

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA

TESE DE DOUTORADO

Renato Felix Rodrigues

**A Inferência à Melhor Explicação como heurística para o ensino de História da Ciência
na formação de professores de Física**

Orientador: Alexsandro Pereira de Pereira.

PORTO ALEGRE
2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA

TESE DE DOUTORADO

Renato Felix Rodrigues

**A Inferência à Melhor Explicação como heurística para o ensino de História da Ciência
na formação de professores de Física**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Ensino de Física.

PORTO ALEGRE
2021

Para Alcino Felix Rodrigues (in memoriam)

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Alexsandro, que foi fundamental durante esta etapa da minha formação.

A todos os professores do programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da UFRGS, especialmente Ives, Leonardo e Neusa, pelos inúmeros e variados ensinamentos. E aos professores Eliane Veit, Sílvio Cunha e Luiz Peduzzi, que foram banca do exame de qualificação deste trabalho.

Aos colegas de pós-graduação que conviveram comigo durante este período, compartilhando experiências e aprendizados. Em especial: Matheus, Tobias, Alexandre, Nathan, Terrimar, Claudio, Vagner, Paulo, Charles, Lisiane, Josiane, Djonathan, Daniel Batista, Daniel Mega, Elkin, Greivin, Diomar, Ricardo, Maykon, Estevão, Carolina e Felipe.

À minha família, por ter proporcionado as condições materiais e psicológicas para realização deste trabalho. Principalmente minha mãe, Iracema, meu irmão, Renan, e minha cunhada, Izabel.

À minha colega e companheira, Laís, por ter sido a principal incentivadora e apoiadora deste trabalho.

Aos estudantes do curso de Licenciatura em Física da UFRGS que aceitaram fazer parte de um dos estudos deste trabalho, e ao professor Leonardo Brunet, por ter permitido que parte dessa pesquisa fosse realizada em disciplina ministrada por ele.

Aos membros do laboratório de espectroscopia laser e óptica de filmes, por terem me recebido para realização de estágio de laboratório. Especialmente o professor Ricardo Correia.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e todos os seus funcionários, das mais diversas atividades, por terem proporcionado ambiente propício à realização desta pesquisa.

Resumo: Esta tese busca desenvolver e implementar uma estrutura narrativa para abordar episódios da história da Ciência na formação de professores de Física. Suas bases teóricas são a Inferência à Melhor Explicação (IME) e a “visão consensual” sobre aspectos da Natureza da Ciência (NdC). O texto começa com uma revisão de discussões da literatura em ensino de Ciências a cerca do uso de História, Filosofia e Sociologia da Ciência (HFSC), com ênfase no contexto atual das pesquisas, formas de abordar NdC defendidas pela literatura, discussões sobre o uso da história da Ciência para abordar aspectos da NdC, dificuldades encontradas por professores da educação básica ao utilizar HFSC em suas aulas e algumas reflexões sobre o uso de HFSC e NdC na formação de professores. Em seguida, é apresentada uma breve introdução às características principais da IME, enquanto discussão da filosofia da Ciência. Na sequência, o estudo I indica pontos de aproximação entre as discussões da IME e os aspectos consensuais do uso de NdC no ensino de Ciências, chegando à esquematização que propomos para estruturar a abordagem de episódios históricos. O aporte teórico da IME nos orienta a focar nos critérios epistêmicos utilizados para a escolha de uma explicação em detrimento de suas concorrentes, problematizando as crenças nas quais esses critérios se baseiam. No estudo II esta perspectiva é aplicada a dois episódios históricos: o efeito fotoelétrico e a quantização de Planck. No primeiro deles a quase-história tipicamente utilizada na apresentação desse episódio é problematizada. No segundo episódio, optou-se por abordar a discordância entre duas representações históricas sobre um mesmo episódio histórico. Por fim, no Estudo III, foram analisadas aulas produzidas por três estudantes de licenciatura em Física, instruídos a abordar episódios históricos segundo esta perspectiva. Este estudo permitiu identificar dificuldades associadas à implementação dessa proposta, principalmente no caso de usuários com pouca experiência com discussões da história, filosofia e sociologia da ciência. As principais dificuldades encontradas foram: dominar as teorias científicas do período histórico específico; abordar, em profundidade, os confrontos explicativos; e identificar discussões epistemicamente relevantes.

Palavras-chave: Inferência à Melhor Explicação, Natureza da Ciência, História da Ciência, Filosofia da Ciência, Formação de Professores, Ensino de Física.

Abstract: This thesis aims to develop and implement a narrative structure to approach episodes from history of science in the training of physics teachers. Its theoretical foundations are the Inference to the Best Explanation (IBE) and the “consensual view” on Nature of Science (NoS). The text begins with a review of discussions from science education literature about the use of History, Philosophy and Sociology of Science (HPSS), emphasizing the current context of research, ways of approaching NoS advocated by the literature, discussions about using the history of Science to address aspects of NoS, difficulties faced by high school teachers using HPSS in their classes, and some reflections on the use of HPSS and NoS in teacher’s training. Then, it is presented a brief introduction about the main characteristics of the IBE, as a discussion in philosophy of Science. Subsequently, study I indicates an approximation between the discussions of IBE and the consensual view of NoS, culminating in the structure we propose to approach historical episodes. The theoretical contribution of IBE guides us to focus on the epistemic criteria used to choose an explanation at the expense of its competitors, questioning the beliefs on which these criteria are based. In study II this perