados de teoria, à semelhança do que prescreve um dos *tenets* de Lederman (2002; 2007) (ver seção 1.2). Assim, segundo o autor, as teorias científicas devem ser avaliadas segundo os parâmetros de cientificidade que a fundamentam e os paradigmas que a legitimam.

Van Nostrand se utiliza de termos kuhnianos para argumentar contra a pertinência do conceito de verdade para comparar teorias de diferentes épocas. Outras unidades de análise que pertencem à categoria Perspectivista fazem referências ao contexto histórico dentro do qual uma teoria ou ideia foi proposta, julgando que esse contexto deve ser levado em conta ao compararmos teorias do passado e do presente: “Assumir que os cientistas estavam fundamentalmente enganados sobre a natureza do espaço e do tempo, é desconsiderar o contexto do qual eles estavam vivenciando no momento”, argumentou Rubi em seu texto da Atividade A.

Interpretamos que as manifestações a respeito dos conteúdos de verdade (em ambas as subcategorias de Noções de Verdade), mantêm-se neutras dentro da querela continuidade x descontinuidade na ciência. Explicamos: por uma lado, opor-se ao entendimento de que as noções de espaço e tempo de Newton não estão, *stricto sensu*, equivocadas pode significar que elas se aproximam da noção relativísticas de espaço-tempo, à semelhança da analogia do girino e do sapo utilizado por Worrall (1989). Por outro lado, pode-se interpretar que uma noção perspectivista considera que a verdade seja interna e só faça sentido dentro de um determinado paradigma, aproximando-se de uma argumentação relativista, mais solidária a visões descontinuístas. Entretanto, entendemos que os documentos do *corpus* não nos davam elementos para



priorizar uma interpretação ou outra. Como recomenda Moraes (2003), por mais que o pesquisador realize a análise sob a luz de seu referencial teórico, deve-se ter cautela e ter sempre em mente que os documentos foram produzidos por outrem. O analista deve se esforçar a lê-los segundo a perspectiva de quem os escreveu. Por esses motivos, as manifestações dos alunos sobre suas concepções de verdade na ciência não deveriam ser lidas à luz do eixo continuidade/descontinuidade. A tendência dos alunos em imputar certa dose de anacronismo no enunciado formulado por nós mostra que a formação adquirida ao longo do curso se mostrou presente em seus posicionamentos filosóficos e que pode ter havido algum incômodo com os termos por nós escolhidos. Isso reforça nossa argumentação de que o perfil do curso influenciou de maneira determinante a construção de argumentos dos alunos.

Rubi, ainda no texto da Atividade A, argumenta que a indesejabilidade de noções bivalentes ou absolutas de verdade para analisar os conhecimentos científicos está associada ao ensejo que o contexto social oferece aos cientistas na construção de suas ideias. A autora parece argumentar que a busca pela verdade não é um motor tão relevante para a ciência quanto o contexto no qual o cientista está inserido. Para tal, a autora parece se apropriar da exposição feita durante a primeira aula da intervenção ao nos lembrar que Einstein, ao propor a Relatividade, estava imerso em um contexto social, tecnológico e histórico bastante particular:

Albert Einstein é um ótimo exemplo disso [impacto do contexto social e histórico na produção do conhecimento], somente a partir do contexto que ele vivia pós Revolução Industrial que foi possível ele pensar no tempo com outra funcionalidade, afinal, de fato a função do tempo viera a mudar com as indústrias. (Rubi, Atividade A)

O perspectivismo adotado pelos alunos também fazia referência às possibilidades tecnológicas de cada época e sua influência na construção da ciência, como vemos em mais um comentário de Rubi, desta vez no texto da Atividade B: “ciência avança com a descoberta de novas tecnologias, e essas novidades podem propiciar uma nova leitura da natureza e do universo, mas não quer dizer que o que existia anteriormente não seja verdade”. O apelo à tecnologia para justificar ou compreender as limitações da ciência esteve muito presente no conjunto de textos analisados. A perspectiva técnica e tecnológica frequentemente era colocada como uma condição necessária para o desenvolvimento da ciência, o que nos remeteu a um dos *tenets* da Visões Consensuais (MCCOMAS, 1998) que diz que ciência e tecnologia se implicam mutuamente (ver seção 1.2). Um trecho do texto da Atividade A de Marcos H. exemplifica esta posição:

Primeiramente, não devemos atribuir adjetivos depreciativos para os paradigmas que foram contestados e “substituídos” por novos; nem tão pouco, inseri-los em caixas de “inferiores” em relação ao seu próximo. Portanto, os cientistas acreditavam em algo que viram e estudaram a partir de sua perspectiva, usando a tecnologia vigente na época e a liberdade que lhe era dado [*sic*]. (Marcos H., Atividade A)

A atenção dada ao papel da técnica e da tecnologia no desenvolvimento da ciência dá a entender que a capacidade do cientista de explorar a realidade está associada às possibilidades metodológicas da ciência e que, assim como os quadros teóricos, mudam no tempo. O avanço da tecnologia garantiria outras possibilidades de investigação que não seriam possíveis em outras épocas.

A noção perspectivista de verdade externada por alguns estudantes não se limita à compreensão das influências dos contextos históricos e sociais no desenvolvimento dos conteúdos cognitivos da ciência. Retornamos a van Nostrand, na Atividade A, quando argumenta de maneira bastante consistente que a própria ciência, realizada em qualquer época que seja, constitui uma maneira muito específica de olhar a natureza:

Temos nossas bases teóricas, levantamos hipóteses acerca do que estamos pesquisando e usamos os métodos para obter respostas às nossas perguntas. As vezes pode surgir algo inesperado nas respostas, como algumas descobertas (por exemplo a do oxigênio), mas no geral, a resposta é à pergunta feita. Portanto, é como se olhássemos por fendas apenas, tendo ainda milhares de fendas no todo possíveis de se olhar, o que não me leva a crer no fim da ciência ou na proximidade com uma verdade absoluta. (Dr. Martin van Nostrand, Atividade A)

A utilização da metáfora das fendas talvez seja a melhor expressão do que a subcategoria Noção Perspectivista da Verdade intenta sintetizar. Segundo a argumentação do autor, a ciência, ou uma teoria científica, permitiria-nos enxergar o mundo segundo uma perspectiva específica, dentro de uma infinidade de possibilidades. Como essa visão de mundo é mediada por algo (pelas fendas, no caso, mas também se poderia falar de “lentes”), está interdita a possibilidade de se acessar candidatos à verdade que possam ser submetidos a uma avaliação binária. Adotando uma perspectiva de inspiração kuhniana, no mesmo texto o autor desenvolve sua argumentação delegando aos conhecimentos científicos uma certa impregnação pelos sistemas conceituais paradigmáticos, como já citado anteriormente, quando o autor se utilizou da

metáfora sobre os anzóis e os peixes. Em outras palavras, o autor não adota a verdade como critério de julgamento, mas sim a adequação do conhecimento ao sistema de pensamento que o concebeu. Segundo interpretamos o texto, o autor defende que os saberes científicos não são absolutos, mas contingentes ao paradigma que o concebeu.

Interpretamos que, em geral, as noções perspectivas e não-binárias da verdade capturam uma visão bastante crítica sobre a ciência, ao mostrar clareza de que o conhecimento humano é historicamente, cognitivamente e tecnologicamente situado, como também perspectivo, prevenindo que os autores tenham uma percepção realista ingênua sobre os conteúdos da ciência. Além disso, podemos interpretar a partir dos textos, que o ensino de conteúdos de história da ciência foram fundamentais para que os alunos estruturassem suas argumentações.

Apesar de os textos da Atividade A serem muito marcados pela História da Ciência, também se mostraram outros expedientes argumentativos. A continuidade entre teorias sucessivas foi advogada tendo em vista a continuidade formal e a afinidade entre suas estruturas matemáticas. Foi apontado por alguns dos participantes que é possível recuperar os formalismos da teoria de Newton como casos limite da teoria de Einstein. Como argumenta Parzival em sua Atividade A, esse traço de continuidade não nos permite julgar a mecânica clássica como uma teoria fundamentalmente errada:

Os pensadores anteriores à Einstein não estavam completamente “errados” aos pensar no espaço e no tempo como grandezas absolutas [*sic*]. Isso porque nas situações que lidamos no nosso cotidiano, essa ideia se aplica perfeitamente. Inclusive nos casos do nosso cotidiano, nas transformações de Lorentz, vemos que elas são exatamente iguais às definições de espaço e de tempo “clássicas”, como tanto estudamos em disciplinas como a Mecânica. Isso porque o “fator gama” da transformação seria igual a um nesses casos [...], resultando em equações de movimento exatamente iguais às clássicas. (Parzival, Atividade A)

O fato de as equações de movimento da mecânica newtoniana serem retomadas nos casos em que o fator gama de Lorentz se iguala ou se aproxima de 1 é utilizado como evidência de que a teoria clássica teve êxito parcial em apreender aspectos verdadeiros da ordem natural. Art Vandelay, também no texto da Atividade A, utiliza o mesmo argumento, destacando a aproximação entre os formalismos das duas teorias: “Outro ponto importante é que a Relatividade Restrita, para velocidades baixas, confirma os resultados newtonianos, embora traga consigo diferentes concepções sobre o Universo.” Esse raciocínio se mostrou presente para dar

maior ênfase aos traços de continuidade entre as teorias de Newton e a teoria de Einstein, e são expressões do Princípio Geral da Correspondência (ver seção 2.4.4).

A defesa da continuidade formal entre teorias foi realizada de maneira mais enfática por Rubi, ao considerar que o principal elemento de continuidade entre teorias é a matematização dos conceitos e das ideias científicas:

Por mais que ao longo do tempo esses conceitos sofreram inovações, há um conteúdo verdadeiro nisso: a matemática. A matemática que envolve esses conceitos são cálculos que perduram até a atualidade e continuarão se perdurando no tempo. (Rubi, Atividade A)

Interpretamos que a argumentação da autora remete ao argumento de Poincaré sobre a manutenção das relações formais entre os objetos de uma teoria, tratadas em detalhes no Capítulo 2. A matemática e a conceituação científica estão, segundo expressa a autora, “envolvidas” uma na outra, intimamente imbricadas. Interpretamos que o uso dessa expressão revela como a autora não dissocia os conceitos físicos da matemática que os estrutura. Considerando que a categoria referente ao eixo “continuidade e descontinuidade na ciência” foi adotada a priori neste estudo, amparada nos subsídios teóricos sobre o realismo científico e estrutural, não pudemos deixar de considerar notável a ênfase dada pela autora de que a matematização das ideias científicas é a melhor candidata a ser preservada ao longo de mudanças científicas. Baseando-se no texto de apoio disponibilizado por nós para a realização da Atividade B, a mesma autora salientou a continuidade entre as teorias de Fresnel e de Maxwell:

Um exemplo disso [o abandono de certas ideias da ciência], a teoria ondulatória da luz proposta por Fresnel (1788-1827), trazendo o cálculo da intensidade da luz a partir do movimento mecânico realizado pelo éter. Fresnel criou cálculos para explicar essa ideia, que posteriormente foram utilizados por James C. Maxwell (1831-1879) e Heinrich Hertz, mas a teoria da Relatividade Restrita de Einstein chegou para mudar tudo.

Os cálculos de Fresnel até hoje são conhecidos como corretos, mas não dentro do contexto que ele imaginou. E ao longo da história do desenvolvimento da ciência para explicar a natureza sobre o que não se sabe, as teorias foram renovadas ou deixadas de serem usadas, assim como a teoria do éter. (Rubi, Atividade B)

Considerando o estabelecimento de categorias *a priori* associadas à continuidade e descontinuidade dos conhecimentos científicos, essa foi uma unidade de análise que ponderou com clareza ambos os aspectos, posicionando-se na intersecção entre as duas subcategorias.

Em linhas gerais, as produções dos alunos referentes à Atividade A revelam uma clara compreensão de que a ciência é um empreendimento intelectual que não atinge verdades absolutas e atemporais, configurando seu caráter tentativo e provisório. O fato de conceitos e teorias estarem sujeitas a serem abandonadas ou reformuladas foi constantemente ressaltada, apesar de não tê-los impedido de enxergar traços de continuidade entre teorias sucessivas.

Em geral, posturas semelhantes foram verificadas nos textos referentes à Atividade B, como o reconhecimento de que diversos aspectos das teorias do presente possam ser alterados ou abandonados no futuro. Porém, notamos tendências argumentativas inéditas em relação aos documentos da Atividade A. Por meio das categorias de análise estabelecidas, percebemos que questões pertinentes ao debate do realismo científico, para além das relações entre ciência e verdade, foram abordadas nos textos. O argumento de motivação histórica sintetizado por Laudan a respeito da metaindução pessimista parece ter sensibilizado os alunos a se colocarem de maneira explícita sobre o que significa atribuir realidade a uma entidade teórica.

Como já adiantamos na seção anterior, concepções críticas sobre o realismo científico expressas pelos participantes deram origem a uma subcategoria que chamamos de Críticas ao Realismo, e foi bem representada pelo trecho retirado da Atividade B de Teodorov (ver seção 4.4.1), no qual o autor reconhece que a atribuição de realidade a uma entidade teórica é uma questão intrinsecamente não-consensual. Teodorov argumenta que as entidades teóricas, como o átomo, tem uma importante dimensão construtiva, ligada à imaginação dos cientistas e, ao mesmo tempo, outra representativa do Real, de forma que ambas as dimensões se imbricam. Além de não ser uma percepção trivial a respeito das relações entre teorias científicas e a realidade, é um posicionamento que se distancia de visões mais pacificadas sobre a ciência que emergiram nas Atividades A, como a provisoriedade dos conhecimentos ou o caráter histórico e social de sua construção. Posições dissensuais sobre a Natureza da Ciência se fizeram mais presentes nessa etapa da intervenção. Reflexões semelhantes à de Teodorov figuraram na argumentação de Marcos H. em sua Atividade B:

A Ciência, conforme o tempo avança, as tecnologias evoluem, a sociedade à respeito e colhe os benefícios dessa atitude, opta por desvendar o mundo e seus fenômenos. Todas as áreas do conhecimento enfrentam esse contratempo, e fazem o uso de objetos

não observáveis. *Esses objetos são encarregados de erguer pontes entre o entendimento do mundo natural e seus eventos com a imaginação ativa e concreta dessas respostas.* [...] Como dito, todos esses objetos utilizados para fabricar uma imagem que confeccione uma melhor assimilação do mundo, sofrem quedas e reconstruções, com o artigo [*sic*] “Éter” não foi diferente. Sua importância está registrada para todo sempre na incrível busca por explicações. (Marcos H., Atividade B, grifo nosso)

Um aspecto filosófico importante dessa unidade de análise é o fato de que, apesar de não estarem adotando posições estritamente realistas perante as entidades teóricas, os participantes admitem sua importância para a construção da ciência. A maneira como o autor expressou o papel desempenhado por essas entidades reconhece que a atividade científica se esforça a se referir à realidade concreta, porém fazendo uso de expedientes imaginativos para tecer respostas aos seus problemas. O éter, assim como todos os outros inobserváveis, desempenham esse papel de fazer a ponte entre o concreto e o pensado. É interessante notar que o autor expressa simetria entre entidades do passado, como o éter, e entidades teóricas eventualmente empregadas nas teorias atuais da ciência, atribuindo-lhes papel semelhante no empreendimento científico (erguer pontes entre o concreto e o pensado), além de assumir a possibilidade de eventual abandono às entidades da ciência corrente. As discontinuidades no nível ontológico parecem ter sido assimiladas pelo participante. Podemos desenhar a hipótese de que a ênfase dada à importância de uma atitude simétrica entre ciência do passado e do presente, tanto ao longo do curso quanto na proposição das atividades e do texto de apoio da segunda aula, dirigiram os alunos a uma posição cautelosa sobre o estatuto ontológico dos conteúdos da ciência.

Notamos, ao longo da análise, que os autores, apesar de aceitarem o caráter tentativo e dinâmico da ciência - inclusive em casos que representam rupturas do ponto de vista ontológico -, não consideram isso uma característica negativa da ciência que inspire qualquer tipo de desconfiança ou “pessimismo” frente aos seus conteúdos cognitivos. A relação sutil e indireta entre teoria e realidade, expressa por alguns dos participantes, também não implicam em visões anti-científicas, ou que diminuam a importância da ciência enquanto construto artificial que não espelha de maneira direta a realidade, como interpretamos na seguinte argumentação de Teodorov:

é de se esperar que, em toda a ciência, haja pelo menos uma pequena parcela de realidade, mesmo que ela seja apenas parcial ainda nos é muito preciosa. Afinal, todas essas coisas funcio-

nam, são reais e estão conosco o tempo inteiro. Então, como é possível nos questionar sobre a existência ou não dos conceitos e imagens que os fizeram vir a vida? É bem capaz que nossas ideias sejam radicalmente alteradas novamente, como aconteceram tantas vezes no passado, na verdade, é quase certo de que isso vai acontecer [*sic*]. (Teodorov, texto da Atividade B)

A aceitação de aspectos descontínuos da representação da realidade não minam a possibilidade de progresso do conhecimento científico, como Teodorov deixa claro em sua argumentação, ao afirmar que apreensão da realidade, apesar de parcial e aproximada, “nos é preciosa”. Interpretamos que um percurso argumentativo semelhante foi utilizado por Art Vandelay:

A ciência parte de modelos. Isso significa que busca representações que possam esquematizar a natureza de modo que expliquem (e prevejam) resultados empíricos. Esses modelos são representações da natureza, e, assim como uma pintura de uma pessoa não é a pessoa, esses modelos não podem ser confundidos com a natureza em si.

Pode-se alegar que o fato de manipularmos as leis da natureza que conhecemos à nossa conveniência (ou seja, que desenvolvemos tecnologia) é uma evidência de que estamos corretos, mas, por mais que seja seguro dizer que estamos prevendo corretamente que algo vai acontecer, não há motivos para crer que sabemos exatamente o que é esse algo. Afinal, já se acreditou que elétrons fossem partículas com formas e posições bem definidas, e nem por conta disso tivemos problemas em tomar uso da corrente elétrica. (Art Vandelay, Atividade B)

O sucesso empírico e a capacidade de manipulação técnica, representado pela menção feita à corrente elétrica, não nos garante que tenhamos apreendido de maneira definitiva a realidade de um entidade teórica como o elétron, segundo interpretamos a argumentação do aluno. Em outras palavras, o sucesso empírico de uma teoria, amparada pela referência a uma entidade teórica, não nos exime de colocar em suspeição sua adequabilidade representativa. Semelhantemente, em sua Atividade B, Parzival sugere que não há teste empírico ou verificação que nos permita atestar indubitavelmente a existência de uma entidade teórica, admitindo que possam haver descontinuidades no nível ontológico em nossas teorias correntes:

Nos parece muito provável, hoje, que qualquer teoria vigente seja verdadeira e ponto. Mas é exatamente o mesmo pensamento que se tinha sobre o Éter há alguns séculos, a ponto de os estudos (em

geral) na Física, o terem como um Norte, não focando no questionamento acerca de sua existência, mas sim adaptando todo o resto coexistir com o Éter. No fim das contas, é o mesmo que fazemos, por exemplo, com a teoria atômica vigente. Não há como verificarmos de fato se o que temos como ideia de átomo seja verdade. Talvez nunca alcancemos essa certeza. (Parzival, Atividade B)

Mais uma vez enxergamos na argumentação do aluno certo senso de simetria entre a atitude dos físicos do presente e do passado. Parzival expressa que a existência do éter não era posta em dúvida pelos físicos do passado, assim como não se costuma fazer em relação ao átomo, segundo ele. Mas, apesar de o éter ser uma entidade obsoleta, o autor reconhece seu papel como um elemento que orientava a pesquisa no passado, integrando, à época, a visão de mundo dos cientistas.

Frente à constatação de que a visão de mundo científica muda ao longo do tempo, por vezes de forma radical, alguns alunos decidiram adotar uma posição instrumentalista perante as teorias do passado como forma de lidar com o problema. Interpretamos essa postura como uma tentativa de dar sentido à mudança científica de maneira a atribuir realidade, ou adequação à realidade, à ciência contemporânea, preservando algum valor epistêmico ou pragmático à ciência do passado. Pudemos notar essa tendência na argumentação de Mauro Henrique, desta vez na Atividade A:

colocamos a teoria da relatividade como uma interpretação realista, como vemos o mundo em quatro dimensões, como de fato é, considerando o tempo como uma quarta dimensão. Já a mecânica clássica, vemos a interpretação positivista é disposta nesse caso, pois nela temos a visão e entendimento de que o mundo é aquilo que enxergamos e instrumentalizamos a grandeza. (Mauro Henrique, Atividade A)

O autor se posiciona de maneira realista frente a Teoria da Relatividade e a realidade quadridimensional do mundo que ela sugere, ao passo que atribui um caráter mais utilitário e instrumentalista à mecânica newtoniana. O tom utilitarista perante a mecânica clássica foi notado por nós também na Atividade A de Lucas Carvalho Pereira: “Apesar de ter sido revolucionária e apresentar novos conceitos teóricos, a teoria da relatividade não inutilizou a física clássica.”

Outras posições filosóficas adotadas, mais raras dentro do *corpus* do que outras, porém igualmente legítimas, foram posturas realistas e de tom mais continuísta. Apesar de não negar



o caráter tentativo e provisório da ciência, Maristela Leite, na Atividade B, expressou confiança de que há certos conhecimentos que integram nossa visão de mundo atual que são tão sólidos ao ponto de dificilmente passarem por mudanças radicais:

Como já foi citado, a ciência e o entendimento da natureza passaram por diversas modificações ao longo dos anos e muito provavelmente as coisas continuaram [*sic*] mudando. Não acredito que haverá mudanças radicais que mude totalmente a nossa maneira de ver o mundo de hoje, muitas áreas do conhecimento já estão bem estabelecidas. Caso o que conhecemos como ciência hoje não fosse real, muita coisa que fazemos não seria possível, como por exemplo: erguer prédios, aviões, curar doenças, pousar um foguete na lua, enfim, tudo isso não seria possível se estivéssemos totalmente errados. (Maristela Leite, Atividade B)

Em um excerto do mesmo texto, e em consonância com o argumento citado acima, Maristela Leite externa otimismo sobre o progresso na ciência: “nem tudo o que conhecemos hoje era conhecido a [*sic*] alguns anos ou séculos atrás. Para chegar onde chegamos, muita coisa precisou ser feita, muito estudo, experimentos, erros e acertos”. Segundo a autora, o sucesso manipulativo, empírico e prático da ciência seria uma evidência de que a ciência alcançou certo nível de estabilidade que tornam improváveis mudanças científicas radicais. Concepções semelhantes sobre o progresso da ciência, mais especificamente, a respeito de nosso conhecimento sobre os objetos inobserváveis, foi expressa de maneira bastante direta e enfática por Art Vandelay:

A respeito da possibilidade de um dia representarmos a natureza perfeitamente, independente de ser lógico percebermos isso quando acontecer, acredito que a melhor metáfora usada é a de aproximação assintótica, ou seja, nunca realmente chegaremos a uma resposta final, perfeita, mas sempre poderemos nos aproximar mais dessa realidade. (Art Vandelay, Atividade B)

É destacada, nas últimas duas citações, a compreensão de que a ciência é um empreendimento intelectual cumulativo, fortemente dependente dos conhecimentos construídos anteriormente na história, e que tem a propriedade de convergir cada vez mais à realidade externa. Notamos que este posicionamento foi raro entre os voluntários. Poucos expressaram com tanta contundência a convicção de que podemos esperar mais traços de continuidade do que de descontinuidade no domínio ontológico da ciência.

Sensibilizar os alunos e alunas a colocarem em perspectiva o papel das entidades teóricas era um dos objetivos educacionais da intervenção didática. A problematização sobre o que significa atribuir existência a um ente não-observável criou terreno para a criação de argumentos que, em certa medida, naturalizam a mudança científica e o abandono de entidades. O fato de termos estimulado a reflexão a respeito de um tópico não consensual sobre Natureza da Ciência por meio de questões abertas, fez com que os alunos adotassem diferentes posturas frente ao problema filosófico proposto. Em ambas as atividades, orientamos as questões de forma a fazer com o que os alunos se confrontassem e se posicionassem a respeito da metaindução pessimista. Buscamos levar tal provocação tanto ao domínio das teorias, na Atividade A, quanto no domínio das entidades teóricas, na Atividade B.

A abordagem histórica da disciplina de Gravitação e algumas das atividades semanais (ver seção 4.2.2) que exercitaram o desejável distanciamento para estudarmos e pensarmos teorias científicas do passado, sensibilizaram os alunos a tomarem posições mais continuístas na Atividade A. Entendemos que o fato de a teoria newtoniana ser um importante elemento dos currículos no ensino básico e superior induziu os alunos a não imputarem erro, estritamente falando, àquele sistema teórico. Por mais que, do ponto de vista dos princípios físicos, a teoria de Newton seja incompatível com a teoria de Einstein, os alunos demonstraram resistência a atribuir prioridade a entendimentos mais disruptivos entre ambas as teorias. Já a referência teórica ao éter não foi recebida com o mesmo sentido de continuidade, o que era um resultado esperado, uma vez que essa entidade não integra nossa visão de mundo científica (por mais que os frutos de seu emprego no século XIX estejam intimamente relacionados com a ótica e o eletromagnetismo, que integram os currículos de física correntes). O abandono do éter despertou mais argumentos descontinuístas do que a ruptura einsteiniana. Contudo, percebemos que os alunos não atribuíram ingenuidade aos cientistas do passado por acreditarem em sua existência. Pelo contrário, os alunos identificaram semelhanças entre a adoção do éter na Física do século XIX e a adoção de entidades como o átomo na Física contemporânea. Consideramos, mais uma vez, que a inserção da História da Ciência na formação desses professores, concretizada na disciplina em questão foi, pelo menos parcialmente, responsável pelo senso de simetria entre a ciência do passado e a ciência corrente.

À guisa de conclusão deste metatexto, gostaríamos de observar que incentivar a reflexão sobre existência e abandono de entidades teóricas foi uma estratégia frutífera para que os alunos se posicionassem a respeito de aspectos não-consensuais sobre a Natureza da Ciência, o que

ocorreu com maior intensidade na Atividade B. Notamos que a Atividade A criou terreno fértil para a emergência de argumentos que remetem a aspectos mais pacificados da NdC, como a provisoriedade do conhecimento científico, os aspectos sócio-históricos da construção das teorias e a mútua implicação entre ciência e tecnologia. Já na Atividade B, os alunos adotaram posições mais dissensuais, como buscamos deixar claro ao longo desta seção. No entanto, a emergência de argumentos associados a aspectos consensuais da NdC estão ligados aos posicionamentos empregados pelos alunos sobre tópicos dissensuais. Tomemos como exemplo os argumentos utilizados para advogar contra o emprego de noções bivalentes de verdade: o fato de a ciência ser socialmente e historicamente situada (conhecidamente um *tenet* das Visões Consensuais), foi utilizado como justificativa para que se adotasse certo nível de ceticismo sobre a absoluta correção das teorias vigentes; a contingência histórica do desenvolvimento científico (aspecto consensual) aparece como fator para se entender a relação entre teoria e realidade (aspecto não-consensual). Semelhantemente, a provisoriedade do conhecimento foi meio para a construção de argumentos críticos sobre as relações entre teoria e realidade. Em suma, entendemos que tanto o perfil do curso, quanto o debate que buscamos fomentar nesse estágio formativo dos futuros professores, induziram-lhes a empregar conhecimentos compatíveis com as listas de conteúdos consensuais na Natureza da Ciência como ponto de partida para reflexões filosóficas sofisticadas e inescapavelmente dissensuais.

# Capítulo 5

## Considerações finais

A história, a filosofia e a sociologia das ciências se estabeleceram como importantes abordagens no ensino de ciências, há tempos em crise. Os esforços em construir um discurso metacientífico mínimo que desse suporte a novas visões sobre as disciplinas científicas e seu ensino fizeram emergir as Visões Consensuais de Natureza da Ciência, que foram importantes para o desenvolvimento da área de pesquisa e para a orientação curricular. Porém, a natureza estanque e declarativa das listas de Visões Consensuais exige maiores esclarecimentos e debates sobre tópicos relevantes de Natureza da Ciência. Buscamos argumentar que tais aprofundamentos sobre a Natureza da Ciência devam ser ponderados pelos riscos de flerte com visões exageradamente relativistas, mas que ainda se preocupem em superar as visões positivistas ingênuas que persistem entre professores e alunos. Assim, consideramos que visões realistas e objetivistas críticas podem desempenhar importantes papéis no desenho de discursos metacientíficos desejáveis ao ensino.

Julgamos que aspectos de Natureza da Ciência associados às mudanças e às revoluções científicas são temas tão complexos quanto sujeitos a interpretações inadequadas, no sentido de potencializar visões de descrença diante da ciência, seu crescimento cognitivo e sua capacidade explicativa e representacional do mundo natural. Com o intuito de complexificar o importante *tenet* proposto por McComas sobre os aspectos contínuos e descontínuos de desenvolvimento científico, mobilizamos conceitos e debates filosóficos concernentes às relações entre teoria e realidade.

As mudanças radicais pelas quais as ciências estão sujeitas podem ser alvo de reflexões sobre o realismo científico associadas à continuidade dos esquemas teóricos que os cientistas dispõem para versar sobre a ordem natural: em que sentido as representações teóricas são bem-sucedidas em capturar a realidade externa do mundo?; se é possível falar em progresso cientí-

fico, como entendê-lo tendo em vista a provisoriedade dos mais fundamentais conhecimentos científicos? Tais questionamentos se agravam ao constatarmos o impacto que o argumento da metaíndução pessimista representou as tradicionais visões realistas que se apoiavam na continuidade referencial sugerida pelo incrível sucesso das teorias científicas maduras.

Objetivando uma grande síntese entre os argumentos a favor e contra o realismo, Worrall propõe que o realismo estrutural – que remonta às ideias do matemático, físico e filósofo Henry Poincaré – seria “o melhor de ambos os mundos” (WORRALL, 1989). Este posicionamento metacientífico busca preservar, tanto quanto possível, o realismo científico, mesmo admitindo a existência das revoluções científicas (PSILLOS, 1995). Segundo Poincaré, (1995 [1905]), as posições antirrealistas – ou nominalistas – parecem sugerir que as teorias superadas são completamente suplantadas por novas teorias, “ruínas sobre ruínas”, e que através das mudanças teóricas nada é preservado. Entretanto, o filósofo aponta que, apesar dessas mudanças, as relações lógico-matemáticas são preservadas. Uma vez que uma teoria produz relações verdadeiras entre diferentes objetos, tais relações são “definitivamente adquiridas” e incorporadas às teorias subsequentes. O peso realista das ideias de Poincaré e Worrall reside não nos objetos em si, mas nas relações que a linguagem matemática tece entre os objetos e no caráter cumulativo e progressivo das mesmas. A identificação de estruturas formais que relacionam diferentes termos teóricos e que persistem ao longo de mudanças conceituais sugerem que existem importantes elementos de continuidade na ciência, e que a descoberta/criação de novas relações nas redes teóricas apontam para o crescimento e acúmulo do conhecimento sobre o mundo natural, diluindo o problema da descontinuidade e sendo coerente com visões críticas, porém otimistas frente ao empreendimento científico.

Com o objetivo de realizar um exercício de epistemologia histórica, estudamos um episódio histórico que, no nosso entendimento, ilustra a continuidade estrutural ao longo de mudanças radicais nos fundamentos da Física. As relações entre o coeficiente de arraste parcial do éter, proposto por Fresnel em 1818, e a revolucionária cinematográfica que emerge da Teoria da Relatividade Restrita já haviam sido estudadas em profundidade por reconhecidos historiadores e epistemólogos da ciência, pavimentando o caminho para nosso estudo deste episódio. Consideramos que nossa contribuição se dá no diálogo entre esses estudos - revisados sistematicamente por nós e, por vezes, buscando as fontes primárias quando necessário -, e o referencial teórico do Realismo Estrutural.

A retenção do coeficiente de Fresnel como um caso especial das adições relativísticas

de velocidade não torna evidente apenas o condicionante metodológico de escolha de teorias segundo o qual o formalismo das teorias predecessoras devem ser recuperadas pelas sucessoras. O Realismo Estrutural nos permite enxergar significados mais profundos desta retenção no que tange os estudos filosóficos que se propõem a investigar as relações entre as teorias científicas e a realidade do mundo que, pressupõe-se, existir independente de nós, seres cognoscentes. Segundo sugere Poincaré em seus escritos, considerados por nós e outros autores, precursores do referencial teórico adotado nesta pesquisa, a manutenção das estruturas matemáticas que estabelecem as relações entre os entes teóricos, dentre os quais se inclui o coeficiente de Fresnel, acusam a apreensão de uma harmonia intrínseca à ordem natural.

A maneira como nos apropriamos do Realismo Estrutural nos permite argumentar que o sucesso empírico da hipótese de Fresnel, atestada pelos experimentos de resultado nulo e, mais surpreendentemente ainda, pelo experimento de Fizeau de 1851, não se reduz apenas a uma conjectura *ad hoc* com o intuito de “salvar os fenômenos”, conforme instrumentalistas tendem a conceber. Tampouco se trata de um milagre, ou coincidência cósmica. Sua adequação empírica revela que as entidades que chamamos de espaço e tempo sempre nutriram as mútuas relações apreendidas apenas após a proposição da Relatividade Restrita, mesmo antes que nossas capacidades representativas do Real pudessem sobre elas nos informar. Um olhar retrospectivo dos antecedentes históricos da Teoria da Relatividade por nós estudados e orientado pelo Realismo Estrutural torna defensável uma posição realista perante as relações entre tempo e espaço sintetizadas pelas transformações de Lorentz. Interpretamos que o coeficiente de Fresnel se revelou uma manifestação destas relações, mesmo que estas permanecessem insuspeitas à época. A teoria de Fresnel para a ótica dos corpos em movimento se mostra um elo de continuidade entre as concepções clássicas e relativísticas do espaço e do tempo. Por mais que nosso entendimento sobre a natureza, bem como nossas capacidades de representação (sempre indiretas, imperfeitas, perspectivas e contingentes), tenham sofrido importantes revoluções, somos capazes de argumentar que sempre tínhamos sob escrutínio a mesma realidade. Esses estudos teóricos serviram como material de base para o desenvolvimento de uma intervenção didática aplicada em um contexto de formação inicial de professores, na qual objetivamos abordar questões não-consensuais sobre a Natureza da Ciência.

Temas sensíveis ao realismo e à mudança científica foram objeto de reflexão dos alunos, resultando em produções textuais por eles efetuadas. A Análise Textual Discursiva foi uma frutífera ferramenta para concluirmos que aspectos dissensuais da Natureza da Ciência podem

---

ser objeto de ensino e debate na formação inicial de professores, caso aliado à abordagem histórico-filosófica com objetivos claros de ensino. Por meio de episódios históricos, é possível tornar menos abstratas discussões filosóficas e metacientíficas.

A intervenção didática teve como objetivo evidenciar as rupturas científicas representadas pela revolução einsteiniana ao expor as diferenças entre a visão de mundo da Relatividade e da mecânica newtoniana, principalmente em seus fundamentos, além de abordar seus antecedentes históricos. Buscamos, na primeira aula, deixar clara a incompatibilidade entre os aspectos mais básicos de cada uma das teorias. Já na segunda aula, mostramos como os estudos teóricos e experimentais da ótica dos corpos em movimento buscavam conciliar resultados de observações astronômicas e experiências óticas com a visão de mundo mecânica do século XIX. O éter era uma peça essencial para dar sentido aos resultados obtidos pelos personagens históricos envolvidos.

Nas atividades propostas, buscamos fazer com que os alunos se confrontassem com questões epistemológicas associadas à mudança científica, a metaindução pessimista e suas implicações para o realismo e as relações entre ciência e verdade. Por meio de produções textuais, os alunos puderam se posicionar a respeito das controvérsias filosóficas propostas por nós. Ao analisarmos a produção dos alunos, obtivemos resultados relevantes em dois aspectos: a identificação de argumentos continuístas no domínio histórico da ciência contrapostos com argumentos descontinuístas no domínio ontológico; e a imbricação entre argumentos que envolviam aspectos consensuais e não-consensuais na Natureza da Ciência.

Consideramos que a abordagem histórica do curso de Gravitação influenciou os alunos a não imputarem erro às teorias do passado e a colocarem-se no lugar dos agentes históricos implicados. Para tal, foi essencial a recusa a noções binárias de verdades, julgadas pelos alunos como inadequadas para a apreciação de teorias e hipóteses consideradas hoje ultrapassadas. A combinação de um olhar historicizado e da indesejabilidade de visões bivalentes de verdade levaram os alunos a formularem argumentos que consideramos continuístas. Ao mesmo tempo, o episódio histórico envolvendo o abandono do éter luminífero, a despeito de sua centralidade na física teórica do século XIX, estimulou os estudantes a relativizarem percepções muito diretas e pouco mediadas das relações entre teoria e realidade. A recorrência do abandono de entidades inobserváveis fez com que os professores em formação assumissem uma espécie de princípio de simetria entre teorias contemporâneas e teorias do passado da ciência. O reconhecimento desta simetria implicou, segundo nossa interpretação, na construção de posições cautelosas a

---

respeito do sucesso das referências teóricas e em argumentações críticas a respeito do estatuto ontológico da ciência.

Um dos resultados mais interessantes foi a maneira como tópicos consensuais da Natureza da Ciência foram utilizados pelos alunos para a criação de percursos argumentativos sobre aspectos não-consensuais. Notamos que o caráter histórico e socialmente situado da ciência (que figura entre os *tenets* das Visões Consensuais), por exemplo, foi empregado como meio para se refletir sobre questões filosóficas subjacentes às mudanças e revoluções científicas. Em suma, por vezes os alunos usavam tópicos das Visões Consensuais como ponto de partida para pensarem questões controversas da NdC. Este resultado, apesar de periférico em nossa análise, abre a possibilidade de relativizarmos a crítica comumente feita às listas de Natureza da Ciência sobre seu caráter estanque. É razoável imaginar que quaisquer daqueles *tenets* possam assumir diferentes significados em diferentes contextos e objetivos educacionais. Pensamos que este resultado sugere a proficuidade do ensino de tópicos não-consensuais da NdC para a complexificação de conteúdos metacientíficos considerados, em geral, pacificados.

À guisa de conclusão, constatamos que o debate acerca do realismo científico, motivado pelos problemas impostos pela ocorrência de revoluções científicas do percurso histórico das ciências naturais, é passível de ser abordado, apesar de sua complexidade e falta de consenso entre epistemólogos e educadores. As linhas argumentativas nada triviais desenvolvidas pelos professores em formação, instigadas por uma abordagem guiada por questões abertas, como recomenda Martins (2015), demonstraram que o ensino de Natureza da Ciência pode transbordar seus conteúdos considerados consensuais, de forma a contribuir para a construção de visões críticas e sofisticadas acerca da ciência e das implicações filosóficas de seu desenvolvimento histórico.



# Referências Bibliográficas

ABD-EL-KHALICK, F., BELL, R. L., LEDERMAN, N. G. The nature of science and instructional practice: Making the unnatural natural. *Science education*, v. 82, n. 4, p. 417-436, 1998.

ABRANTES, P. **Imagens da natureza, imagens de ciência**. Campinas, Editora Papitrus, 1998, 247p.

ALLCHIN, D. Evaluating knowledge of the nature of (whole) *Science Education*, v. 95, n. 3, p. 518-542, 2011.

ALTERS, B. J. Nature of science: a diversity or uniformity of ideas?. *Journal of Resear*, v. 34 n. 10, p. 1105-1108, 1997.

ARAGO, F. Mémoire sur la vitesse de la lumière lu à la première Classe de l' Institut, 1853 [1810].

Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Educação. *Ética e pesquisa em Educação: subsídios*. Rio de Janeiro: ANPEd, 2019. 133 p.; v.1

BACHELARD, G. **A formação do espírito científico**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

BAGDONAS, A., GURGEL, I., ZANETIC, J. Controvérsias sobre a natureza da ciência como enfoque curricular para o ensino de física: o ensino de história da cosmologia por meio de um jogo didático. *Revista Brasileira de Histórica da Ciência*, v. 7, n. 2, p. 242-260, 2014.

BASSALO, J. M. F. A crônica da óptica clássica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 4, n. 3, p. 140-150, 1987.

BASSALO, J. M. F. Fresnel: O formulador matemático da teoria ondulatória da luz. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 5, n. 2, p. 79-87, 1988.

---

BASSALO, J. M. F. A crônica da ótica clássica (parte III: 1801-1905). *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 6, n. 1, p. 37-58, 1989.

BEZERRA, V. A. Maxwell, the field theory and the demechanization of physics. *Scientiae Studia*, v. 4, n. 2, p. 177-220, 2006.

BOYD, R. Scientific realism and naturalistic epistemology. In *PSA: Proceedings of the biennial meeting of the Philosophy of Science Association 1980*, n. 2, p. 613-662, 1984.

BRADING, K. CRULL, E. Epistemic structural realism and Poincaré's philosophy of science. *HOPOS: The Journal of the International Society for the History of Philosophy of Science*, v. 7, n. 1, p. 108-129, 2017.

BRANQUINHO, J., SANTOS, R. In *Compêndio em linha de problemas de Filosofia analítica*, 2014.

BROWN, S. C. The caloric theory of heat. *American Journal of Physics*, v. 18, n. 6, p. 367-373, 1950.

BRUSH, S. G. Should the History of Science Be Rated X?: The way scientists behave (according to historians) might not be a good model for students. *Science*, v. 183, n. 4130, p. 1164-1172, 1974.

BUCHWALD, J. Z. The quantitative ether in the first half of the nineteenth century. *Conceptions of ether: studies in the history of ether theories, 1740, 1900. Cantor and Hodge (1981)*, p. 215-237, 1981.

BUCHWALD, J. Z. The battle between Arago and Biot over Fresnel. *Journal of optics*, v. 20, n. 3, p. 109-117, 1989.

BUCHWALD, J. Z. Optics in Nineteenth Century. In *The Oxford handbook of the history of physics. OUP Oxford. (Eds.) Buchwald, J. Z., Fox, R.*, p. 445-472, 2014.

BUNGE, M. Teoria e Realidade, Tradução: GUINSBURG G. K., São Paulo, Perspectiva, 2008 [1981], 248 p.

BUNGE, M. **Caçando a Realidade: a luta pelo realismo**, Tradução Gita K. Guinsburg. 1 ed. São Paulo: Editora Perspectiva, p. 464, 2010 [2006].

- CANTOR, G. The reception of the wave theory of light in Britain: A case study illustrating the role of methodology in scientific debate. *Historical studies in the physical sciences*, v. 6, p. 109-132, 1975
- CARVALHO, A. M. P. Metodologia de Investigación en Enseñanza de Física: Una Propuesta para Estudiar Procesos de Enseñanza y Aprendizaje. *Revista de Enseñanza de la Física*, v. 18, n. 1, 2005.
- CASSINI, A., LEVINAS, M. L. Einstein's reinterpretation of the Fizeau experiment: How it turned out to be crucial for special relativity. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 65, p. 55-72, 2018.
- CHAKRAVARTTY, A. The structuralist conception of objects. *Philosophy of Science*, v. 70, n. 5, p. 867-878, 2003.
- CHAKRAVARTTY, A. Structuralism as a form of scientific realism. *International studies in the philosophy of science*, v. 18, n. 2-3, p. 151-171, 2004.
- CHANG, H. Thermal Physics and Thermodynamics. In *The Oxford handbook of the history of physics*. OUP Oxford. (Eds.) Buchwald, J. Z., Fox, R., 2014.
- CLOUGH, M. P. Teaching the nature of science to secondary and post-secondary students: Questions rather than tenets. In *The pantaneto forum* v. 25, n. 1, p. 31-40, 2007.
- CRAIG, W. Replacement of auxiliary expressions. *The Philosophical Review*, v. 65, n. 1, p. 38-55, 1956.
- CUPANI, A. **Sobre a Ciência: Estudos filosóficos da ciência**, Santa Catarina: Editora da UFSC, 2018.
- DARRIGOL, O. (1996). The electrodynamic origins of relativity theory. *Historical studies in the physical and biological sciences*, 26(2), 241-312.
- DARRIGOL, O. *Electrodynamics from Ampère to Einstein*, Oxford University Press, 2000.
- DARRIGOL, O. *A History of Optics from Greek Antiquity to the Nineteenth Century*, Oxford: Oxford University Press, 2012.
- DUTRA, L. H. A. **Introdução à epistemologia**, São Paulo, Editora Unesp, 2010, 192 p.

EFLIN, J. T., GLENNAN, S., REISCH, G. The nature of science: A perspective from the philosophy of science. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 36, n. 1, p. 107, 1999.

EINSTEIN, A. Ether and the Theory of Relativity. In *The genesis of general relativity*, p. 1537-1542. Springer, Dordrecht, 2007.

EL-HANI, C. N. Notas sobre o ensino de história da filosofia da ciência na educação científica de nível superior In: SILVA, C. C. (Org.) *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino* São Paulo, Livraria da Física. p. 3-22, 2006

de FORATO, T. C. M., PIETROCOLA, M., MARTINS, R. A. Historiografia e natureza da ciência na sala de aula. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 28, n. 1, p. 27-59, 2011.

FOX, R. The rise and fall of Laplacian physics. *Historical studies in the physical sciences*, v. 4, p. 89-136, 1974.

FOX, R. Laplacian Physics of Short-Range Forces. In *The Oxford handbook of the history of physics*. OUP Oxford. (Eds.) Buchwald, J. Z., Fox, R., p. 406-431, 2013.

FRANKEL, E. Corpuscular optics and the wave theory of light: the science and politics of a revolution in physics. *Social studies of science*, v. 6, n. 2, p. 141-184, 1976.

FRENCH, A. P. **Special Relativity**, New York: Norton, 1968.

FRESNEL, A. Lettre D'Augustin Fresnel à François Arago, Sur L'Influence Du Mouvement Terrestre, In *Fresnel, Augustin (1788-1827). Oeuvres complètes d'Augustin Fresnel, publiées par MM. Henri de Senarmont, Emile Verdet et Léonor Fresnel*. p. 1866-1870, 1818.

GALISON, P. Os Relógios de Einstein e os Mapas de Poincaré, Lisboa, Editora Gradiva, 2003, 396 p.

GOLDBERG, S. The Lorentz theory of electrons and Einstein's theory of relativity. *American Journal of Physics*, v. 37, n. 10, p. 982-994, 1969.

GAVROGLU, K. **O passado das ciências como história**. Porto: Porto Editora, 2007, 301 p.

GURGEL, I., WATANABE, G. A Elaboração de Narrativas em Aulas de Física : A Aprendizagem em Ciências como Manifestação Cultural, São Paulo: Livraria da Física, 2017.

- 
- HACKING, I. **Representing and intervening**, 1 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012 [1983].
- HANSON, N. R. Observação e interpretação. **Filosofia da ciência**, v. 3, 1975.
- HESSE, M. Truth and the growth of scientific knowledge. In *PSA: proceedings of the Biennial meeting of the philosophy of science association*, n. 2, p. 261-280. Philosophy of Science Association, 1976.
- HIROSIGE, T. Origins of Lorentz' theory of electrons and the concept of the electromagnetic field. *Historical studies in the physical sciences*, v. 1, p. 151-209, 1969.
- HIROSIGE, T. The ether problem, the mechanistic worldview, and the origins of the theory of relativity. *Historical Studies in the Physical Sciences*, v. 7, p. 3-82, 1976.
- HÖTTECKE, D.; SILVA, C. C. Why implementing history and philosophy in school science education is a challenge: An analysis of obstacles. *Science & Education*, v. 20, n. 3, p. 293-316, 2011.
- HUNT, B. **Os Seguidores de Maxwell**, Belo Horizonte: Editora UFMG, p. 396, 2015.
- IRZIK, G., NOLA, R. A family resemblance approach to the nature of science for science education. *Science & Education*, v. 20, n. 7-8, p. 591-607, 2011.
- JANSSEN, M., Stachel, J. *The Optics and Electrodynamics of Moving Bodies*, 2004.
- JANSSEN, M. *The drag coefficient from Fresnel to Laue*, 2013.
- JENKINS, F., WHITE, H. **Fundamental Optics**, 4th Edition, Barkeley: Custon Publishing, 2001.
- KARGON, R. Model and analogy in Victorian science: Maxwell's critique of the French physicists. *Journal of the History of Ideas*, p. 423-436, 1969.
- KUHN, T. **The Copernican Revolution: Planetary Astronomy in the Development of Western Thought**, Cambridge, Harvard University Press, 1992 [1958] 320p.
- KUHN, T. S. The caloric theory of adiabatic compression. *Isis*, v. 49, n. 2, p. 132-140, 1958.
- KUHN, T. S. **A estrutura das revoluções científicas**. São Paulo: Ed. Perspectiva, 1996.

- 
- KUHN, T. S. **A tensão essencial**. Editora UNESP, 2011 [1977].
- LABURÚ, C. E.; DE CARVALHO, M. A.; DE LOURDES BATISTA, I. Controvérsias construtivistas. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 18, n. 2, p. 152-181, 2001.
- LADYMAN, J. What is Structural Realism? *Stud. Hist. Phil. Sci.*, v. 29, n. 3, 1998.
- LAKATOS, I. History of science and its rational reconstructions. In *PSA 1970*(pp. 91-136). Springer, Dordrecht, 1970.
- LAUDAN, L. **Beyond positivism and relativism: Theory, method, and evidence**. Colorado: Westview Press. 277 p, 1996.
- LAUDAN, L. A confutation of convergent realism. *Philosophy of science*, v. 48, n. 1, p. 19-49, 1981a.
- LAUDAN, L. The medium and its message: a study of some philosophical controversies about ether. *Conceptions of ether: studies in the history of ether theories, 1740, 1900, Cantor and Hodge*, p. 157-185, 1981b.
- LAUDAN, L. Realism without the real. *Philosophy of Science*, v. 51, n. 1, 156-162, 1984.
- LAUE, M. Die Mitführung des Lichtes durch bewegte Körper nach dem Relativitätsprinzip. *Ann. Phys.*, v. 328, p. 989-990, 1907.
- LEDERMAN, N. G. Students' and teachers' conceptions of the nature of science: A review of the research. *Journal of research in science teaching*, v. 29, n. 4, p. 331-359, 1992.
- LEDERMAN, N. G. et al. Views of nature of science questionnaire: toward a valid and meaningful assessment of learners' conceptions of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 39, p. 497-521, 2002.
- LEDERMAN, N. G. Nature of science: Past, present, and future. *Handbook of research on science education*, v. 2, p. 831-879, 2007.
- LEPLIN, J. A novel defense of scientific realism. Oxford: Oxford University Press. 1997.
- LORENTZ, H. A. La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants, *Extrait des Archives Néerlandais des Sciences exactes e naturelles*, T.XXV., 1892.

- LORENTZ, H. A. Versuch einer Theorie der Elektrischen und Optischen Erscheinungen in *Bewegten Körpern* (E. J. Brill, Leiden), 1895.
- LUDKE, M., ANDRÉ, M. E. D. **A Pesquisa em Educação: abordagens qualitativas**. São Paulo: Ed. Pedagógica e Universitária. p. 128, 1986.
- LYOTARD, J. F. **A condição Pós-moderna**, Editora José Plympio, 2009 [1979].
- MARTINS, R. D. A. Introdução: a história das ciências e seus usos na educação. In SILVA, C. C. (Org.) *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino*. São Paulo: Editora Livraria da Física, p. 17-30, 2006.
- MARTINS, R. D. A. O éter e a óptica dos corpos em movimento: a teoria de Fresnel e as tentativas de detecção do movimento da Terra, antes dos experimentos de Michelson e Morley (1818-1880). *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 29, n. 1, p. 52-80, 2012.
- MARTINS, A. F. P. História e Filosofia da Ciência no ensino: Há muitas pedras nesse caminho... *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 24, n. 1, p. 112-131, 2007.
- MARTINS, A. F. P. Natureza da Ciência no ensino de ciências: uma proposta baseada em “temas” e “questões”. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 32, n. 3, p. 703-737, 2015a.
- MARTINS, R. D. A. A Origem Histórica da Relatividade Especial. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015b.
- MASSIMI, M. Perspectivism. In: SAATSI, Juha (Ed.). **The Routledge handbook of scientific realism**. Routledge, p. 164-175, 2017.
- MATTHEWS, M. R. History, philosophy, and science teaching: The present rapprochement. *Science & Education*, v. 1, n. 1, p. 11-47, 1992.
- MATTHEWS, M. R. Introductory comments on philosophy and constructivism in science education. In: MATTHEWS (Org.) **Constructivism in science education**. Springer, Dordrecht, 1998. p. 11-30. **Science & Education**, v. 6, n. 1, p. 5-14, 1998.
- MATTHEWS, M. S. Construtivismo e o ensino de ciências: uma avaliação. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 17, n. 3, p. 270-294, 2000.

---

MATTHEWS, M. S **Science teaching: The contribution of history and philosophy of science, 20th Anniversary Revised and Expanded Edition**. Londres: Routledge, ed. 2, 2014, 454 p.

MATTHEWS, M. R. Changing the focus: From nature of science (NOS) to features of science (FOS). In *Advances in nature of science research* (pp. 3-26). Springer, Dordrecht, 2012.

MAXWELL, G. The ontological status of theoretical entities, In *Philosophy of science: An historical anthology*. (Org.) MCGREW, T., ALSPECTOR-KELLY, M., ALLHOFF, F. John Wiley & Sons, 2001 [1962].

MAXWELL, G. Structural realism and the meaning of theoretical terms, 1970.

MCCOMAS, W. F. Ten myths of science: Reexamining what we think we know about the nature of science. *School Science and Mathematics*, v. 96, n. 1, p. 10-16, 1996.

MCCOMAS, W. F. The nature of science in science education. *Rationales and strategies*, 1998.

MCCOMAS, W. F. Seeking historical examples to illustrate key aspects of the nature of science. *Science & Education*, v. 17, n. 2-3, p. 249-263, 2008.

MCCORMMACH, R. HA Lorentz and the electromagnetic view of nature. *Isis*, v. 61, n. 4, p. 459-497, 1970.

MENEZES, R., LORDÊLO, F. Uma análise de experimentos de corpos em movimento no éter sob a perspectiva da teoria ondulatória da luz de Fresnel. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 41, n. 2, 2019.

MILLER, A. Albert's Einstein Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911). London: Addison Wesley Publishing Company, 1981.

MITCHELL, J. On means of discovering distance, magnitude of fixed stars, inconsequence of the diminution of the velocity of light, *Philosophical Transactions*, xxiv, p.35-57, 1784.

MOULINES, C. U. **O desenvolvimento moderno da filosofia da ciência (1890–2000)**, Tradução: Cláudio Abreu, 1 ed. São Paulo: Associação Filosófica Scientiae Studia. 2020. 272 p.



- MORAES, R. Uma tempestade de luz: a compreensão possibilitada pela análise textual discursiva. *Ciência & Educação (Bauru)*, v. 9, n. 2, p. 191-211, 2003.
- MORAES, R.; GALIAZZI, M. C. Análise textual discursiva: processo reconstrutivo de múltiplas faces. *Ciência & Educação (Bauru)*, v. 12, n. 1, p. 117-128, 2006.
- MOREIRA, A. B. N. Interpretando a relatividade especial: discutindo o debate realismo e antirrealismo científicos no ensino de ciências, 250f, (Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo). 2014.
- MORRIS, R. Lavoisier and the Caloric Theory. *The British Journal for the History of Science*, v. 6, p. 1-38, 1972.
- MOURA, B. A. Newton versus Huygens: como (não) ocorreu a disputa entre suas teorias para a luz. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 33, n. 1, p. 111-141. 2016.
- MOURA, B. A. As “Observações sobre luz e cores”(1756) de Thomas Melvill (1723-1756): tradução comentada. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 38, n. 1, p. 699-741, 2021.
- MUSGRAVE, A. The ultimate argument for scientific realism. In *Relativism and realism in science* 229-252. Springer, Dordrecht, 1988.
- NEWBURGH, R. Fresnel drag and the principle of relativity. *Isis*, v. 65, n. 3, p. 379-386, 1974.
- NIINILUOTO, I. **Critical Scientific Realism**. Oxford University Press. 1999.
- NOLA, R. Constructivism in science and science education: A philosophical critique. *Science & education*, v. 6, n. 1, p. 55-83, 1997.
- OSBORNE, J. F. Beyond constructivism. *Science education*, v. 80, n. 1, p. 53-82, 1996.
- PANCALDI, G. The Physics of Imponderable Fluids. In. BUCHWALD, J. Z., & Fox, R. (Eds.). *The Oxford handbook of the history of physics*. OUP Oxford, 2014.
- PATY, M. Endo-referência de uma ciência formalizada da natureza. **Estudos Avançados**, v. 6, n. 14, p. 107-141, 1992.
- PATY, M. *Matéria Roubada, A Vol. 08*. São Paulo: Edusp, 320 p, 1995.

- PATY, M. Einstein In *Figuras do saber vol. 22*. São Paulo: Editora estação Liberdade, 158 p, 2008.
- PEDUZZI, L. História de Ciência e Ensino de Física. In: Pietrocola (org) *Ensino de Física. Santa Catarina*: Editora UFSC, 2001.
- PEDERSEN, M. K. Water-filled telescopes and the pre-history of Fresnel's ether dragging. *Archive for history of exact sciences*, v. 54, n. 6, p. 499-564, 2000.
- PEREIRA, F. P. C.; GURGEL, I. O ensino da Natureza da Ciência como forma de resistência aos movimentos Anticiência: o realismo estrutural como contraponto ao relativismo epistêmico. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 37, n. 3, p. 1278-1319, 2020.
- PÉREZ, D. G. New trends in science education. **International Journal of Science Education**, v. 18, n. 8, p. 889-901, 1996
- PÉREZ, D. G., MONTORO, I. F., ALÍS, J. C., CACHAPUZ, A., PRAIA, J. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. *Ciência & Educação (Bauru)*, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.
- PIETROCOLA, M. *Mascart et L'optique de corps en mouvement*. (Tese de Doutorado em Epistemologie Et Histoire Des Sciences. Universite de Paris VII – Universite Denis Diderot, U.P. VII, França). 1992.
- PIETROCOLA, M. Fresnel e o arrastamento parcial do éter: a influência do movimento da terra sobre a propagação da luz. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 10, n. 2, p. 157-172, 1993a.
- PIETROCOLA, M. A Ciência Francesa e a Ótica dos Corpos em Movimento, *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, v. 13, p. 45-52, 1995.
- PIETROCOLA, M. Construção e realidade: o realismo científico de Mário Bunge e o ensino de ciências através de modelos. *Investigações em ensino de ciências*, v. 4, n. 3, p. 213-227, 1999.
- PIETROCOLA, M. A matemática como estruturante do conhecimento físico. **Caderno brasileiro de ensino de física**, v. 19, n. 1, p. 93-114, 2002.

---

PESSOA JR., O. O dogmatismo científico de tradição materialista. In SILVA, C.C. [Org.] **Estudos de História e Filosofia das Ciências, Subsídios para a aplicação no Ensino**. São Paulo, Editora Livraria da Física, p. 41-57, 2006.

POINCARÉ, H. O Valor da Ciência, Contraponto. 174 p, 1995 [1905].

POINCARÉ, H. A Ciência e a Hipótese, Brasília: Editora Universidade de Brasília. 184 p, 1984 [1902].

POINCARÉ, H. Sobre a dinâmica dos elétrons, In *Ensaio Fundamentais*, (Org.) Videira, A.P., Moreira, I.C. Rio de Janeiro: Editora Cotraponto: PUC, Rio. 2008 [1908].

POTIER, A. Conséquences de la formule de Fresnel relative à l'entraînement de l'éther par les milieux transparents, 1874.

POST, H. R. Correspondence, invariance and heuristics: In praise of conservative induction. **Studies in History and Philosophy of Science Part A**, v. 2, n. 3, p. 213-255, 1971.

PSILLOS, S. Is structural realism the best of both worlds?. *Dialectica*, v. 49 n. 1, p. 15-46, 1995.

PSILLOS, S. Scientific realism and the 'pessimistic induction'. *Philosophy of Science*, v. 63, p. 306-314, 1996.

PSILLOS, S. . Scientific Realism: How science tracks truth. Routledge. 368 p, 2005 [1999].

PSILLOS, S. Conventions and relations in Poincare's philosophy of Science. *Method-Analytic Perspectives*, v. 3, n. 4, p. 98-140, 2014.

PSILLOS, S. The realist turn in the philosophy of science. In *The Routledge Handbook of Scientific Realism*, Routledge, p. 20-34, 2017.

PUTNAM, H. Craig's theorem. *The Journal of Philosophy*, v. 62, n. 10, p. 251-260, 1965.

PUTNAM, H. What Is "Realism"?. In *Proceedings of the Aristotelian Society*, v. 76, p. 177-194. Aristotelian Society, Wiley, 1975a.

PUTNAM, H. The meaning of 'meaning'. *Philosophical papers*, v. 2, 1975b.

QUALE, A. Radical constructivism, and the sin of relativism. *Science & Education*, v. 16, n. 3, p. 231-266, 2007.

- 
- REDHEAD, M. The intelligibility of the universe. *Royal Institute of Philosophy Supplements*, v. 48, p. 73-90, 2001a.
- REDHEAD, M. Quests of a Realist. *Metascience*, v. 10, n. 3, p. 341-366, 2001b.
- ROBILOTTA, M. R. O cinza, o branco e o preto da relevância da história da ciência no ensino da física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 5, p. 7-22, 1988.
- ROMERO-MALTRANA, M. R. The ‘nature of science’ and the perils of epistemic relativism. *Research in Science Education*, p. 1-23, 2017.
- SAATSI, J. (Ed.) The Routledge handbook of scientific realism. Routledge, 2017.
- SARTON, G. Discovery of the aberration of light. *Isis*, v. 16, n. 2, p. 233-265, 1931.
- SCHAFFNER, K. F. The Lorentz electron theory of relativity. *American journal of Physics*, v. 37, n. 5, p. 498-513, 1969.
- SCHAFFNER, K. F. Nineteenth-Century Aether Theories. Pergamon Press, p. 99-127, 2011.
- SILVA, A. P. B.; MOURA, B. A.; MEDEIROS, T. R. M. As estrelas, a luz e os corpos escuros no século XVIII: uma tradução comentada de um artigo de John Michell (1724-1793), *Revista Brasileira de História da Ciência*, v. 13, n. 2, p. 320-334, dez 2020.
- SILVA, M. R. Realismo e anti-realismo na ciência: aspectos introdutórios de uma discussão sobre a natureza das teorias. *Ciência & Educação (Bauru)*, v. 5, n. 1, p. 7-13, 1998.
- SMART J. J. C. **Philosophy and Scientific Realism**, London: Routledge and Kegan Paul, 1963.
- SMART, J. J. Difficulties for Realism in the Philosophy of Science. *Studies in Logic and the Foundations of Mathematics*, v. 104, p. 363-375, 1982.
- SOUZA, E. A. D. Um estudo do argumento do milagre na defesa do realismo científico (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo), 2015.
- SLEZAK, P. Appraising constructivism in science education. In: **International handbook of research in history, philosophy and science teaching**. Springer, Dordrecht, p. 1023-1055, 2014.

STACHEL, J. Fresnel's (dragging) Coefficient as a Challenge to 19th Century Optics of Moving Bodies. In: *The Universe of General Relativity*. Birkhäuser Boston, p. 1-13, 2005a.

STACHEL, J. O ano miraculoso de Einstein: cinco artigos que mudaram a face da física (Org.) *John Stachel*, Rio de Janeiro, Editora UFRJ. 224 p, 2005b.

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.

TONNELAT, M. A. **Histoire du principe de relativité**, Paris, Flammarion, Éditeur, 1971, 568 p.

YOUNG, T. The Bakerian Lecture: Experiments and Calculations Relative to Physical Optics, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* n. 94, p. 1-16, 1804.

VAN FRAASSEN, B. The Irreality of Unobservable: Constructive Empiricism. *Readings in the Philosophy of Science: From Positivism to Postmodernism*, (Eds.) Schick, T. Jr., p. 267-272, 2000.

VAN FRAASSEN, B. **A Imagem Científica**, Editora UNESP. 376 p, 2006.

WHITTAKER, E. **A History of the Theories of Aether and Electricity: Vol. I**. Dublin University Press. 1951.

WILSON, D. George Gabriel Stokes on Stellar Aberration and the Luminiferous Ether. *The British Journal for the History of Science*, v. 6, p. 57-72, 1972.

WITTGENSTEIN, L. **Investigações filosóficas**, Tradução: José Carlos Bruni, São Paulo: Abril Cultura, 226 p., v. 46, 1975.

WORRALL, J. Structural realism: The best of both worlds?. *Dialectica*, v. 43, n. 1-2, p. 99-124, 1989.

VON GLASERSFELD, E. Cognition, construction of knowledge, and teaching. In: MATTHEWS (Org.) **Constructivism in science education**. Springer, Dordrecht, p. 11-30, 1998.

---

VON GLASERSFELD, E., **Radical constructivism: A Way of Knowing and Learning**. Routledge, 2003.

VOTSIS, I. **The epistemological status of scientific theories: An investigation of the structural realist account**. 238f. 2004. Tese de Doutorado. London School of Economics and Political Science (United Kingdom), 2004

VOTSIS, I. Structural realism: Continuity and its limits. In: **Scientific structuralism**. Dordrecht: Springer, 2010, cap. 6, p. 105-117.

ZANETIC, J. **Física também é cultura**. São Paulo, 1989. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado Em Educação) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo.

ZANETIC, J. Notas de Aula de Gravitação. Instituto de Física, Universidade de São Paulo.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE FÍSICA, INSTITUTO DE QUÍMICA, INSTITUTO DE  
BIOCIÊNCIAS E FACULDADE DE EDUCAÇÃO

A Ótica dos Corpos em Movimento sob a Visão do  
Realismo Estrutural: Questões não Consensuais de  
Natureza da Ciência na Formação de Professores

Felipe Prado Corrêa Pereira

APÊNDICES

São Paulo

2021





# **Apêndice A**

## ***Corpus de análise***

Neste apêndice, apresenta-se os documentos que compõem o *corpus* de análise.

## Parzival

### ATIVIDADE A

O que nos resta da Mecânica Clássica?

Foram várias as revoluções que a Relatividade trouxe para o meio científico, com sua publicação na primeira metade do século XX. Uma das principais foi a maneira completamente diferente de enxergarmos o espaço e o tempo, grandezas até então vistas como absolutas e que agora poderiam ser interpretadas de formas distintas, dependendo do referencial em que são analisadas entre dois certos eventos. Apesar disso, discutiremos que nem tudo o que antes era tido como “verdadeiro” se tornou obsoleto na Física.

Os pensadores anteriores à Einstein não estavam completamente “errados” aos pensar no espaço e no tempo como grandezas absolutas. Isso porque nas situações que lidamos no nosso cotidiano, essa ideia se aplica perfeitamente. Inclusive nos casos do nosso cotidiano, nas transformações de Lorentz, vemos que elas são exatamente iguais às definições de espaço e de tempo “clássicas”, como tanto estudamos em disciplinas como a Mecânica. Isso porque o “fator gama” da transformação seria igual a um nesses casos (pois a velocidade da luz ao quadrado seria muito maior do que qualquer velocidade do nosso cotidiano ao quadrado, fazendo com que o termo  $v^2/c^2$  tenda a zero), resultando em equações de movimento exatamente iguais às clássicas.

Expandindo um pouco mais para o questionamento acerca das concepções atuais de espaço-tempo, é muito difícil prever se elas se manterão com o passar dos anos e com o desenvolvimento da Ciência (afinal, se soubéssemos que mudariam, não poderíamos utilizá-las em estudos atualmente), todavia, é bom levar em conta que as formulações da Relatividade trouxeram avanços para uma área que por muito tempo foi “monopolizada” pela Mecânica Clássica (que ainda se aplica para alguns casos, como já dito), portanto é de se esperar que mesmo que ela possa apresentar limitações, ainda assim deve ser verdadeira para alguma situação que possamos vir a estudar (vale lembrar que, por exemplo, há pouco tempo foi pela primeira vez fotografado um buraco negro, com características muito similares com às previstas por estudiosos do campo da Relatividade).

A Ciência como um todo é construída a partir de diferentes pontos de vista. Nem mesmo a Mecânica Clássica que por séculos foi vista como a única verdade em estudos

---

do tipo se manteve como tal para sempre (aliás, até mesmo a Relatividade já apresentou suas limitações, especialmente nos estudos da área da Mecânica Quântica). Mesmo assim, até hoje é a Mecânica Clássica que decidimos apresentar primeiramente aos novos estudantes de Física (a palavra “construída” na primeira linha desse parágrafo não foi colocada à toa), tanto no Ensino Médio como no Superior.

A Relatividade ainda é uma teoria razoavelmente nova (comparando seu século de vida com os vários de dominância da Mecânica Clássica) e não é por menos que ela ainda continua a nos surpreender nos dias de hoje. Talvez esse status atual que ela possui não se mantenha nas próximas décadas e séculos, mas a inovação trazida no nosso modo de enxergar e interpretar o mundo é uma característica histórica, que com certeza ultrapassará as barreiras do tempo.

## **ATIVIDADE B**

### O QUE ESPERAR PARA O FUTURO DA CIÊNCIA?

Muito se debate hoje na sociedade sobre a veracidade dos estudos científicos. Afinal, o que é a Ciência? Será que o conhecimento científico é tão “confiável” e subjetivo como um dogma religioso? A Física já perpassou pelas teorias das mais concretas e duradouras, sendo uma delas a conceituação do Éter luminoso, que acabamos de estudar em aula.

Nos parece muito provável, hoje, que qualquer teoria vigente seja verdadeira e ponto. Mas é exatamente o mesmo pensamento que se tinha sobre o Éter há alguns séculos, a ponto de os estudos (em geral) na Física, o terem como um Norte, não focando no questionamento acerca de sua existência, mas sim adaptando todo o resto coexistir com o Éter.

No fim das contas, é o mesmo que fazemos, por exemplo, com a teoria atômica vigente. Não há como verificarmos de fato se o que temos como ideia de átomo seja verdade. Talvez nunca alcancemos essa certeza. Esse é o grande ponto: na minha opinião, a Ciência não nos traz uma verdade absoluta, mas sim uma tentativa de codificar o mundo à nossa volta em nosso limite lógico e biológico.

A Ciência é como um tradutor auxiliando em uma conversa entre pessoas que não compreendem o idioma que a outra fala. Mesmo que o tradutor tente passar a mensagem por trás da fala de alguém para outra língua, o significado completo das palavras pode não ser exatamente o mesmo. Ainda que se possa utilizar sinônimos para um melhor

---

entendimento entre as pessoas, alguns significados se perdem durante uma tradução (por aspectos culturais e sociais, além do aspecto puramente linguístico).

Não há como dizer se a Ciência traduz exatamente o que ocorre no universo, nas mais diferentes escalas. Isso porque ela está embasada no conhecimento de seres com aproximadamente 1,8 m de altura, inserido em um grupo de convivência específico (sociedade), em um local específico no universo e com grandes limitações em seus sentidos biológicos (e, conseqüentemente, limitações na significação de mundo).

Considerando o ambiente totalmente parcial em que estamos (em uma visão histórica da Ciência), é muito difícil determinar com certeza o que será das teorias atuais e se elas sequer resistirão ao amadurecimento da Ciência. O que podemos afirmar com certeza quase absoluta é que novas teorias surgirão ao longo dos anos, considerando que cada vez mais possuímos as tecnologias necessárias para investigar o universo devidamente (assim como um idioma sofre alterações quando entra em contato com outro).

É muito provável também que essas novas teorias alterem completamente nossa visão de mundo, mesmo que se mantenham as atuais teorias. É só tomar como exemplo a própria Relatividade, que não “desbancou” a Mecânica Clássica por completo, mas deixou bem claro as limitações que ela possuía (só consigo imaginar qual seria o sentimento de Newton e seus contemporâneos, se eles pudessem ter presenciado essa nova era da Física se construindo, mas suas ideias se mantendo).

Por fim, gostaria de ressaltar que acredito na Ciência sendo guiada pela procura por uma resposta definitiva sim, mas não creio que ela poderá alcançá-la algum dia. Seria muito audacioso de nós, como espécie, esperar entender tudo o que existe e nos circunda nesse universo, considerando todas as nossas limitações que, por si só, valeriam um texto completo.

---

## Art Vandelay

### ATIVIDADE A

Julgar concepções históricas sobre como o Universo se comporta não pode ser reduzido a dizer que eram certas ou erradas. A concepção newtoniana foi capaz de encontrar respostas a algumas das maiores questões de sua época (aqui, me refiro à época em que a concepção newtoniana perdurou, não apenas à época em que Newton viveu), como o problema das marés, o movimento dos planetas (embora nunca tenha funcionado para Mercúrio) e a descrição da balística, e, dentro da experiência limitada da época, dava conta de explicar quase tudo o que se conhecia. Isso parece ser o suficiente para se dizer que os cientistas pré-relativísticos estavam corretos dentro da realidade em que se encontravam. Outro ponto importante é que a Relatividade Restrita, para velocidades baixas, confirma os resultados newtonianos, embora traga consigo diferentes concepções sobre o Universo.

Além disso, conceitos clássicos como a conservação do momento, embora repaginados, foram mantidos pela Relatividade Restrita, o que mostra um caráter evolutivo da ciência no qual conceitos anteriores são necessários para a construção de novos conceitos. Quanto aos conceitos atuais serem abandonados, não tenho qualquer dúvida, eles serão. Não necessariamente todos, não necessariamente em breve, mas conceitos certamente serão abandonados ou, pelo menos, repaginados.

Comparando com a própria transição de Newton para Einstein, os físicos tiveram problemas em descrever a precessão da órbita de Mercúrio, em estabelecer uma velocidade de propagação da gravidade e em estabelecer a velocidade da Terra no éter. Todos esses problemas seriam resolvidos (ou jogados pela janela, no caso do éter) pela Relatividade, embora não tenham sido o caminho usado por Einstein para desenvolver a Relatividade.

Hoje, um dos grandes problemas dos físicos é juntar a Relatividade Geral com a Teoria Quântica de Campos. Essa dificuldade, além do fato de que essas duas teorias já possuem pilares epistemológicos que são, como o próprio Einstein colocou (apesar de discutir naquele momento Relatividade Geral e Mecânica Quântica), estranhos uns aos outros, deixa claro que uma mudança conceitual ocorrerá mais cedo ou mais tarde.

Não tentarei, porém, alegar que um conceito ou outro deve ser algum “conteúdo verdadeiro” que deve sobreviver ao tempo, já que isso seria tão arbitrário quanto parece ser em um primeiro momento a motivação do abandono do geocentrismo por Copérnico,

---

que se deveu não à presença dos epiciclos na descrição ptolomaica, mas à sua intenção de retornar ao ideal platônico das órbitas circulares. Porém, o conceito do heliocentrismo foi importante para discussões como a inércia e, evidentemente, as leis de Kepler, que acabaram por negar o próprio ideal platônico que motivou Copérnico.

Novas evidências devem surgir e nos fazer desconfiar de cada um de nossos conceitos mais básicos, e então devemos pensar em como encontrar novas evidências que confirmem ou refutem as conclusões às quais chegarmos. Afinal, por mais que a abstração seja um pilar essencial para o desenvolvimento do entendimento do Universo, de nada vai adiantar se essa abstração não encontrar um par real, e o experimento se torna indispensável nesse ponto. Essa é a grande crítica existente à Teoria das Cordas, cujos desenvolvedores ainda não encontraram maneiras de testá-la.

## **ATIVIDADE B**

A ciência parte de modelos. Isso significa que busca representações que possam esquematizar a natureza de modo que expliquem (e prevejam) resultados empíricos. Esses modelos são representações da natureza, e, assim como uma pintura de uma pessoa não é a pessoa, esses modelos não podem ser confundidos com a natureza em si.

Pode-se alegar que o fato de manipularmos as leis da natureza que conhecemos à nossa conveniência (ou seja, que desenvolvermos tecnologia) é uma evidência de que estamos corretos, mas, por mais que seja seguro dizer que estamos prevendo corretamente que algo vai acontecer, não há motivos para crer que sabemos exatamente o que é esse algo. Afinal, já se acreditou que elétrons fossem partículas com formas e posições bem definidas, e nem por conta disso tivemos problemas em tomar uso da corrente elétrica.

Isso não significa que não haja alguma verdade embutida nas nossas visões sobre o Universo. O fato é que é logicamente inconsistente acreditar que se chegou a uma versão final da verdade, já que não é possível saber o quanto não sabemos, embora seja possível notar que não sabemos de algo.

A respeito da possibilidade de precisarmos alterar radicalmente a nossa imagem de mundo, isso se mostra como uma possibilidade muito provável quando observamos a incompatibilidade existente entre Relatividade Geral e Teoria Quântica de Campos. Situação parecida ocorreu a respeito da Mecânica Clássica com Eletromagnetismo, que culminou no desenvolvimento da Relatividade Restrita.

Assim, notamos que algo precisa se alterar em nossa concepção de mundo, mas não o que precisa ser alterado. Einstein citou Hume como uma influência importante para que desenvolvesse a Relatividade Restrita, relatando que ler as ideias do filósofo foi importante para que desconfiasse da ideia de tempo e simultaneidade absolutos. Esses conceitos tão arraigados, não apenas na física, mas no próprio cotidiano, certamente não chegaram nem a ser objetivados como conceitos a serem analisados por muitos dos físicos que tentavam resolver os mesmos problemas que Einstein, de modo que servem como exemplo para evidenciar a dificuldade de precisar o que precisa ser alterado na tentativa de desenvolver um modelo que melhor se adapte às evidências.

Claro, não é necessário levar o pensamento de Hume às últimas consequências e condenar qualquer tipo de abstração, mas é necessário ter a sensibilidade de classificar o que é parte da realidade empírica e o que é parte de nossas abstrações, de modo que se possa apontar o dedo àquilo que está sujeito a ser suspeitas em caso de inconsistência entre teoria e experimento. O próprio Einstein teve dificuldades de passar por esse processo anos depois de desenvolver a Relatividade Restrita ao se deparar com a visão de Niels Bohr da Mecânica Quântica, que, para ser aceita, exige abandonar, por exemplo, a ideia de que elétrons realizam uma trajetória bem definida entre duas medições.

A respeito da possibilidade de um dia representarmos a natureza perfeitamente, independente de ser lógico percebermos isso quando acontecer, acredito que a melhor metáfora usada é a de aproximação assintótica, ou seja, nunca realmente chegaremos a uma resposta final, perfeita, mas sempre poderemos nos aproximar mais dessa realidade.

**Lucas Carvalho Pereira**

## **ATIVIDADE A**

Por muito tempo, acreditava-se que as leis da física se comportavam da mesma maneira em todo o universo. Por sua vez, o que chamamos hoje de física clássica ser toda a física. Essa visão foi rapidamente deixada de lado com os estudos da teoria da relatividade, que apresentou uma nova percepção das leis da física além da física clássica. Esse novo ramo da física, que hoje chamamos de física moderna, impulsionou novas descobertas e acabou se tornando um dos ramos mais interessantes do estudo da física.

Apesar de ter sido revolucionária e apresentar novos conceitos teóricos, a teoria da relatividade não inutilizou a física clássica. Pode-se dizer que o impacto da física relativística foi a apresentação de um novo contexto, e neste contexto alguns novos comportamentos são observados. A relação espaço e tempo, por exemplo, que se apresentam como independentes na física clássica tornam-se extremamente ligados dentro do contexto da física relativística.

Refletir sobre a relação da física clássica e moderna pode ajudar a entender um rumo possível para o conhecimento futuro. Essa relação mostra que por mais bem estruturada uma teoria científica seja, ela ainda esta sujeita a diversas mudanças e é com essas mudanças que novos horizontes são abertos para o avanço do conhecimento. Essas alterações conseguem mostrar o maior diferencial da ciência, a capacidade de admitir a ignorância. É difícil dizer o quanto do que sabemos é de fato verdade ou o quanto do que sabemos irá sobreviver ao tempo, mas é certo que erros e mudanças são inevitáveis e são essas mudanças e erros que permitem expandir os horizontes do conhecimento e nos permitem fazer novos avanços na ciência.



**Mauro Henrique**

## **ATIVIDADE A**

Quando tratamos da teoria da relatividade, sempre pensamos em uma teoria disruptiva com conceitos até então tidos como verdade absoluta no mundo científico, como a mecânica clássica de Newton. Porém, é errado dizermos que a teoria da relatividade afunda e coloca o as leis e teorias anteriores como inverdades ou fisicamente improváveis, mas sim, uma complementa a outra. A teoria da relatividade trouxe um grande avanço no entendimento do espaço e do tempo, até Einstein propor a sua teoria, compreendíamos o tempo e espaço como invariantes e conceitos distintos, porém após a relatividade proposta pelo cientista alemão, vemos o espaço e o tempo como uma única grandeza, o chamado espaço-tempo (sim, os físicos são muito criativos!). Essa grandeza nos traduz que o espaço e o tempo, agora são uma única grandeza e que se há um deslocamento muito rápido, podemos enxergar o tempo passando mais devagar, ou o espaço comprimido, muito bem retratada no paradoxo dos gêmeos, explicando: irmãos gêmeos nascem na Terra e um embarca em uma nave ou qualquer outro dispositivo capaz de viajar a velocidade próxima a da luz, e retorna a Terra. No seu retorno, verá que seu irmão que ficou na aqui na Terra, está mais velho que ele, então temos que em altas velocidades houve uma alteração no espaço-tempo, ou seja, o tempo não percorreu uniformemente para os dois referenciais. Este conceito, na física clássica, era impossível de acontecer, pois o tempo era invariante, ele passava em uma única dimensão apartada do espaço.

Mas apesar de tudo isso, não podemos dizer que os cientistas do passado estavam errados, pois eles possuíam pouco aparato tecnológico para propor e verificar uma teoria tão complexa e de difícil compreensão, como é a teoria da relatividade. Diante dos nossos olhos imprecisos podemos interpretar o mundo muito bem caso esqueçamos a relatividade, pois as velocidades em que alcançamos naturalmente na Terra em transporte, causa uma pequena variação apenas no tempo.

Podemos também trazer a discussão para um lado um pouco mais filosófico, o mundo é descrito assim como sua visão e interpretação própria, sendo que essa pode variar de acordo com as eras, exemplo na revolução agrícola, nossa visão de mundo e interpretação do mesmo, era de uma forma, comparando com a revolução industrial, tivemos uma outra forma de visualizar o mundo e interagir com ele, como bem explica as

interpretações realistas e positivistas, onde colocamos a teoria da relatividade como uma interpretação realista, como vemos o mundo em quatro dimensões, como de fato é, considerando o tempo como uma quarta dimensão. Já a mecânica clássica, vemos a interpretação positivista é disposta nesse caso, pois nela temos a visão e entendimento de que o mundo é aquilo que enxergamos e instrumentalizamos a grandeza.

Considerar o espaço e o tempo absolutos é algo que encontramos até mesmo no início do curso de Física, então faz parte da construção do conhecimento, construção do saber científico. Em ciência, temos também o método científico, onde temos alguns processos necessários para a criação de uma teoria, e enxergo que considerar o tempo e espaço absolutos, seja apenas uma etapa desse método científico, não podemos descartar e dizer que etapas desse processo está incorreta, caso a teoria se comprove correta, porém, no tocante da teoria da relatividade esse processo foi involuntário e duradouro.

Hoje a teoria mais aceita é a da relatividade, enxergamos hoje como a mais correta e adaptada a nossa realidade, porém, daqui a algum tempo podemos ter outra teoria em que descreva melhor o conceito de espaço-tempo, uma teoria que unifique completamente a mecânica clássica e relatividade com a mecânica quântica por exemplo. E assim como não podemos considerar os conhecimentos da mecânica clássica como errada, não podemos descrever a relatividade da mesma forma num futuro.

## **ATIVIDADE B**

Na ciência possuímos conhecimentos adquiridos ao longo de anos e anos de estudos e pesquisas de diversos cientistas, dos mais renomados, como Einstein e Newton, até os menos badalados como Heisenberg e Turing, muito conhecidos na comunidade científica, porém pouco falados na sociedade. Porém, todos eles têm em comum que suas grandes teses e teorias passaram pelo crivo do método científico para mostrar sua eficácia e existência. Quando falamos no Éter, temos uma teoria em que amplamente foi difundida nos séculos anteriores e até discutida por Newton, porém, como toda teoria científica que foi refutada, ela precisou passar por um processo de testagem e averiguação. No século XIX, nossas tecnologias e avanços científicos não foram suficientes para nos provar que a ideia de existir um material que permeava todo o universo, sendo o responsável pela força da gravidade e outras interações na matéria no espaço era uma ideia errônea, apesar de tudo, era uma teoria que fazia sentido à época.

Na atualidade, a ciência tem um conjunto de leis e teorias que regem o universo, o mundo como conhecemos e até estrelas a bilhões de anos luz de nós aqui na Terra, mas devemos tomar cuidado sobre dizer que esses conceitos são imutáveis, apesar do método científico e de algumas ideias e certezas de que, por exemplo, a teoria da relatividade é totalmente correta, é perigoso demais. Nós, como cientistas, devemos nos preocupar em sempre buscar a verdade baseado em evidências, porém, essas evidências podem variar de acordo com o método de observação e haja a necessidade de se reviver a teoria e reescrevê-la.

As próprias leis de Newton têm passado por verificações e correções, aproximações para casos gerais e casos específicos, é extremamente importante. Não devemos nos ater a alguma ignorância por deduzir que o que sabemos hoje, é certo e totalmente imutável. Devemos sempre buscar melhorar e explicar o mundo com mais fidelidade com a realidade ou a uma realidade que nos é mostrada, já que em muito que conhecemos hoje, são representações de um mundo que vemos, e o que a tecnologia atual nos permite enxergar.

O que a ciência explica e dissemina é exatamente essa visão que temos do mundo e universo ao nosso redor, porém é errado dizer que essa é a mais pura realidade e verdade, uma vez que teorias que antes eram aceitas por limitações no pensamento e/ou no método de verificação, passaram a ser refutadas na comunidade científica por estar incorretas e terem incoerências na sua formulação. Devemos, como cientistas, sempre buscar uma aproximação dessa chamada realidade e o que a natureza realmente é.

É impossível dizer que o mundo que conhecemos hoje será alterado, que conhecimentos, como relatividade ou buracos negros serão radicalmente alterados e substituídos por novos pois a ciência é uma evolução gradual e lenta, que uma alteração de ideias concebidas precisa de anos e anos de dedicação à estudo e acúmulo de conhecimento. Mas o que podemos dizer e afirmar como certeza, é de que a ciência sempre será mutável e sempre haverá um processo de metamorfose em ideias e leis já assumidas como verdade na ciência em geral.

---

**Dr. Martin van Nostrand**

**ATIVIDADE A**

Ao conhecer a história da ciência e, mais especificamente, a da física podemos visualizar e compreender seu desenvolvimento e funcionamento e entender como chegamos até a física que temos hoje. A ciência evolui de modo a explicar e compreender o melhor possível a realidade. Segundo Kuhn, há o período de ciência normal, onde a atividade científica se baseia no paradigma vigente, e a extraordinária, onde novos paradigmas entram em disputa porque o anterior se encontra em crise e não mais é suficiente.

Pensando nessa linha, dizer que os cientistas estavam enganados soa como um problema anacrônico, uma vez que, analisar do ponto de vista da época destes, não houve engano porque naquele momento aquela teoria era a que melhor compreendia seus fenômenos. Para nós, hoje, é um engano pensar o espaço e o tempo absolutos porque eles não o são na teoria da relatividade, que é nosso paradigma vigente; mas até pouco antes de Einstein, em que eram entidades absolutas nos paradigmas, não era um erro, pois tratá-las como era suficiente e aceito.

Assim como no passado tivemos diversas teorias que eram muito bem aceitas e foram “substituídas” por outras, as atuais muito provavelmente serão também – a ciência caminha dessa maneira –, até porque, pensar que não, nos leva a ideia de que a ciência está se aproximando do seu fim já que estaríamos muito perto da verdade sobre a natureza. Em relação a isso, pensando a ciência como um monólogo entre nós e a natureza, onde fazemos perguntas a ela e aguardamos respostas, ou mesmo pela analogia discutida por Rubem Alves no livro *Filosofia da Ciência*, onde os cientistas são pescadores e os métodos são anzóis, nossos resultados acabam por ser predeterminados por nossas teorias, estamos em busca de um peixe tal e vamos utilizar o anzol para pescar esse tipo de peixe que queremos.

Portanto, o que sabemos sobre a natureza depende de como pensamos e olhamos para ela, não descobrimos coisas novas com a intenção de descobrir coisas novas. Temos nossas bases teóricas, levantamos hipóteses acerca do que estamos pesquisando e usamos os métodos para obter respostas às nossas perguntas. As vezes pode surgir algo inesperado nas respostas, como algumas descobertas (por exemplo a do oxigênio), mas no geral, a resposta é à pergunta feita. Portanto, é como se olhássemos por fendas apenas, tendo ainda milhares de fendas no todo possíveis de se olhar, o que não me leva a crer no fim da ciência ou na proximidade com uma verdade absoluta.

Em relação a algum “conteúdo verdadeiro” que sobreviva no tempo, talvez sim, porque, novamente olhando para o passado, alguns paradigmas incorporavam elementos de paradigmas anteriores, como, por exemplo, o copernicano que trouxe elementos do ptolomaico e até mesmo de outros mais antigos, então pode ser que no futuro a concepção einsteiniana seja substituída por uma que traga algumas de suas ideias, como o espaço e o tempo relativos. O complicado é pensar em “verdadeiro”, porque a concepção de verdade me é um tanto complexa.

A fim de conclusão, tomei como base o que aprendemos na disciplina sobre a história da gravitação para reflexão e um certo posicionamento acerca dos questionamentos levantados e com isso acredito que nosso conhecimento hoje é totalmente passível de mudança porque os paradigmas mudam e defendo que os cientistas não cometeram enganos, ao menos não em sua época. Se um dos papéis da História é estudar o passado para lidar com o futuro, imagino que com a História da Ciência seja o mesmo e por isso minhas reflexões partiram desse contexto.

**Rubi**

## **ATIVIDADE A**

Ao longo da história os seres humanos procuravam entender a natureza, pois além de descobrir uma maneira de como ela funcionava, a partir disso também seria possível desenvolver tecnologias que beneficiariam a própria existência.

É curioso pensar que os pensadores ao longo do tempo tinham mais de uma formação, como: filósofos, matemáticos, físicos, astrônomos. Isso mostra a relação única que tinham com a natureza e a forma que iriam enxergá-la. Mas para além disso, deve-se considerar a pluralidade e contexto em que cada um deles viveram, pois a partir disso foi possível pensar a funcionalidade da natureza dentro do mundo vivenciado.

Assumir que os cientistas estavam fundamentalmente enganados sobre a natureza do espaço e do tempo, é desconsiderar o contexto do qual eles estavam vivenciando no momento. Copérnico, e posteriormente Galileu, já foram “ousados” demais em desenvolverem uma ideia que era completamente contra ao que a igreja acreditava, tanto que isso custou a vida de Galileu. Para além do contexto, têm as ideias que já eram existentes, cada cientista colaborou para a criação e inovação das teorias que em determinado momento do tempo elas encaixavam bem para explicar ideias sobre o espaço e o tempo.

Albert Einstein é um ótimo exemplo disso, somente a partir do contexto que ele vivia pós Revolução Industrial que foi possível ele pensar no tempo com outra funcionalidade, afinal, de fato a função do tempo viera a mudar com as indústrias.

As relações sociais no espaço impactam diretamente na produção de conhecimento, uma vez que este depende dos conhecimentos que já são produzidos ao longo do tempo. E aqui cabe um trocadilho sobre o espaço e o tempo, pensar essas duas entidades no sentido físico e social demonstram e desenvolvem contextos diversos.

O universo é tão imenso que até o momento conhece-se somente o observável, e essa observação se ampliou ao longo do tempo, ampliação essa que se deve às conjunturas de conhecimentos e tecnologias que foram desenvolvidas justamente pelos conceitos e teorias científicas. Por mais que ao longo do tempo esses conceitos sofreram inovações, há um conteúdo verdadeiro nisso: a matemática. A matemática que envolve esses conceitos são cálculos que perduram até a atualidade e continuarão se perdurando no tempo. E para além da matemática contida nessas teorias e conceitos científicos, a

própria trajetória de cada cientista seguido de suas respectivas descobertas e contribuições para a ciência e entendimento da natureza, sobreviverão no tempo, sempre serão lembradas pela ciência, pois fazem parte da linha do tempo da história humana.

Hannah Arendt em “A Condição Humana (1958)”, traz o conceito de mundo como algo que sobrevive no tempo, ou seja, o mundo é algo comum a todos que já nasceram e morreram, linha direta entre passado, presente e futuro. E é nesse mundo comum a todos que estão todos esses pensadores, cientistas, teorias e conceitos científicos. Comemora-se os 100 anos da Relatividade de Einstein, que trouxe uma nova ideia sobre a compreensão do universo, mas essa só foi passível de ser desenvolvida devido aos questionamentos de Einstein sobre o espaço absoluto de Newton, e o tempo nas indústrias na época em que vivia. Não é possível apagar o passado, o tempo sempre fará com que a história seja lembrada no futuro, não importa quais novas descobertas sejam feitas.

## **ATIVIDADE B**

Os seres humanos buscaram entender a natureza a partir de seus contextos e observações da mesma, e ao longo do tempo foram desenvolvendo ideias que pudessem explicar através de métodos aquilo que estavam observando. Mas assim como qualquer coisa de novo, é difícil decifrar e descobrir quais leis regem a natureza e o universo, o que gerou ideias novas que foram sendo superadas por outras.

A ideia de éter surgiu para explicar a perfeição dos astros no sistema sublunar aristotélico, ou seja, toda a matéria que criara essa perfeição foi chamada de éter. Essa ideia perdurou por um bom tempo, em que outros cientistas usaram dessa teoria para explicar outros fenômenos. Mas o tempo passa, e com ele se vai essa ideia.

Um exemplo disso, foi a teoria ondulatória da luz proposta por Fresnel (1788-1827), trazendo o cálculo da intensidade da luz a partir do movimento mecânico realizado pelo éter. Fresnel criou cálculos para explicar essa ideia, que posteriormente foram utilizados por James C. Maxwell (1831-1879) e Heinrich Hertz, mas a teoria da Relatividade Restrita de Einstein chegou para mudar tudo.

Os cálculos de Fresnel até hoje são conhecidos como corretos, mas não dentro do contexto que ele imaginou. E ao longo da história do desenvolvimento da ciência para explicar a natureza sobre o que não se sabe, as teorias foram renovadas ou deixadas de serem usadas, assim como a teoria do éter.

A partir dessas mudanças, surgem questionamentos se a ciência consegue ler a natureza exatamente como ela é, se tenta se aproximar dessa leitura, ou se sempre essas leituras serão superadas. Se for julgar com base no que já ocorreu no passado, a leitura da ciência sobre a natureza sempre pode mudar, seja por justificativa de já terem ocorrido essas mudanças antes, ou pelo simples fato de que surjam pessoas que pensem diferente do que já está estabelecido e consiga virar o jogo sobre isso, assim como fez Einstein.

A ciência avança com a descoberta de novas tecnologias, e essas novidades podem propiciar uma nova leitura da natureza e do universo, mas não quer dizer que o que existia anteriormente não seja verdade. De uma certa forma, tudo que veio antes pôde explicar fenômenos que não eram explicados na época, e apenas através do exercício de trabalhar com a ciência e reconhecer outras ideias que essas puderam se desenvolver e entrar para a história. Reconhecer esse trabalho, é dar confiança aos processos de desenvolvimento e criação de ciências que irão beneficiar não só a explicação sobre o mundo, mas também sobre o convívio dos seres humanos na Terra e no universo. E mais, reconhecer essas mudanças é também dar espaço para que outras pessoas possam desenvolvê-las, pois cada indivíduo é único e plural, como diz a autora Hannah Arendt em “A Crise na Educação (1961)”, que a ruptura surge com a natalidade, em que cada ser é único e plural podendo-se criar histórias únicas na linha do tempo.

Portanto, pode ser que o que conhecemos hoje não faça mais sentido daqui há alguns anos, mas é importante lembrar que pessoas únicas fizeram parte desse processo de descobertas sobre como funciona a natureza, e essas descobertas farão parte da história lembrando a todos que as rupturas são importantes para permanecer evoluindo.



**Marcos Henrique**

### **ATIVIDADE A**

Falando sobre paradigma, devemos, a princípio, considerar o tempo em que ela é/está inserida, ou, de certo modo, aceita. Não podemos cair no erro de desprezar o momento histórico e toda a conjuntura que envolve os conceitos centrais de tal paradigma. A partir disso, devemos analisar, também, as possíveis tecnologias existentes e se está ou não à disposição dos cientistas e da sociedade como um todo. Outro ponto importante no que tange essa temática, é a quantidade de conhecimentos produzidos até então, o que permite o cientista em ação, ser, cada vez mais embasados em suas práticas. Por fim, uma última consideração, mas não menos importante, qual o tamanho da liberdade em que esse cientista vive, isto é, ele pode citar, sem represálias, tudo aquilo que ele estudou? Pode ele divulgar todos os resultados que ele encontrou, todas as descobertas que ele fez? Traçando essa linha de partida, podemos dar início à construção das respostas para as seguintes questões propostas:

*“Podemos dizer que, por séculos, os cientistas estavam fundamentalmente enganados sobre a natureza do espaço e do tempo? Ou será que, em alguma medida, estavam corretos em considerá-los absolutos? Você acha que os atuais conceitos e teorias científicas serão abandonados no futuro? Ou existe neles algum “conteúdo verdadeiro”, que deve sobreviver ao tempo?”.*

Contextualizando a discussão, os paradigmas em questão são os construídos por Newton e por Einstein. O primeiro, afirma que o tempo e o espaço são absolutos e não sofrem dependência um do outro. Um seria o local onde os fenômenos ocorrem e o outro a passagem invariável que era o compasso para as realizações de ações em geral. Por outro lado, o segundo considera que o tempo e o espaço devem ser vistos como uma coisa só, e apaga a característica de absoluto, implementando o caráter relativo das medidas em dependência do referencial.

Primeiramente, não devemos atribuir adjetivos depreciativos para os paradigmas que foram contestados e “substituídos” por novos; nem tão pouco, inseri-los em caixas de “inferiores” em relação ao seu próximo. Portanto, os cientistas acreditavam em algo que viram e estudaram a partir de sua perspectiva, usando a tecnologias vigente na época e a liberdade que lhe era dado. Isto é, quando o sistema da física newtoniana estava sendo aprimorado e colocado em prática para toda sociedade, os cientistas envolvidos estavam corretos em seus pontos de vista. O que não anula o assertivo pensamento seguinte, que viria a ser uma concepção relativista. Em relação ao futuro dos conceitos considerados,

hoje, corretos, é inevitável uma evolução. Os tempos já são outros, o avanço científico e tecnológico que a sociedade alcançou não se compara aos dos tempos de um passado-recente. O Investimento feito nessas áreas de estudo e pesquisa, bem como a liberdade de se dialogar sobre conhecimento e novas descobertas são diametralmente maiores. E, portanto, não se entende um avanço do recente como um sinônimo de desqualificação do outro. Pelo contrário, somente pôde chegar a tal nova descoberta, pois, no processo, foi considerado o antigo.

Em resumo, não devemos dizer que cientistas estavam enganados em relação a algo, sendo que vivemos muito a frente de seu tempo e em contexto totalmente divergente do deles. O processo de descobertas científicas e de respostas é de inúmeras construções e reconstruções de conceitos. E em relação ao universo dos conceitos Espaço-Tempo não é diferente. Acredito que nenhuma visão está completamente verdadeira no elementar, mas, por outro lado, estão corretas em relação ao contexto que são inseridas. E assim acontecerá com a próxima construção.

Não **se** houver, mas **quando** houver uma próxima.

## **ATIVIDADE B**

É de extrema importância nomear e construir uma imagem dos objetos de difícil imaginação e visualização, ainda que muito desproporcional. Essa objetividade auxilia na compreensão da sociedade frente ao evento, buscando se aproximar do real.

A grande responsável? A Ciência. É ela que é responsável por procurar respostas, e, até mesmo sintetizá-las. Encontrando, deste modo, um mecanismo capaz de amenizar a complexidade do mundo e, por consequência, a complicada apreensão de objetos tão minuciosos. A Ciência, conforme o tempo avança, as tecnologias evoluem, a sociedade à respeito e colhe os benefícios dessa atitude, opta por desvendar o mundo e seus fenômenos. Todas as áreas do conhecimento enfrentam esse contratempo, e fazem o uso de objetos não observáveis. Esses objetos são encarregados de erguer pontes entre o entendimento do mundo natural e seus eventos com a imaginação ativa e concreta dessas respostas.

Como já mencionado, o contexto científico e tecnológico representa e administra o quão perto estamos da Real verdade do conteúdo das respostas encontradas. Os avanços em pesquisa apontam que os cientistas investigam as perguntas da humanidade

de maneira excepcional, dedicados a produzir conhecimento e, como sequela, transcrevê-lo utilizando alegorias.

Com o passar das décadas e o nascimento de novos gênios, as alegorias mudam seus conceitos, pois, como qualquer peça da humanidade, há necessidade de adaptação. Diversos são os motivos para essa alteração: releitura da realidade; percepções divergentes; novas variáveis para um mesmo episódio etc. Por outro lado, a finalidade dessa modificação é única: manter a visualização das respostas. Se é verdade que todas essas deformações promovem uma melhor degustação da realidade, o que se estabelece hoje, por conceito, irá se deteriorar, rastreando a permanência dessa compreensão.

O éter está presente na história da Ciência há muitos anos. Sua existência é vital para fundamentar teses de eventos da realidade que não conseguimos observar com precisão.

Como dito, todos esses objetos utilizados para fabricar uma imagem que confeccione uma melhor assimilação do mundo, sofrem quedas e reconstruções, com o artigo “Éter” não foi diferente. Sua importância está registrada para todo sempre na incrível busca por explicações.

A Ciência está mais do que apta a ser a melhor das representantes da sociedade em eficácia para esclarecer os questionamentos da vida. Entretanto, é inevitável que essas respostas mudem, e seus objetos, também. Ou seja, é necessário, que para a finalidade da existência desses objetos se preserve, sua alteração seja periódica. Isto é, as entidades, hoje, fixadas, estão altamente vulneráveis. O Universo avança, quanto mais respostas encontradas, mais indagações a sociedade produz. Essas entidades, portanto, tem como missão servir e cumprir seu papel, correndo o risco de serem mortas ou recriadas.

## Ártemis

### ATIVIDADE A

“O tempo sabe de tudo e nós não sabemos o que o tempo sabe”

A natureza do espaço e do tempo sempre foi objeto de estudo para muitos grandes nomes da ciência, desde os gregos, como Aristóteles, passando pela Idade Média com Galileu e finalmente, na modernidade com Einstein, esse que criou uma teoria que revolucionou completamente o modo como enxergamos o mundo. No entanto, devemos afirmar veementemente que os antigos estudiosos estavam fundamentalmente enganados sobre suas conclusões teóricas acerca do espaço e do tempo?

Devemos admitir que toda a história da ciência, desde os primeiros estudos se equivocaram em suas conclusões sobre a natureza?

A minha resposta para essa questão é, definitivamente, não. Por mais que a Teoria da Relatividade aparente ser inovadora, eu penso que ela não é tanto assim, afinal segundo o próprio Albert Einstein, “  *você entende a relatividade quando vê que uma hora com a sua namorada parece um minuto, e um minuto sentado num formigueiro parece uma hora* ”, isso se aplica a muitas situações do nosso dia a dia, quando nós passamos por situações difíceis e dolorosas, obviamente, um minuto parece uma eternidade, e em situações agradáveis o tempo passa muito rápido, ou seja, o tempo é realmente relativo. Em resalva, o que eu quero dizer com isso é que as coisas já funcionavam assim antes mesmo do Einstein publicar essa teoria, o mundo sempre funcionou assim (deixando claro que estou falando apenas no contexto do meu texto, eu entendo perfeitamente que a teoria do Einstein tenha sua base matemática e graças a ele, conhecemos a famosa equação  $E = mc^2$ ).

Nessa perspectiva, outro paradigma foi no período da Revolução Industrial do século XVIII, fase em que os donos das grandes indústrias consideravam que “  *time is money* ” (tempo é dinheiro), quanto menos tempo você gastar, mais produzirá, conseqüentemente, gerará mais dinheiro, mas isso na visão dos donos das indústrias, claro, porque sob a ótica dos trabalhadores, a realidade era outra, o trabalho era árduo e de longa jornada, eles (homens, mulheres e até mesmo crianças) chegavam a ficar mais de 18 horas trabalhando sob condições precárias, portanto, ao contrário do pensamento dos seus chefes, o tempo era seu maior inimigo.

Ademais, respondendo às questões subsequentes, eu acredito sim que muitos conceitos que conhecemos hoje e adotamos como verdade serão abandonados no futuro, mas não serão esquecidos, e acredito também que eles serão substituídos por uma outra verdade que ainda não foi descoberta. Nesse sentido, o meu embasamento teórico para responder a esse indagamento, se deve a uma análise cronológica da linha do tempo dos eventos científicos já ocorridos outrora. Na lógica da física aristotélica na Grécia Antiga, por exemplo, os quatro elementos, fogo, água, vento e terra compunham tudo que existia no planeta Terra e o que se observava no céu era composto pela quintessência, o éter. Com o avanço da ciência, foram sendo criadas novas teorias, os antigos postulados foram sendo reformulados, analisados e enfim, hoje em dia sabemos que tudo o que existe no Universo é composto de átomos, e esses átomos por sua vez, também são compostos de outras pequenas partículas, denominadas elétrons, prótons e nêutrons, esses dois últimos por sua vez são constituídos de partículas menores ainda: os quarks e os quarks também são constituídos de outras pequenas partículas e assim por diante.

Mas voltando ao assunto, podemos perceber que nós de fato abandonamos o conceito de Aristóteles e o substituímos pelo conceito de modelo atômico, mas isso não significa que esquecemos das contribuições de Aristóteles para a ciência, muito pelo contrário, graças a ele seus sucessores podemos desfrutar de tudo o que desfrutamos hoje, inclusive, a própria Teoria da Relatividade não obstante, sabemos então que o tempo é relativo, tanto na Teoria de Einstein, quanto na vida, em situações do cotidiano. Então, eu não posso simplesmente afirmar se alguma teoria científica sobreviverá aos efeitos do tempo ou se tudo permanecerá como está. Mas eu acredito vigorosamente no avanço científico, afinal, compreender a natureza é deveras complicado e o homem ainda precisa aprender e desvendar muitas coisas. Pensando nisso, eu acredito enfaticamente na capacidade de investigação e de raciocínio lógico do ser humano, e a única forma de adquirir novos conceitos científicos, (como pode-se perceber pelo exemplo dos antigos nomes da ciência, citados nos parágrafos acima), é com a evolução dos conceitos mediante o passar do tempo. O que me faz pensar, baseada pela Teoria da Relatividade, que o tempo sabe de tudo, portanto, apenas o tempo onisciente pode nos mostrar a verdade, só o tempo saberá o que acontecerá no futuro. Uma pena que nossa vida seja curta demais para sabermos a verdade, diferente do tempo, que é belo, sábio e eterno...

## **ATIVIDADE B**

Na lógica da física aristotélica, o Universo era composto por 4 elementos primordiais (água, ar, fogo e terra) e um quinto elemento, a *quintessência*, ou simplesmente, o éter. Para Aristóteles, o éter era uma substância pura que preenchia todo o espaço celeste existente no macrocosmo. Além dele, outros pensadores também discutiram sobre a composição do mundo que conhecemos. Por exemplo, na concepção do filósofo natural Demócrito de Abdera, todas as coisas existentes na natureza, eram constituídas de uma infinidade de partículas pequenas, invisíveis a olho nu, imutáveis e eternas. Essa discussão sobre “do que são feitas todas as coisas”, perdurou por muitos anos na história da física, especialmente entre os séculos XIX e XX, então, para responder às **perguntas solicitadas** no enunciado, vamos analisar mais a fundo esse contexto.

Primordialmente, devo ressaltar que nada na ciência é tão verdadeiro que possa ser considerado um conceito absoluto ou uma verdade irrefutável, afinal, a ciência está em constante evolução, sempre ascendendo e enriquecendo. Assim sendo, um matemático do século XVII chamado Johann II Bernoulli resolveu retomar os ideais do sistema de mundo aristotélico e realizou uma experiência sobre a propagação da luz, que inclusive, recebeu um prêmio da Academia de Paris. Nesse experimento, o matemático considerava que o éter, na verdade, seria um fluido contendo um grande número de vórtices excessivamente pequenos. Esses pequenos vórtices empurram os corpúsculos sempre que o éter é perturbado, uma fonte de perturbação é a luz, por conta disso, a luz produz propagação de oscilações no éter. Esse experimento de Bernoulli se parece bastante com o experimento de Maxwell para ondas eletromagnéticas.

Após o Bernoulli, vieram muitos outros experimentos tentando provar a veracidade da *quintessência*, em especial o experimento de Michelson-Morley no século XIX. Esse experimento é extremamente famoso, pois consistia em comparar a velocidade da luz de dois modos distintos. Para isso, eles construíram um aparato em que a luz seria lançada em direções perpendiculares em uma tentativa de capturar algum movimento relativo da matéria por intermédio do éter luminífero (um meio elástico hipotético, passível da propagação de ondas eletromagnéticas). Com esse experimento, eles concluíram que não há diferença entre a velocidade da luz no éter e no sentido perpendicular a ele.

Ademais, é importante enfatizar que mesmo após tantos experimentos sobre a natureza do éter ou sobre a natureza dos átomos (como os experimentos de Rutherford-Bohr) não podemos afirmar se eles realmente existem na natureza. Porque da mesma forma que para os aristotélicos o éter era uma verdade, para nós, os átomos são uma verdade. É evidente que existe a possibilidade de daqui a alguns anos, os cientistas do futuro descobrirem outros tipos de variações da natureza da matéria. Nesse mesmo

hiato, o filósofo alemão Friedrich Wilhelm Nietzsche em sua obra “Humano, Demasiado Humano” fala algo que se encaixa perfeitamente nesse assunto: “ *não existem fatos eternos: assim como não existem verdades absolutas* ”, ou seja, nenhum tipo de conhecimento é inalterável, a ciência que conhecemos hoje, pode sofrer drásticas alterações em um breve futuro.

Em ressalva, acredito que tenha ficado explícita a minha resposta para a segunda pergunta. Afinal, a ciência é capaz de “pintar o mundo” como ele realmente é, ou pelo menos, pintá-lo de maneira cada vez mais fiel? Ou será que a imagem de mundo que temos será radicalmente alterada, como já aconteceu tantas vezes no passado? A minha elucidação para isso se baseia em dois argumentos: o primeiro deles é que, através da observação de toda evolução dos conceitos científicos, e mediante o estudo de todos os experimentos, teorias, cálculos e leis criadas tanto na história da física clássica tanto na história da física moderna, eu não tenho como afirmar se realmente estamos sendo fiéis a natureza do universo, só quem pode afirmar isso é o tempo, mas levando em consideração o passado, aparentemente, estamos caminhando para uma evolução bastante interessante. O segundo argumento é que, como já foi falado nos parágrafos supracitados, a ciência não é absoluta, ela é perfeitamente passível de alterações e mudanças, então, apesar de estarmos tendo uma evolução pertinente, pode ser que daqui alguns anos tudo se altere radicalmente sim, saliento novamente que a ciência está sempre se renovando com novos experimentos, estudos e teorias.

**Maristela Leite**

## **ATIVIDADE B**

O que diferencia os seres-humanos dos demais primatas e espécies é a curiosidade e capacidade de descrever e interpretar certos fenômenos. Desde os primórdios, nós buscamos entender a natureza, saber o que são as coisas ao nosso redor, de onde viemos, pra onde vamos, etc.

Com toda essa curiosidade fomos capazes de desenvolver teorias das mais diversas áreas. Conseguimos entender o funcionamento das estações do ano, dos animais, dos astros e até de nós mesmos. Porém, nem tudo o que conhecemos hoje era conhecido a alguns anos ou séculos atrás. Para chegar onde chegamos, muita coisa precisou ser feita, muito estudo, experimentos, erros e acertos.

Um dos exemplos de objetos que passou por muitas modificações na sua teoria até chegar ao que temos hoje é o átomo. Desde a doutrina filosófica “Atomismo”, cujo os quatro sólidos geométricos representavam os quatro elementos fundamentais: o Tetraedro que representava o fogo, o Octaedro que representava o ar, o Icosaedro que representava a água e por fim, o Cubo representando a terra, até o modelo atômico mais atual se passaram se cerca de 25 séculos. Isso tudo demonstra a complexidade da natureza e mostra que não é do dia pra noite que se desenvolve uma teoria.

Os átomos realmente existem na natureza e com os aceleradores de partículas conseguimos entender muito mais sobre eles. Conforme a ciência avança, vamos cada vez mais conhecendo os pequenos detalhes dessa unidade básica de matéria. Passamos por diversos modelos atômicos, desde uma bolinha maciça proposta por Dalton, até o modelo atual, com subdivisões como os prótons, neutros, glúons, quarks, etc. Acredito que não iremos parar por aí, acredito que não está consolidado em escalas menores o que é um átomo e os elementos que o compõe, acredito que a ciência ainda tem muito a descobrir sobre esse pequeno “objeto”.

Como já foi citado, a ciência e o entendimento da natureza passaram por diversas modificações ao longo dos anos e muito provavelmente as coisas continuaram mudando. Não acredito que haverá mudanças radicais que mude totalmente a nossa maneira de ver o mundo de hoje, muitas áreas do conhecimento já estão bem estabelecidas. Caso o que conhecemos como ciência hoje não fosse real, muita coisa que fazemos não seria possível, como por exemplo: erguer prédios, aviões, curar doenças, pousar um foguete na lua, enfim, tudo isso não seria possível se estivéssemos totalmente errados. Mas, acredito



sim que muitas descobertas ainda estão por vir. Ainda existe muitas questões sem respostas e a cada descoberta, a cada enigma resolvido, uma nova pergunta se forma, assim é a ciência. Ainda precisamos saber mais sobre a origem do universo, sobre a existência de outros universos, sobre a possibilidade de vida inteligente fora da terra, etc.

Portanto, acredito que a ciência nunca será capaz de responder todas as perguntas e de “pintar” fielmente o mundo como ele o é, acho que esse nem é o papel dela. Acredito que aos poucos ela chega próximo do que realmente o universo é, mas nunca será o suficiente. Costumo dizer que a ciência é como uma Hidra, sempre que uma pergunta é respondida, outras duas aparecem em seu lugar.

**Teodorov**

## **ATIVIDADE A**

A veracidade dos conhecimentos científicos produzidos no passado acerca do tempo e do espaço nos dias de hoje

“Existem muitas hipóteses na ciência que são erradas. Isso é perfeitamente correto; elas são a abertura para descobrir o que é certo. A ciência é um processo auto-corretivo. Para serem aceitas, novas idéias devem sobreviver aos mais rigorosos padrões de evidência e escrutínio.” — Carl Sagan

Quando se trabalha com a Física, mais especificamente, com mecânica, significa quase que automaticamente que estamos trabalhando também com referenciais. Tudo é relativo, mas só descobrimos que isso é verdade há poucas décadas. Podemos dizer, por exemplo, que o monte Everest, a montanha de maior altitude da terra, mais de 8.848 metros acima do nível do mar, é um “objeto” extremamente grande, de proporções quase incomparáveis a um humano comum de 1,75 m de altura. Entretanto, esta noção não é algo que funcionaria para toda e qualquer comparação: se comparamos o monte Everest com um humano de estatura média, então sim, a montanha é enorme. Mas se comparamos o monte Everest com o Monte Olimpo, um extinto vulcão do planeta Marte, que é aproximadamente três vezes maior que o Everest, então não mais consideramos o Everest “enorme”. Se fossemos ainda mais longe, e o comparássemos com o diâmetro do próprio planeta Terra, então o Everest ficaria ainda mais insignificante. Poderíamos ir adiante, o comparando com o diâmetro do próprio Sol, do Sistema Solar, da Via-Láctea, e assim por diante. Cada vez mais, a nossa noção de que o Everest é “gigantesco” é confrontada pela pergunta: em relação a quê? E é exatamente com esse exemplo que começaremos o texto.

Durante séculos, a humanidade se viu obrigada a trabalhar com conceitos como o espaço e o tempo para aumentar a sua qualidade de vida. Vimos como a civilização egípcia desenvolveu a matemática como uma maneira de melhor administrarem determinados espaços de terra e vimos como a invenção dos chamados relógios de sol, usados para registrar e administrar a passagem do tempo e a sucessão dos eventos (estações do ano, dias e noites, entre outros), tornaram a agricultura e outras tarefas muito mais eficientes. O tempo passou, e a definição de ciência evoluiu. Nos holofotes desta transformação, estavam pesquisadores como Galileu Galilei, Johannes Kepler e,

principalmente, Isaac Newton, que começaram as noções tidas como “clássicas” que temos da física e, principalmente, da origem da mecânica, a área da física que estuda os movimentos dos corpos, seus repousos e suas interações. Uma das primeiras noções de “movimento” é a velocidade de um corpo, que o faz percorrer determinada quantidade de espaço em determinada quantidade de tempo. Víamos, nesse momento, essas noções serem usadas juntas para explicar os fenômenos físicos do nosso mundo, isto é, os fenômenos em que não havia transformação da matéria.

Entretanto, o que esses grandes cientistas pensavam, e consideravam mais prudente em considerar, era que o espaço e o tempo eram completamente indissociáveis um do outro. Simplesmente, não havia nada que mostrava que ambas as grandezas influenciavam uma a outra. Dessa maneira, de acordo com a mecânica clássica, o tempo é tomado como uma unidade de medida universal, uniforme por todo o espaço, e independente de qualquer movimentação nesse. Assim como o tempo, o espaço também é absoluto em todo o universo, imutável, e não sofre alteração em função da matéria. Esses fundamentos ajudaram os cientistas em suas pesquisas e em suas análises do movimento por várias gerações. Mas tais afirmações, depois de algum tempo, foram combatidas pela física moderna e se provaram incorretas para determinadas situações. Não é como se tudo aquilo que fora descoberto estivesse errado. De fato, as concepções de espaço e tempo na mecânica clássica são equivocadas se considerarmos o que já foi descoberto, mas não são totalmente incorretas: em determinadas escalas e sob determinadas condições, como os referenciais, as velocidades baixas e as massas pequenas dos objetos, por exemplo, fazem com que a mecânica clássica seja também correta, dentro desse escopo todo que foi descrito. Em escalas tão pequenas, para objetos se movendo tão lentamente e com quantidades de massa tão pequenas, a ideia de o tempo e o espaço serem absolutos torna as descrições muito mais simples e, ao mesmo tempo, igualmente coerentes com a realidade: nessas escalas, os efeitos da relatividade são tão pequenos que são quase inexistentes.

A questão principal é: por mais limitadas a determinadas situações que sejam, as teorias científicas que são produzidas (é claro, aquelas que são cientificamente comprovadas dentro dos espectros que se propõe a explicar) nunca serão completamente abandonadas. Nós ainda precisamos das leis de Newton para explicar, de maneira precisa, diversos fenômenos físicos que acontecem diariamente em nossas vidas, sem falar na fabricação de máquinas e outros aparatos tecnológicos. Sabemos que as leis de Newton não funcionam para objetos viajando a velocidades próximas a da luz, mas elas funcionam perfeitamente para objetos em velocidades baixas. Se uma teoria científica

conseguiu passar pelo rigor científico exigido para que fosse considerada correta, ela nunca deixará de ser correta: ela pode até não ser capaz de explicar determinados fenômenos em determinadas condições, mas isso não invalida o fato de ela conseguir explicar outros fenômenos que não estão incluídos nestes primeiros (a teoria é verdadeira em determinados momentos, falsa em outros). Quando uma regra, que é válida e útil em alguns casos parece não concordar com o experimento em outros, os físicos normalmente tentam aumentar a abrangência da regra em vez de descartá-la. E é exatamente esse o caso com os conceitos de espaço e de tempo: o conhecimento formado anteriormente se soma ao antigo, aumentando assim o entendimento do fenômeno como um todo (incluindo, ainda, os erros que o antigo modelo havia em relação ao novo, sem antes nos perguntarmos o porquê de ele possuir estes erros, contexto histórico, tecnológico, etc. Corrigindo o que houve de errado pelo que melhor pode explicar o fenômeno analisado).

Para discorrer ainda mais adiante sobre o assunto, é necessário passar pelo conceito do que é “verdadeiro”. Para a ciência, “verdadeiro” seria, grosso modo, aquilo que experimentalmente se prova acontecer de fato. Mas como todas as explicações que a física se propõe a fazer, elas sempre serão relativas às condições: a verdade deixa de ser algo absoluto para se tornar “subjetivo”, mas subjetivo a quê? Subjetivo ao referencial, à velocidade, à massa, subjetivo, em suma, às condições. Como exemplo, podemos citar o próprio conceito de velocidade relativa: para uma pessoa que está dentro de um trem, o que ela dirá sobre sua moção é que está parada, enquanto todas as coisas e pessoas fora do trem estão em movimento. Para outra pessoa que está fora do trem, quem está em movimento é a pessoa que antes disse estar parada. Se a pessoa que está dentro do trem começa a correr, veremos que a sua velocidade relativa à Terra será a soma das velocidades do trem em relação à terra com a sua velocidade em relação ao trem.

Mais adiante, Einstein perceberá nesse conceito alguns erros, principalmente quando estamos considerando raios de luz e velocidades muito elevadas. O que foi citado sobre velocidade relativa não é totalmente falso e nem totalmente verdadeiro: é verdadeiro para situações em que os corpos andam a velocidades relativamente baixas e falso para corpos se movendo a velocidades muito altas. À medida que a tecnologia se torna mais avançada, temos cada vez mais a capacidade de melhor estudar e entender o universo. Descobertas novas surgem a todo momento, e as teorias, em igual intensidade, precisam mudar e se ajustar às diferentes situações e, caso não consigam, terão de ser criadas novas teorias. Seja como for, mesmo que as teorias que hoje consideramos verdadeiras se provarem falsas para determinadas condições, condições essas que ainda

não fomos capazes de compreender por completo, noções que estão além de nosso próprio universo, além do que podemos ver e sentir, além do próprio espaço e do tempo. Mesmo assim, a nossa busca pela verdade nunca irá acabar, pelo contrário, só se tornará cada vez mais ávida por mais, talvez mais do que somos capazes de ter. Novos problemas trarão sempre mais desafios, e sabemos que nunca poderemos alcançar a verdade absoluta, de fato, mas a ciência é o mais próximo dela que podemos chegar.

“O que sabemos é uma gota, o que não sabemos é um oceano” — Isaac Newton.

“A ciência se compõe de erros que, por sua vez, são os passos até a verdade.” — Julio Verne

“Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil – e, no entanto, é a coisa mais preciosa que temos”. — Albert Einstein

## **ATIVIDADE B**

O cientista é para a sua teoria assim como o pintor é para a sua pintura

O pintor é uma das mais nobres profissões artísticas que existem. Conseguem representar o nosso mundo não como ele é, mas como eles mesmos são, propondo a nós, meros observadores, suas próprias visões de mundo, ideias, desejos, tristezas, felicidades, etc. Entretanto, nada disso pode ser considerado real de fato, já que a realidade nunca poderá ser representada totalmente por nada e nem ninguém. Não importa qual objeto possamos ver, ele será apenas uma representação daquilo que ele verdadeiramente é. Nós podemos sentir o nosso mundo somente através dos nossos sentidos (visão, olfato, audição, tato e paladar) e, como bem já sabemos, eles não são confiáveis. Muito pelo contrário, eles nos enganam, e a todo momento. Se os artistas não conseguem tornar suas representações em realidades, então por que os cientistas teriam mais sucesso do que eles?

Teorias científicas utilizam de certas imagens, símbolos e representações que pouco tem do objeto e/ou fenômeno que representam, mas são extremamente úteis para as entendermos. São imagens que nós, racionalmente, criamos para entendê-los e fazer uso desses fenômenos para o nosso próprio conforto, tudo com base em como os vemos funcionar. Se o conceito se encaixar com o que de fato vemos e se pudermos testá-lo para toda e qualquer situação envolvendo aquele fenômeno, então é um conceito cabível. O átomo é um desses conceitos, criado para compreendermos os fenômenos presentes em nossa escala a partir do pensamento de que tudo é formado por constituintes

fundamentais. Assim, podemos relacioná-lo com o que conseguimos ver em experimentos e melhor explicar a realidade. Dizer se o átomo realmente existe ou não é uma pergunta que pode ter múltiplas respostas, mas a melhor, pelo menos em minha opinião, é que sim, ele de fato existe, mas a sua existência não é concebida como algo real, mas sim, algo criado por nós. O átomo apenas existe na medida em que é uma representação, mas ele não é o próprio objeto ao qual nomeamos de “átomo”, sendo as duas coisas completamente diferentes, mas que, ao mesmo tempo, estão relacionados um com o outro. Os átomos não são as únicas representações que criamos para entender, da melhor maneira possível a realidade: outro exemplo são os famosos “vetores”, muito usados pela matemática e pela física para representar grandezas que necessitam de uma direção e de um sentido, além de seus próprios módulos com unidades de medida, para serem completamente compreendidos. Os vetores não existem, eles são apenas entes matemáticos que nos ajudam a entender o movimento dos corpos e, no geral, ajudam a entender o funcionamento de cada grandeza classificada como “vetorial”. De fato, quando movimentamos um carro não podemos ver cada uma das forças, representadas por vetores, agindo no carro (obviamente, não podemos ver segmentos de reta orientados no mundo real). Mas usamos esses conceitos abstratos para entender como o carro se movimentou de um ponto A até um ponto B, é claro, com mais uma abstração que damos o nome de “números” e como eles se relacionam através da matemática. Novamente, utilizar os vetores, nesse caso, facilita muito a nossa compreensão do fenômeno, já que vetores são criações matemáticas que podemos de fato estudar e manipular: reduzimos a situação real a equações, inequações, grandezas físicas e vetores. Entretanto, isso não significa que os vetores de fato existam: são, assim como os números, objetos abstratos, o que quer dizer que são objetos que não existem em nenhum momento ou lugar particular. Existem como um tipo de coisa (como uma ideia, ou uma abstração).

A ciência há muito tempo tem o objetivo principal de entender e explicar a forma como a realidade funciona se baseando em principalmente coisas que são observáveis, e desse modo ela até consegue chegar a entendê-la, mas esse entendimento é apenas parcial. É impossível registrar a realidade, já que não temos ferramentas sensoriais totalmente confiáveis para vê-la. Podemos até cobrir todos os buracos que não conseguimos perceber, mas sempre haverá mais buracos, invisíveis porque estão além do que somos capazes de compreender. Chegamos a níveis nunca antes vistos em questão de tecnologia, podemos mandar objetos ao espaço facilmente, podemos ir à qualquer parte do planeta em questão de horas, nos conectar a redes intermináveis de informação a qualquer momento e por quanto tempo quisermos. Tudo porque a ciência

chegou até onde está agora. Com tantas coisas incríveis, é de se esperar que, em toda a ciência, haja pelo menos uma pequena parcela de realidade, mesmo que ela seja apenas parcial ainda nos é muito preciosa. Afinal, todas essas coisas funcionam, são reais e estão conosco o tempo inteiro. Então, como é possível nos questionar sobre a existência ou não dos conceitos e imagens que os fizeram vir a vida? É bem capaz que nossas ideias sejam radicalmente alteradas novamente, como aconteceram tantas vezes no passado, na verdade, é quase certo de que isso vai acontecer. Por um momento, podemos pensar na matemática como sendo existente não porque ela existe por si só, mas sim por conta das centenas de milhões de filhos e filhas que ela deixou ao mundo. Os vemos todos os dias, interagimos com eles, eles nos ajudam a entender a realidade e, mesmo assim, não tornam as abstrações que os conceberam reais. São criações reais que receberam uma pitada leve de irrealidade, irrealidade esta criada por nós mesmos e que, sem a qual não poderíamos ter criados todas as tecnologias que hoje fazem parte do cotidiano de todos nós.

# **Apêndice B**

## **Termo de consentimento livre e esclarecido**

Neste apêndice, apresenta-se o termo de consentimento livre e esclarecido assinado pelos voluntários que participaram desta pesquisa.



## Termo de Consentimento Livre e Esclarecido

Este Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) se refere à participação voluntária na etapa final da pesquisa de Mestrado do aluno do Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ensino de Ciência da Universidade de São Paulo, Felipe Prado Corrêa Pereira, intitulada “A óptica dos corpos em movimento sob a visão do Realismo Estrutural: Aspectos não consensuais de Natureza da Ciência na formação de professores”, orientada pelo Prof. Dr. Ivã Gurgel. O objetivo desta etapa da pesquisa é analisar como professores em formação se posicionam frente a certas questões de cunho filosófico controverso sobre o desenvolvimento e mudança do pensamento científico, mais especificamente, mudanças teóricas nas ciências físicas.

A participação voluntária é proposta aos alunos de graduação em Licenciatura em Física e Licenciatura em Matemática que cursam a disciplina Gravitação (4300156 – 2020), oferecida no segundo semestre de 2020 pelo Instituto de Física da USP, e que realizaram as atividades de número 15 e/ou 16 propostas pelos docentes. Por meio de Análise Textual Discursiva, o pesquisador buscará analisar as posições filosóficas expressas nos textos resultantes das atividades supracitadas realizadas pelos alunos. Tal análise será realizada de maneira ética e responsável, tendo interesse apenas no conteúdo dos textos e sem emitir qualquer espécie de juízo de valor em relação às produções em questão. Para participar não é necessário que se tenha realizado ambas as atividades.

As produções textuais dos alunos e alunas que concordarem a participar da pesquisa serão anexadas à dissertação do proponente que, quando completada, estará disponível no banco virtual de teses da USP e fisicamente na biblioteca do Instituto de Física. A utilização destas produções tem grande potencial de contribuição para os estudos em ensino de História e Filosofia da Ciência na formação de professores. Além de contribuições para este campo de pesquisa, o conteúdo, tanto teórico quando empírico, do presente projeto de pesquisa pode trazer ressignificações e novas reflexões para os participantes a respeito de uma série de temas abordados ao longo da disciplina.

Os alunos convidados a consentir com o uso dos textos das atividades 15 e 16 por parte do proponente têm todo o pleno direito e liberdade de se recusar a participar sem qualquer tipo de penalização ou constrangimento. Aqueles que permitirem o uso dos textos têm o pleno direito e liberdade de retirar seu consentimento enquanto a pesquisa estiver em andamento, também sem qualquer tipo de penalização ou constrangimento. Para tal, basta contatar o proponente ou o orientador da pesquisa. A participação ou não na pesquisa não terá qualquer relação com a avaliação do aluno ou aluna na disciplina.

Todos os participantes terão total e irrestrito direito a privacidade e sigilo de todas as informações pessoais concedidas ao pesquisador, como nome, idade, curso e ano de ingresso. A identidade daqueles que consentirem em participar da pesquisa será protegida e não será, em nenhuma hipótese, revelada para terceiros ou publicada na dissertação ou em quaisquer publicações resultantes desta pesquisa de mestrado. A referência aos autores dos textos analisados serão substituídos por números ou pseudônimos.

Este termo está disponível para download, caso seja necessária sanar dúvidas sobre o processo de pesquisa.

Felipe Prado Corrêa Pereira: [felipeprado28@gmail.com](mailto:felipeprado28@gmail.com)

Ivã Gurgel: [gurgel@usp.br](mailto:gurgel@usp.br)

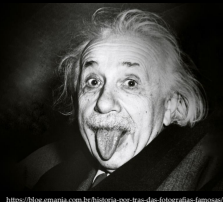
Instituto de Física da Universidade de São Paulo

# **Apêndice C**

## **Aula da Atividade A**

Neste apêndice, disponibiliza-se a aula associada à Atividade A da pesquisa de campo.

## Einstein e a Visão de Mundo da Relatividade



<https://blog.amania.com.br/historia-por-tras-das-fotografias-famosas/>

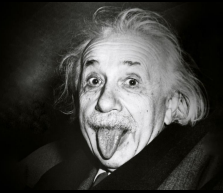
Prof. Ivã Gurgel

Grupo de Teoria e História dos Conhecimentos

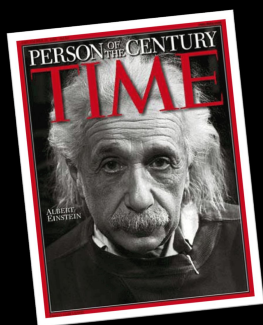
(TeHCo-USP)

<http://portal.if.usp.br/tehco/>

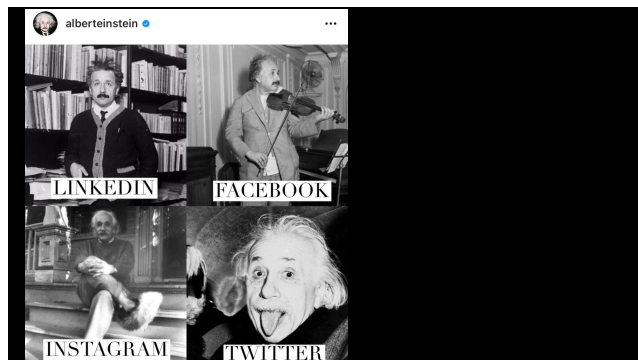
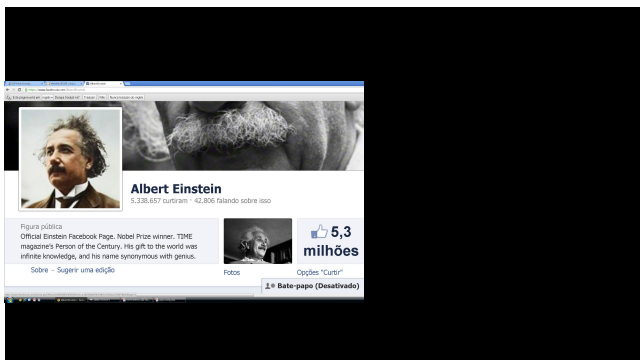
## Einstein e a Visão de Mundo da Relatividade

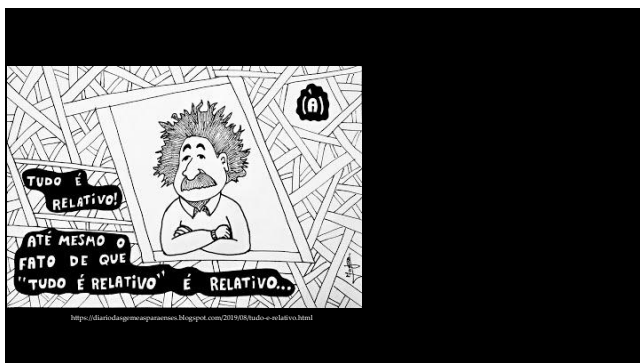
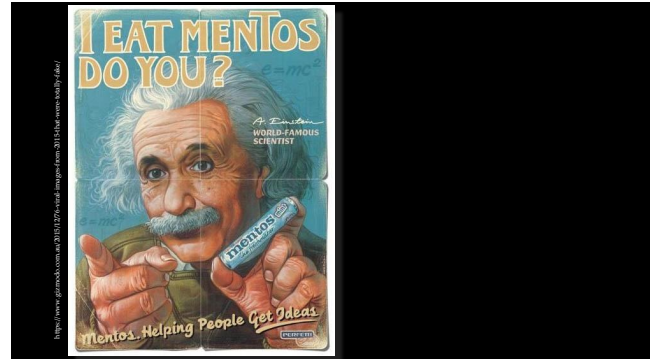


<https://blog.amania.com.br/historia-por-tras-das-fotografias-famosas/>



“Ele era a encarnação da pura inteligência, o professor que andava aos farrapos com sotaque alemão, o cômico clichê em milhares de filmes. (...) era impenetravelmente culto – o gênio que entre suas genialidades descobriu, simplesmente pensando sobre isso, que o universo não era o que parecia. (TIME, 1999, tradução nossa).





**O Tempo Absoluto:**

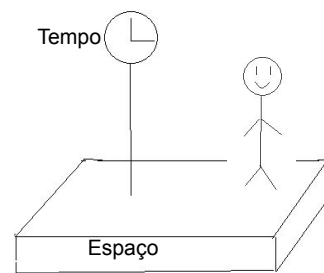
O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e por sua própria natureza, flui uniformemente sem relação com nada externo, e isso se chama duração.

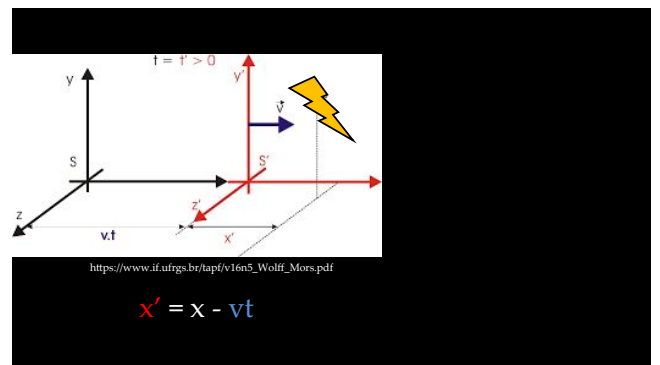
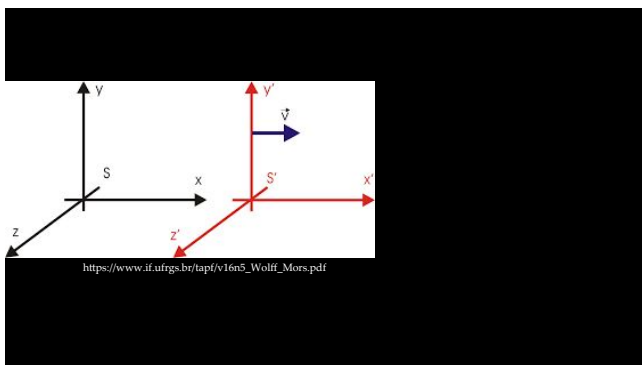
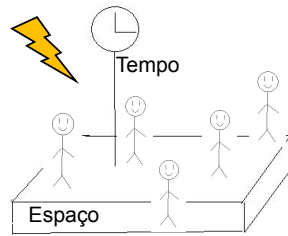
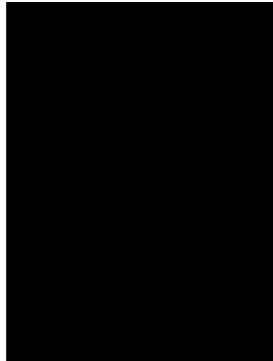
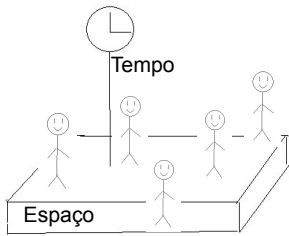
Isaac Newton,  
Principia Mathematica (1687)

**O Espaço Absoluto:**

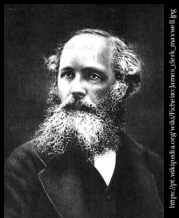
O espaço absoluto, em sua própria natureza, sem relação com nada externo, permanece sempre similar e imóvel. Os espaços absoluto e relativo são iguais em forma e magnitude, mas eles não se mantêm sempre numericamente iguais.

Isaac Newton,  
Principia Mathematica (1687)

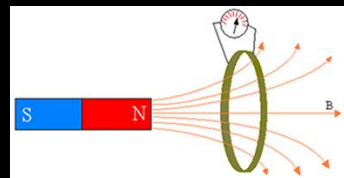




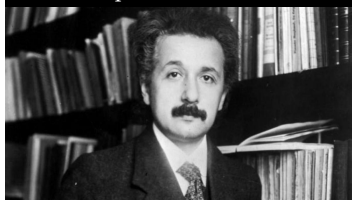
Os Antecedentes de Einstein:  
A Física do século XIX  
Eletromagnetismo.



Indução de Faraday  
X  
Força de Lorentz

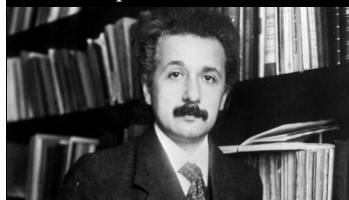


A Relatividade Especial (1905):  
As questões de Base.



É possível explicar a corrente que aparece em uma espira com apenas 1 lei física?

A Relatividade Especial (1905):  
As questões de Base.



O que veríamos se estivéssemos na velocidade da luz?

Annalen der Physik, 1905, 17

ANNALEN  
DER  
PHYSIK.

Zur Elektrodynamik bewegter Körper  
von A. Einstein.

Die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen unähnlich scheinen, ist bekannt. Man denke die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Leiter und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen



John Stachel: "O ano miraculoso de Einstein"

"Como é bem conhecido, a eletrodinâmica de Maxwell — tal como usualmente entendida no momento —, quando aplicada a corpos em movimento, produz assimetrias que não parecem ser inerentes ao fenômeno.  
(...)

(...) Considere-se, por exemplo, a interação eletrodinâmica entre um ímã e um condutor. O fenômeno observável, aqui, depende apenas do movimento relativo entre o condutor e o ímã, ao passo que o ponto de vista usual faz uma distinção clara entre os dois casos, nos quais um ou outro dos dois corpos está em movimento  
(...)

(...) Pois se o imã está em movimento e o condutor está em repouso, surge, nas vizinhanças do imã, um campo elétrico com um valor definido de energia que produz uma corrente onde quer que estejam localizadas partes do condutor. Se o imã, contudo estiver em repouso, enquanto o condutor se move, não surge qualquer campo elétrico na vizinhança do imã (...)

(...) mas, sim, uma força eletromotriz no condutor, que não corresponde a nenhuma energia per se, mas que, supondo-se uma igualdade do movimento relativo, nos dois casos, dá origem a correntes elétricas de mesma magnitude e sentido que as produzidas, no primeiro caso, pelas forças elétricas.

Elevaremos essa conjectura (cujo conteúdo, daqui em diante, será chamado de "princípio da relatividade") à condição de um postulado. Iremos também introduzir outro postulado, apenas aparentemente incompatível com esse, a saber:

(...) que a luz sempre se propaga no espaço vazio com uma velocidade definida, que é independente do estado de movimento do corpo emissor. Esses dois postulados são suficientes para a obtenção de uma eletrodinâmica dos corpos em movimento simples e consistente, baseada na teoria de Maxwell para corpos em movimento.

#### A Relatividade Especial (1905): Os Postulados

1. As leis que descrevem a mudança dos estados dos sistemas físicos são independentes de qualquer um dos dois sistemas de coordenadas que estão em movimento de translação uniforme, um em relação ao outro, e que são utilizados para descrever essas mudanças.

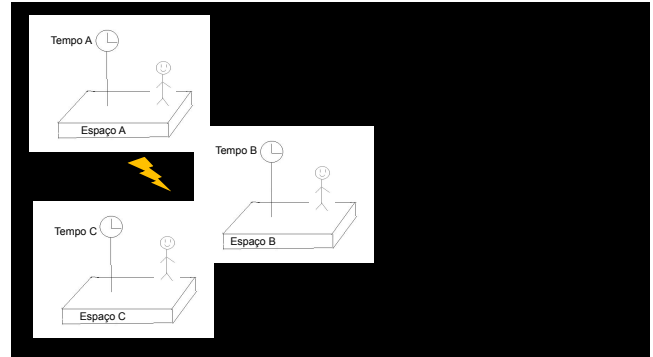
#### A Relatividade Especial (1905): Os Postulados

2. Todo raio de luz move-se no sistema de coordenadas de "repouso" com uma velocidade fixa  $V$ , independentemente do fato de este raio de luz ter sido emitido por um corpo em repouso ou em movimento



A Relatividade Especial (1905):  
As Consequências.

- A distância entre dois eventos (“o comprimento”) depende do referencial;
- O tempo transcorrido entre dois eventos também.



As Transformações de Lorentz

Considerando dois referenciais inerciais com velocidade  $v$  entre si na direção do eixo  $x$ , temos:

$$\begin{aligned} x' &= \gamma(x-vt) \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \gamma[t-(vx/c^2)] \end{aligned}$$

As Transformações de Lorentz

$$\begin{aligned} x' &= \gamma(x-vt) \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \gamma[t-(vx/c^2)] \end{aligned}$$

onde  $\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

A Teoria da Absolutidade

Dadas as coordenadas  $x, y, z, t$ , de um evento, o intervalo relativístico é uma constante

$$s^2 = (ct)^2 - x^2 - y^2 - z^2$$

PS: Aqui estamos considerando um evento de origem de coordenadas nulas.

Interpretações Filosóficas para a Relatividade

Tonnellat (1971) propõe também duas interpretações básicas da Teoria da Relatividade Restrita (TRR).



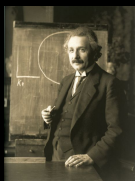
### Interpretação Realista

Os "observáveis" comprimento espacial e intervalo temporal são grandezas "mutiladas". Uma "grandeza real" na TRR é aquela que permanece invariante para todos os observadores. Somente grandezas quadridimensionais têm essa propriedade. Logo, não poderíamos chamar, mesmo os objetos cotidianos de "reais", a não ser que os consideremos em suas extensões em quatro dimensões.

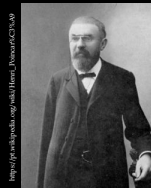
### Interpretação Positivista

As grandezas observadas (comprimentos espaciais e intervalos temporais), assim como suas eventuais modificações em diferentes referenciais, são "reais", pois são as únicas grandezas que são efetivamente acessíveis a nós (não "observamos" diretamente objetos quadridimensionais).

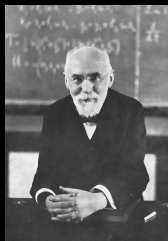
- Einstein:
- Inicialmente não é um realista;
- Para alguns autores ele adere ao realismo de teorias e entidades ao longo da vida.



- Poincaré:
- Realista de Teorias, não de entidades;
- Às vezes é chamado de convencionalista.

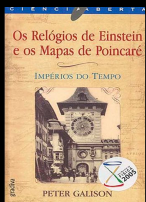


- Lorentz:
- Realismo "dinâmico" para o espaço.



- Minkowski:
- Realista "substancialista" para o espaço-tempo;
- O Universo é o conjunto de "pontos Universo"





Peter Galison: *“Relógios de Einstein e Mapas de Poincaré”*  
 Uma história “contextual” das origens da teoria.

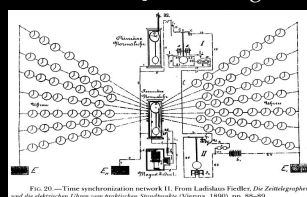
### Final do Século XIX

- Projetos europeus de unificação territorial.
- Movimentos de modernização;
- Revolução da eletricidade;
- “Domesticação” do Tempo.



- Início do século XIX

### Novo desafio imposto a todos: Sincronização de relógios

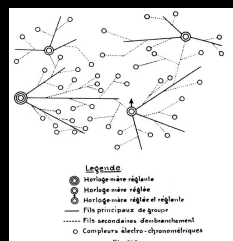


Plano do Sistema de Sincronização de Relógios em Viena.

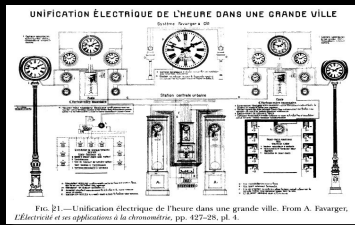
### Modernização francesa

- Astrônomos e matemáticos franceses fazem parte do “comitê científico” francês no projeto de sincronização dos relógios de toda Paris;
- Sistema “relógio-mãe”;
- Implementação fracassada de sincronização pneumática de relógios (dutos subterrâneos). Alternativa: a “recém” domesticada eletricidade.

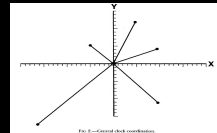
### Modernização francesa



Modernização francesa

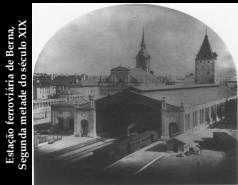
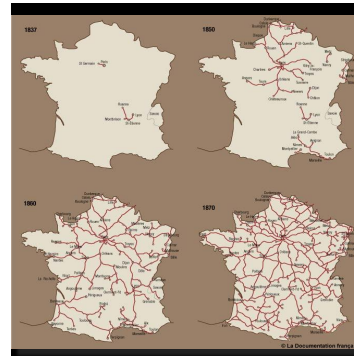


Sistema "relógio-mãe"

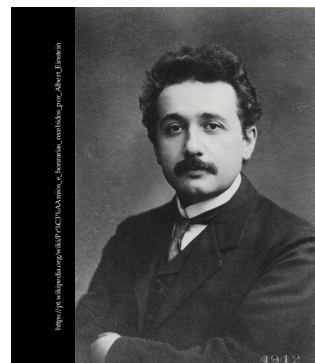


- O Problema!
- Quanto mais distante, maior o atraso do sinal.

- Com as revoluções industriais vieram as máquinas térmicas e os primeiros aparelhos elétricos;
- A locomotiva, umas das principais invenções, passou de transporte de carga para transporte de pessoas;
- O que levava *meses* agora levava *dias*!
- Isso levou naturalmente a expansões ferroviárias em toda Europa.

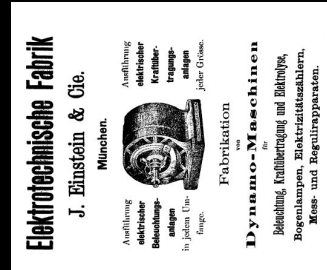


- Mas, para o funcionamento correto de todas as estações ferroviárias europeias, precisa-se que seus relógios estejam todos sincronizados!



Albert Einstein (Ulm, 1879 – Princeton, 1955) trabalhou no coração de uma nação com tradição na construção de relógios: Suíça.

Seu pai foi dono de uma empresa de equipamentos eletrotécnicos, alguns deles similares às *máquinas sincronizadoras de relógios distanciados*.



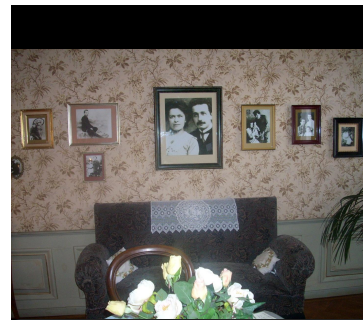
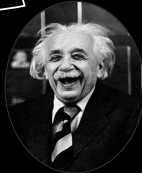
### Einstein e as patentes

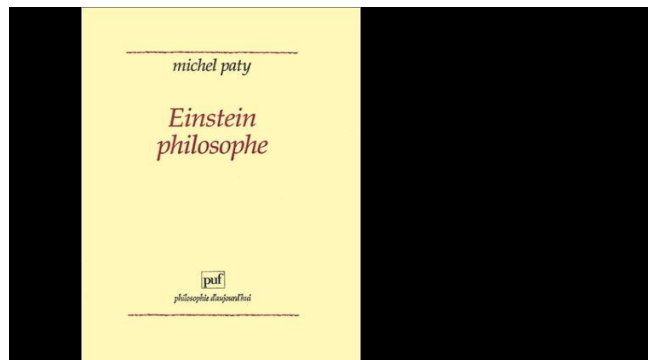
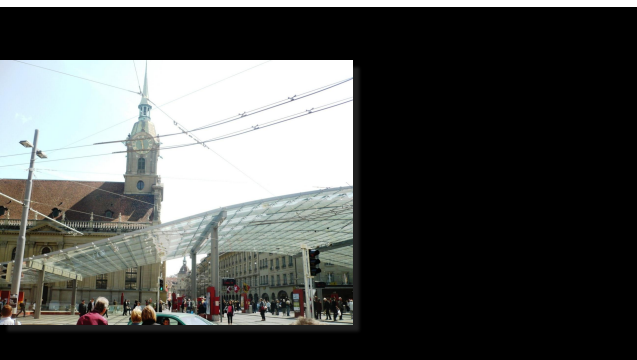
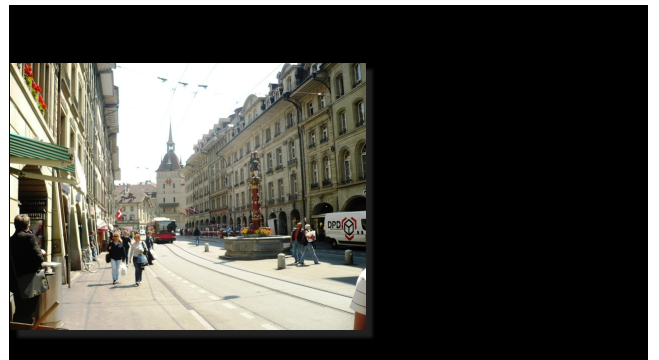
Durante sua estadia em Berna, houve uma alta no interesse sobre sistemas de cronometragem elétrica (e máquinas de sincronização).

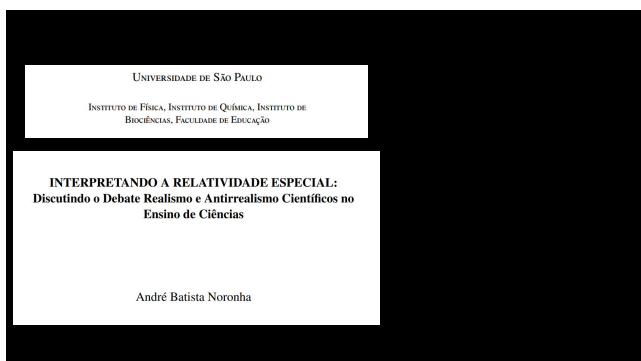
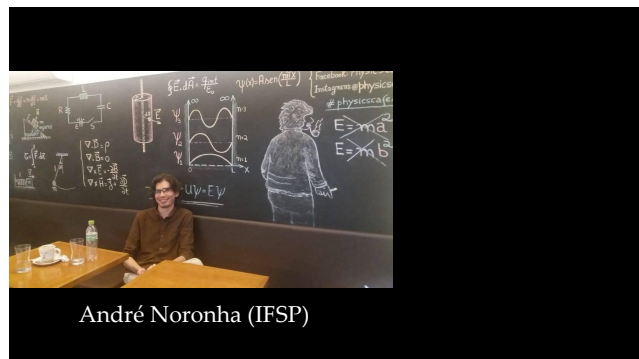
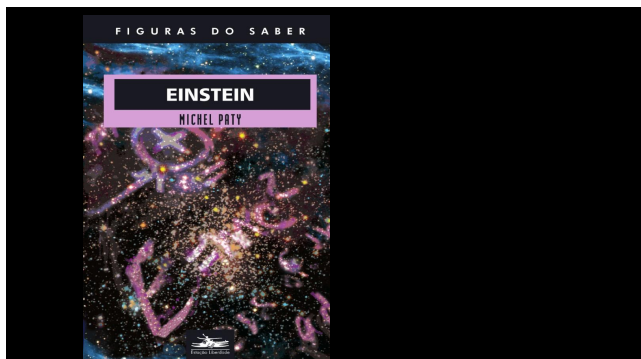
De 1800 a 1900 houve de três a quatro aplicações do tempo elétrico por ano. A transmissão elétrica do tempo cresceu juntamente com o sistema de telegrafia, relógios coordenados começaram a ter papel cada vez mais presente em locais públicos e privados. Os números são: 1901, *oito* patentes; 1902, *dez*; 1903, *seis*, e então em 1904, *catorze* patentes;

Trabalhar com a formulação final de patentes tecnológicas foi uma verdadeira bênção para mim. Isto me instigou o pensamento múltiplo e também me proveu importante estímulo ao pensamento físico.

A relatividade especial nasceu na rua Kramgasse, 49







# Apêndice D

## Aula da Atividade B

Neste apêndice, disponibiliza-se a aula associada à Atividade B da pesquisa de campo. Os slides dessa aula, originalmente no formato de *PowerPoint*, contém *gifs* animados que não podem ser aqui visualizados.



## Ótica e Relatividade: O Éter e as investigações sobre a velocidade da luz no século XIX



<https://www.pibicbrasil.usp.br/pt-br/942830/796579956/>

Prof. Felipe Prado  
Prof. Ivã Gurgel  
Grupo de Teoria e História  
dos Conhecimentos  
(TeHCo-USP)  
<http://portal.if.usp.br/tehco/>

## Ótica e Relatividade: O Éter e as investigações sobre a velocidade da luz no século XIX



<https://www.pibicbrasil.usp.br/pt-br/942830/796579956/>

### A Relatividade Especial (1905): As Consequências.

- A distância entre dois eventos ("o comprimento") depende do referencial;
- O tempo transcorrido entre dois eventos também.

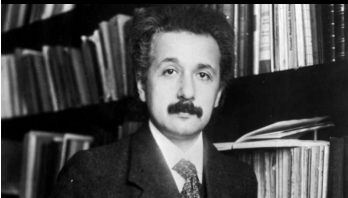
### As Transformações de Lorentz

$$x' = \gamma (x - vt)$$

$$t' = \gamma [t - (vx/c^2)]$$

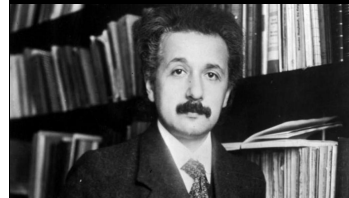
$$\gamma^2 = \frac{1}{1 - (v^2/c^2)}$$

### A Relatividade Especial (1905): As questões de Base.



É possível explicar a corrente que aparece em uma espira com apenas 1 lei física?

### A Relatividade Especial (1905): As questões de Base.



O que veríamos se estivéssemos na velocidade da luz?

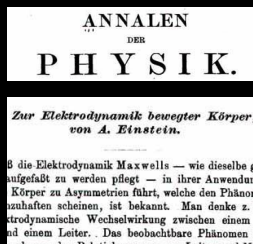
### A Relatividade Especial (1905): Os Postulados

1. As leis que descrevem a mudança dos estados dos sistemas físicos são independentes de qualquer um dos dois sistemas de coordenadas que estão em movimento de translação uniforme, um em relação ao outro, e que são utilizados para descrever essas mudanças.

### A Relatividade Especial (1905): Os Postulados

2. Todo raio de luz move-se no sistema de coordenadas de "repouso" com uma velocidade fixa  $V$ , independentemente do fato de este raio de luz ter sido emitido por um corpo em repouso ou em movimento

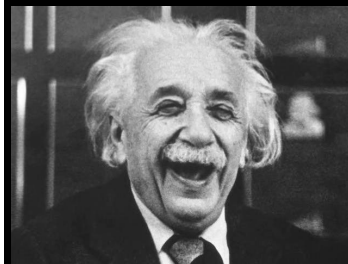
Annalen der Physik, 1905, 17



"Elevaremos essa conjectura (cujo conteúdo, daqui em diante, será chamado de "princípio da relatividade") à condição de um postulado. Iremos também introduzir outro postulado, apenas aparentemente incompatível com esse, a saber: que a luz sempre se propaga no espaço vazio com uma velocidade definida, que é independente do estado de movimento do corpo emissor. (...)

A introdução de um "éter luminífero" irá se provar supérflua, uma vez que o ponto de vista a ser desenvolvido aqui não exigirá um "espaço em repouso absoluto", dotado de propriedades especiais, nem atribuirá um valor de velocidade a um ponto do espaço vazio, onde os processos eletromagnéticos estão ocorrendo."

"Éter luminífero" ?

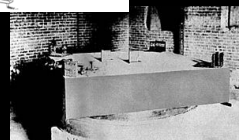
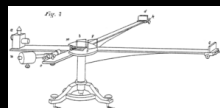


<http://www.ihu.unidinos.br/78-noticias/54500-as-disco-principais-descobertas-de-einstein-que-mudaram-a-nossa-visao-do-mundo-atrigo-de-carlo-rossi>

Papel do éter para a ótica  
 Luz = Vibração em um meio material, o éter luminífero  
 O éter permearia todo o universo

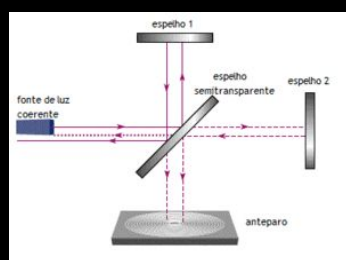
Papel do éter para a mecânica  
 Estaria no referencial absoluto  
 Éter como substancialização do espaço absoluto

### O experimento de Michelson e Morley (1887)



[https://en.wikipedia.org/wiki/Michelson%26Morley\\_experiment](https://en.wikipedia.org/wiki/Michelson%26Morley_experiment)

### O experimento de Michelson (1881)



[https://en.wikipedia.org/wiki/Michelson%26Morley\\_experiment](https://en.wikipedia.org/wiki/Michelson%26Morley_experiment)

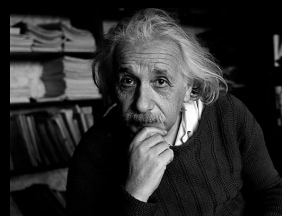
### O Experimento de Michelson e Morley (1887)



### O Experimento de Michelson e Morley (1887)



### Relativizando o Experimento de Michelson e Morley (1887)



<https://revistagalileu.globo.com/Sciencia/noticia/2018/06/diario-de-viagem-de-ei-relativismo-passagem-proccosmologia-eve-lada.html>

- Se o espaço absoluto existe, deve ser possível evidenciá-lo
  - Além disso, o espaço absoluto (éter) é uma substância através da qual a luz se propaga
  - Se a Terra se move através do éter...
- ...É possível detectar o movimento da Terra através do éter por meio de experimentos óticos?

### Luz: Onda ou Partícula?



Isaac Newton



Christiaan Huygens

Voltando para a História  
com um pouco de  
Astronomia

### O fenômeno da aberração estelar (século XVIII)



James Bradley (1693 - 1772)

#### Contexto:

#### Teoria corpuscular da luz

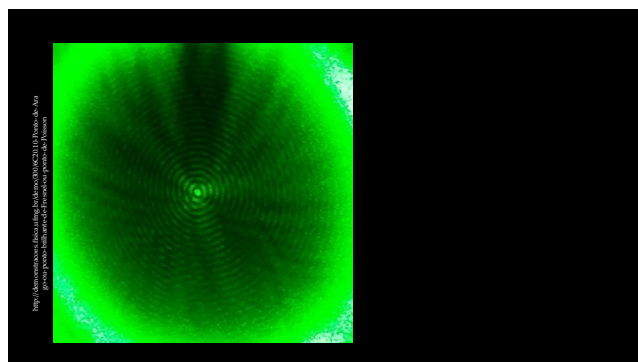
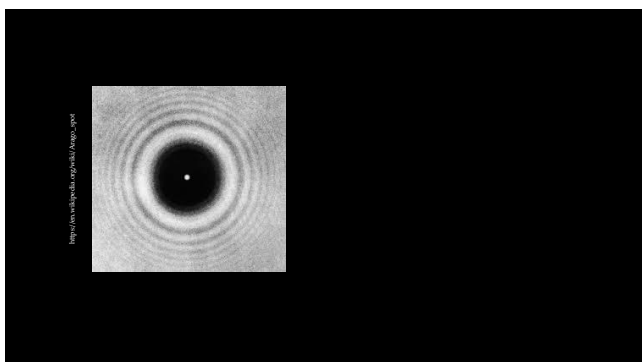
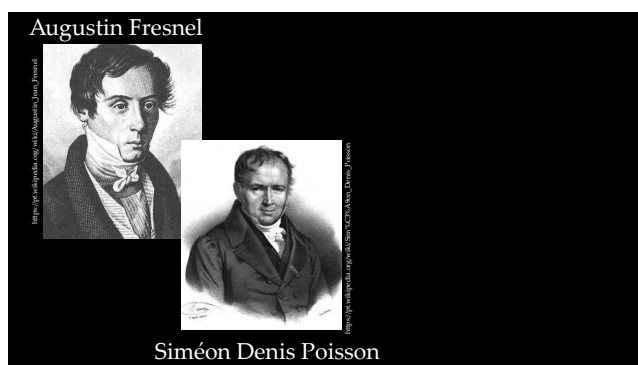
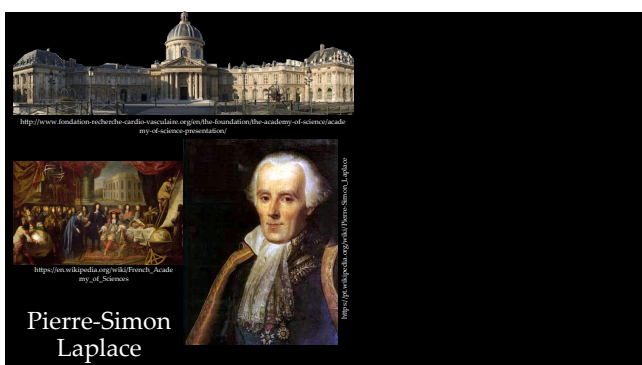
Uma das tentativas de se evidenciar o movimento da Terra, ainda estimulado pela Revolução Copernicana  
Tentativa de medir a paralaxe estelar  
Bradley detectou um fenômeno, mas não era a paralaxe!

### Aberração Estelar

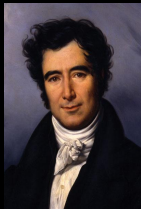




Aberração Estelar  
 Inconsistente com uma  
 visão corpuscular;  
 Spoiler! Possivelmente  
 consistente com uma  
 visão ondulatória.

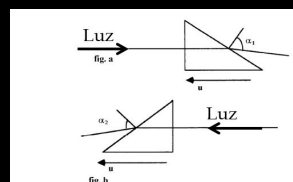


Seria possível que a velocidade da luz fosse sempre a mesma?



François Arago (1783 - 1856)

Em 1810, Arago realiza um experimento ótico que mediria a velocidade da Terra através do éter.



Interpretação ondulatória da aberração estelar: O éter "livre" de Young (1804)



<https://www.gettyimages.com/detail/photo/Thomas-Young-Portrait>

Young afirma em 1804: "Considerando-se o fenômeno da aberração das estrelas, eu estou pronto a acreditar que o éter luminoso penetra a substância de todo corpo material com pouca ou nenhuma resistência, talvez tão livre quanto o vento passe através de um bosque de árvores".

O movimento da Terra *não perturba nem arrasta o éter*  
Em analogia com o som, a velocidade da luz dependeria apenas das características do meio  
Explicava o ângulo constante da aberração estelar...  
... mas era incompatível com o experimento de Arago

Arago escreve ao jovem Augustin Fresnel  
Como conciliar os resultados controversos dentro de uma teoria ondulatória?  
Em 1818 escreve a Arago propondo uma nova teoria da interação do éter com a matéria  
Éter parcialmente arrastado pelos corpos materiais

Em uma carta a Arago, Fresnel sugere:  
 "Caso se admita que o nosso globo imprime seu movimento ao éter que o envolve, conceber-se-ia facilmente por que o mesmo prisma refrata sempre a luz, qualquer que seja o lado de onde ela chega. Mas parece impossível explicar a aberraçã das estrelas nessa hipótese..."

#### Coeficiente de Arraste de Fresnel

Desigualdade de densidade de éter no ar ( $\rho_0$ ) e nos corpos ( $\rho$ ):

$$\rho = n^2 \rho_0$$

Os corpos ponderáveis arrastam o excesso de éter dentro deles:

$$\rho_a = \rho - \rho_0$$

Uma fração da velocidade do corpo é transmitida ao éter:

$$f = (\rho - \rho_0)/\rho$$

#### Coeficiente de Arraste de Fresnel

$$f = (\rho - \rho_0)/\rho$$

#### Coeficiente de Arraste de Fresnel

$$f = (\rho - \rho_0)/\rho$$

$$\text{Sendo } \rho = n^2 \rho_0$$

$$f = (n^2 \rho_0 - \rho_0) / (n^2 \rho_0)$$

#### Coeficiente de Arraste de Fresnel

$$f = (\rho - \rho_0)/\rho$$

$$\text{Sendo } \rho = n^2 \rho_0$$

$$f = n^2 \rho_0 - \rho_0 / n^2 \rho_0$$

$$f = (n^2 - 1)/n^2$$

#### Coeficiente de Arraste de Fresnel

$$f = (\rho - \rho_0)/\rho$$

$$\text{Sendo } \rho = n^2 \rho_0$$

$$f = n^2 \rho_0 - \rho_0 / n^2 \rho_0$$

$$f = (n^2 - 1)/n^2$$

$$f = 1 - 1/n^2$$

Coeficiente de Arraste de Fresnel

$$f = 1 - 1/n^2$$

$$f = 1 - 1/(c/v)^2$$

$$f = 1 - (v^2/c^2)$$

Coeficiente de Arraste de Fresnel

Velocidade da luz em um corpo transparente em movimento com velocidade  $u$ :

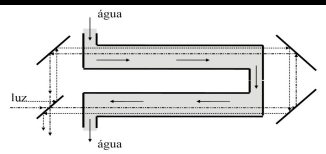
$$c' = c/n + u(1 - 1/n^2)$$

Soma de velocidade diferente da tradicional soma galileana  
 Baseado em hipóteses *ad hoc*  
 Conciliava os fenômenos da ótica dos corpos em movimento

Problemas da teoria do éter parcialmente arrastado

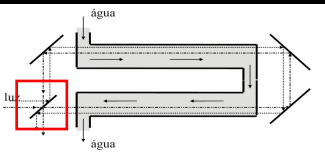
Tornavam invariantes as leis de refração da luz em qualquer referencial (em primeiras aproximações de  $v/c$ )  
 $c' = c/n + u(1 - 1/n^2)$  depende de  $n$ , logo depende da frequência da luz (cores diferentes são arrastadas em frações diferentes?)

Experimento de Fizeau (1851)



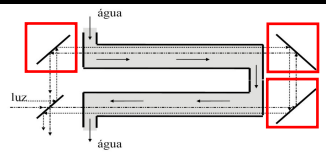
Roberto Martins, História da Teoria da Relatividade (2012)

Experimento de Fizeau (1851)



Roberto Martins, História da Teoria da Relatividade (2012)

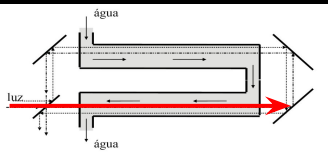
Experimento de Fizeau (1851)



Roberto Martins, História da Teoria da Relatividade (2012)

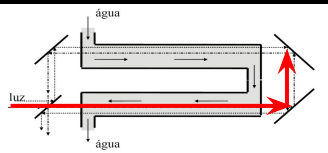


Experimento de Fizeau (1851)



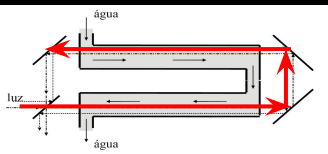
Roberto Martins, História da Teoria da Relatividade (2012)

Experimento de Fizeau (1851)



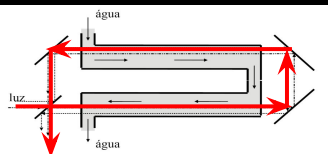
Roberto Martins, História da Teoria da Relatividade (2012)

Experimento de Fizeau (1851)



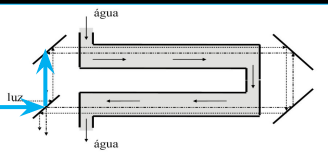
Roberto Martins, História da Teoria da Relatividade (2012)

Experimento de Fizeau (1851)



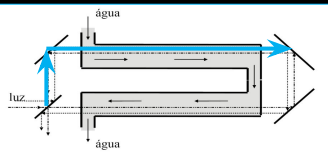
Roberto Martins, História da Teoria da Relatividade (2012)

Experimento de Fizeau (1851)



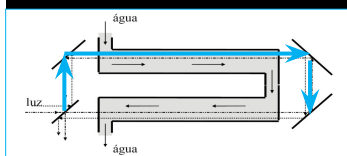
Roberto Martins, História da Teoria da Relatividade (2012)

Experimento de Fizeau (1851)



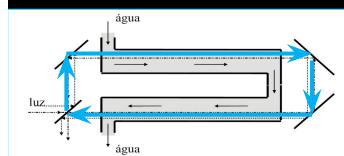
Roberto Martins, História da Teoria da Relatividade (2012)

## Experimento de Fizeau (1851)



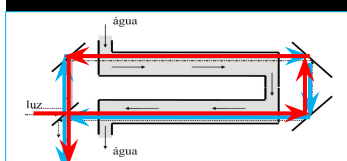
Roberto Martins, História da Teoria da Relatividade (2012)

## Experimento de Fizeau (1851)



Roberto Martins, História da Teoria da Relatividade (2012)

## Experimento de Fizeau (1851)



Roberto Martins, História da Teoria da Relatividade (2012)

## Fórmula? Sim! Explicação? Não!

Muitos físicos reconheciam a adequação empírica do coeficiente de Fresnel, mas não sua explicação (Stanchel, 2005)

## Fórmula? Sim! Explicação? Não!

Ketteler (1873): “De fato a velocidade de propagação da luz sofre uma modificação correspondente à teoria de Fresnel. [...] Uma coisa é simplesmente reconhecer esta modificação, outra é aceitar a concepção de Fresnel sobre como essas coisas acontecem.”

## Fórmula? Sim! Explicação? Não!

Mascart (1872): “Deve-se relatar que o experimento de Fizeau apenas verificou que o arraste das ondas de luz por um meio móvel está de acordo com a fórmula de Fresnel, e pode-se substituir a sua hipótese por qualquer outra que finalmente nos leve à mesma fórmula, ou uma ligeiramente diferente”

Fórmula? Sim! Explicação? Não!

Lorentz (1886): "Será tarefa da teoria da luz explicar o valor das observações dadas pelo coeficiente de arraste"



[https://www.wikiaand.com/en/Augustin-Jean\\_Fresnel](https://www.wikiaand.com/en/Augustin-Jean_Fresnel)

Felipe Prado



# **Apêndice E**

## **Texto de apoio à Atividade B**

Neste apêndice, disponibiliza-se o texto de apoio associada à Atividade B.

## A Física do Éter no Século XIX

*Felipe Prado*

### I. O éter, ou os éteres?

A palavra ‘éter’ foi empregada em diversos sentidos ao longo da história das ciências e das filosofias naturais sendo, então, um termo polissêmico cujo significado só fica claro conforme se entende como ele era empregado em um determinado contexto histórico e científico.

Conforme foi discutido no início desta disciplina de Gravitação, o termo éter se referia a uma substância que integrava o sistema de mundo aristotélico, que lhe conferia propriedades especiais bastante distintas daquelas dos quatro elementos que formavam toda a matéria do mundo sublunar. O éter seria a matéria constituinte do mundo celeste, ou seja, seria a substância eterna, imutável e incorruptível que forma as esferas cristalinas que conferiam movimento perpétuo e perfeito aos planetas e estrelas.

Esta concepção de éter, bem como todo o Universo Aristotélico-Ptolomaico, cai em desuso com a emergência da nova física construída ao longo da Revolução Copernicana, que culmina com o estabelecimento da mecânica newtoniana. Esta nova mecânica lançou as bases das investigações da filosofia natural, se consolidando como paradigma para a compreensão da cinemática e da dinâmica, isto é, do movimento dos corpos e da interação destes.

As bases conceituais deste sistema de pensamento já nos são relativamente familiares: i) o espaço e o tempo absolutos são importantes pontos de partida da física newtoniana e estabelecem que o mesmo espaço ontologicamente independente (isto é, ele existe independente da existência de pessoas que o percebam, ou de objetos que o preencham) com propriedades uniformes em toda a sua extensão é compartilhado por todos os seres e por todos os corpos nele contido, assim como o tempo, que passaria no mesmo ritmo em todos os pontos do espaço e para todos os observadores; ii) o princípio da inércia, conceito gestado desde a Idade Média, segundo o qual o movimento inercial de um corpo só pode ser interrompido caso haja sobre ele ma influência externa chamado Força; iii) o segundo princípio da mecânica, que define o conceito de Força como o produto da massa e da aceleração daquele corpo no qual ela age; iv) o princípio da ação e da reação que define que a ação de forças entre corpos é sempre recíproca, contando com pares de forças de igual direção e intensidade, e com sentidos opostos; v) a Lei da Gravitação Universal, que postula a existência de forças que agem instantaneamente e à distância entre corpos que possuem massa. Grosso modo, podemos afirmar que este cinco pontos são a base de toda a teoria Mecânica que se consolidou no século XVII.

Apesar de paradigmáticas, estas bases foram alvo de muitas controvérsias científicas e filosóficas, como a noção de espaço absoluto, bastante criticada por pensadores como Gottfried Wilhelm Leibniz, contemporâneo a Newton, e Ernst Mach no século XIX. Outro ponto de tensão deste sistema é a noção de força gravitacional à distância. Apesar do incrível sucesso em se estabelecer sua estrutura matemática e as consequências dinâmicas e cinemáticas de sua ação (sem mencionar o sucesso empírico sem precedentes), permanecia obscuro quais seriam as suas causas e como explicar a influência mútua entre corpos que não se tocam.

Tentando propor uma explicação que dissolvesse tal controvérsia, Newton aventou a ideia de uma espécie de matéria fluida desconhecida e imponderável (ou seja, que não pode ser percebida ou medida), cuja função seria de intermediar a interação entre corpos distantes, o chamando de éter. Não nos ocuparemos em explicar como estas interações foram conjecturadas por Newton, até porque são encontrados distintos “modelos” de éter incompatíveis entre si em seus escritos, conferindo um caráter bastante especulativo a este tipo de hipótese. Nos interessa saber que ao longo do século XVIII, vários outros tipos de fluidos imponderáveis foram postulados pelos cientistas da época tentando explicar os mais diversos fenômenos naturais. Estes diferentes fluidos teoricamente formados por partículas muito menores e mais sutis do que as partículas da matéria comum portariam qualidades que explicariam efeitos observáveis, como os fenômenos térmicos, as combustões, o magnetismo, entre outros. Influenciados pela visão newtoniana de mundo, os cientistas que empregavam os diversos tipos de éteres buscavam explicar os fenômenos naturais por meio da existência de forças de interações tanto entre partículas constituintes do éter quanto entre estas partículas e aquelas que formariam a matéria comum.

Com o passar do tempo, muitos dos fluidos imponderáveis que dominaram as ciências naturais no século XVIII foram, aos poucos, sendo abandonados. O flogisto, por exemplo, fluido portador da qualidade da combustão perdeu força para a teoria do oxigênio de Lavoisier. O calórico, fluido imponderável responsável pelo calor contido nos corpos fora perdendo espaço para a noção de calor como energia ao longo do século XIX. Entretanto, a teoria de éter mais longeva, frutífera e que mais se desenvolveu e se complexificou do ponto de vista teórico e matemático foi a teoria do *éter luminífero*.

## II. Luz, as ondulações no Éter

Durante o século XIX, dominava nas ciências naturais as visões de mundo mecanicistas e newtonianas, tamanho o legado de sua obra e de outros filósofos que participaram do longo processo que foi a Revolução Copernicana. Isso significa dizer que as teorias e explicações científicas das mais diversas classes de fenômenos deveriam ser compatíveis com as bases

mecânicas do sistema newtoniano de mundo. Em outras palavras, fenômenos naturais - como os da ótica, que nos interessa neste texto – deveria ser explicados com base em causas mecânicas. Um exemplo (válido até hoje na física) de fenômenos com causas mecânicas são aqueles associados à acústica: a propagação do som é explicado como ondas de compressão e rarefação das partículas do ar. Não por acaso, a luz foi imaginada como ondulações em meio material mecânico por diversos filósofos naturais, se tornando ao longo do século XIX a teoria dominante sobre a natureza da luz. Segundo esta teoria todos os efeitos luminosos teriam como causa íntima a ondulação transversais de um meio etéreo, elástico e bastante sutil, cujas partículas permeariam todo o espaço e também o interior da matéria comum. Em analogia com o som, o éter seria o meio que carregaria as ondas luminosas meio de suas perturbações e ondulações.

Podem ser que para nós, que estamos acostumados a interpretar a luz como ondulações eletromagnéticas, achamos estranha esta visão mecanicista sobre a luz, entretanto os cientistas do século XIX tinham ótimas razões para acreditar na existência do éter luminífero, pois a mecânica newtoniana era a mais fundamental e bem-sucedida teoria científica disponível. É possível inclusive argumentar que seria irracional caso aqueles cientistas não se apoiassem nela para teorizar sobre a natureza da luz. Devemos fazer este tipo de reflexão para que não julguemos as teorias do passado com os critérios da ciência do presente.

Apesar de possivelmente estranha aos nossos olhos, a teoria ondulatória da luz nos moldes propostos por Augustin Jean Fresnel era bastante matematizada e contava com incrível sucesso empírico sendo capaz, inclusive, de fazer previsões de fenômenos ópticos até então desconhecidos. Além de estabelecer matematicamente a forma de propagação ondulatória da luz, vários outros aspectos matemáticos desta teoria são até hoje retidos nos limites da óptica clássica, como os modos de interferência luminosas e as leis de reflexão e transmissão de luz entre diferentes meios, que estabelecem as porcentagens da energia da luz incidente em um dioptra correspondentes às porções de luz refletida e transmitida quando a luz passa de um meio para outro. Este “balanço energético”, medido através da intensidade da luz, levava em consideração que as partículas do éter, ao oscilarem, estariam dotadas de energia cinética (ou, na verdade, à época *vis-viva*, conceito que antecede a ideia de energia cinética na física), e quantidade desta *vis-viva* estava vinculada ao quadrado das velocidades destas partículas, compatível com a visão mecânica de mundo.

Mais uma vez, estas ideias podem nos parecer estranhas, ou até ingênuas, para nós que não acreditamos mais no éter, ou em qualquer substância mecânica para explicar os efeitos da luz. Apesar de a considerarmos uma teoria “errada”, podemos notar esta teoria continha grandes acertos. O quadrado das velocidades das partículas do éter foram, de certa, retidos na teoria eletromagnética da luz que conhecemos antes. Afinal de contas a intensidade da luz está vinculada ao quadrado da amplitude da onda eletromagnética que a constitui. Podemos dizer que onde Fresnel e outros físicos

que se dedicaram ao estudo da óptica enxergavam a intensidade do movimento de partículas mecânicas vinculados ao quadrado de suas velocidades, nós hoje enxergamos a intensidade de campos eletromagnéticos vinculados ao quadrado de sua amplitude de vibração. Ambas as visões associavam a intensidade da luz ao quadrado de uma grandeza física que gera dimensões de energia. Neste sentido podemos hoje discordar de Fresnel sobre a natureza da luz, mas concordamos sobre a forma de sua propagação e de seu comportamento em uma ampla gama de fenômenos.

O grande sucesso da teoria ondulatória da luz e a sua crescente aceitação fez com que um dos principais problemas da física teórica fosse estabelecer o que, afinal de contas, era o éter. Fazia parte deste projeto modelar sua elasticidade, sua densidade, a forma como suas partículas interagiam, e a forma como elas interagiam com a matéria comum, quais tipos de movimentos eram permitidos neste meio, entre outras questões. Com o advento do eletromagnetismo e sua unificação com óptica, iniciada por James C. Maxwell, o éter deveria abrigar também os fenômenos elétricos e magnéticos.

A pesquisa científica baseada em modelos e analogias mecânicas marcaram profundamente a história da óptica e de eletromagnetismo e consagraram o éter como uma das principais entidades teórica da física clássica sendo parte fundamental da imagem de natureza cultivada pelos físicos da época. Em 1888, o físico alemão Heinrich Hertz conseguiu pela primeira vez produzir e detectar ondas eletromagnéticas artificiais e laboratório, atestando o sucesso da teoria eletromagnética da luz inaugurada por Maxwell. A importância e a necessidade que os cientistas enxergavam na sua existência do éter para transportar a influências eletromagnéticas fez com que o importante físico George FitzGerald, um dos principais cientistas que deram continuidade à teoria de Maxwell, interpretasse tal experimento como a prova definitiva da detecção do éter. Para ele, provar a existência de ondas eletromagnéticas equivalia a provar a existência do éter, tamanha sua centralidade na física do século XIX.

Apesar de sua importância, os físicos nunca foram capazes de prover um modelo mecânico definitivo e consistente que desse conta de todas as propriedades que éter deveria ter. A construção de uma pluralidade de modelos foi importante para desenvolver as representações abstratas e matemáticas que os complexos fenômenos ópticos e eletromagnéticos exigiam, mas o projeto mecanicista de reduzir estas classes de fenômenos no escopo da física newtoniana nunca realmente se consolidou. Isto ocorreu desta maneira porque é simplesmente impossível reduzi-los à mecânica. O eletromagnetismo e mecânica newtoniana são intrinsecamente incompatíveis, de forma que a campo eletromagnético tem realidade própria e não precisa ser mecanizado.

Uma das razões de tal incompatibilidade é o fato de que as equações de Maxwell para o eletromagnetismo produzem um valor absoluto de velocidade da luz (299.792 km/s), isto é, que independe de qualquer referencial, um contrassenso para a física newtoniana que postula um espaço



absoluto. Ao longo do século XIX foram realizados inúmeros experimentos óticos e astronômicos que buscavam medir uma alteração na velocidade da luz em relação ao movimento da Terra. Segundo a concepção newtoniana de espaço e tempo, deveria ser possível medir o movimento relativo entre o referencial da Terra com o referencial do éter, supostamente em repouso absoluto no espaço interplanetário. A sucessão de resultados negativos para este tipo de experimento era uma dificuldade para a teoria do éter. Embora fosse possível criar teorias que explicassem estes experimentos um a um, não havia uma única teoria que explicassem todos ao mesmo tempo.

Além disso, o estudo das forças elétricas de interação entre cargas em movimento relativo também se mostravam incompatíveis com o princípio da ação e reação de Newton. Devido à velocidade finita das influências eletromagnéticas ao longo do espaço (que se propagam na velocidade da luz), o antiparalelismo entre as forças de ação e reação não se verifica. Tal princípio só se verifica na eletrostática, em que as cargas estão paradas uma em relação a outra, mas não se verifica na eletrodinâmica.

Esta crise da cinemática e dinâmica newtoniana culminou com a proposição da Teoria da Relatividade Restrita de Einstein em 1905, que abole os conceitos de espaço e tempo absolutos bem como o conceito de éter. Para Einstein e tantos outros físicos de sua geração, o campo eletromagnético poderia, digamos, “andar com as próprias pernas”, sem depender de modelos mecânicos ou de uma redução à mecânica newtoniana. Esta proposta, que foi paulatinamente aceita ao longo das primeiras décadas do século XX, rompe de maneira decisiva com alguns dos mais fundamentais aspectos da mecânica clássica, a saber, o espaço e tempo absoluto, e com uma das mais importantes imagens de ciência do século anterior: um mundo inteiramente mecânico. Tal ruptura torna **obsoleto** o conceito de éter, nas palavras de Einstein.

Esta breve história sobre a física do éter nos traz questionamentos importantes para nossa atitude e entendimento frente as teorias científicas do presente. As teorias do éter tinham uma robustez teórica, matemática e empírica notável, além de ampla aceitação pela comunidade científica. Mesmo assim, esta entidade teórica tão central foi eventualmente abandonada. É fato que nenhuma teoria científica, nem as melhores teorias do presente, conseguem explicar todo o domínio de fenômenos a elas destinado. Será que algumas destas lacunas sugerem que nossas teorias atuais serão também abandonadas? Será, então impossível que as teorias científicas sejam capazes de representar de maneira fiel a realidade física do mundo? Ou será que o papel delas não é este, mas sim o de prover explicações provisórias comprometidas apenas com o sucesso empírico, mas sem a pretensão de “capturar” a realidade íntima do mundo? Ou talvez possamos pensar que quando uma teoria é abandonada, algum aspecto dela (para além de seu sucesso empírico) permanece retido, mesmo de modificado de alguma forma, na teoria que a substitui? Estas são questões filosóficas que **não possuem respostas únicas ou definitivas**, mas que devem ser pensadas e debatidas.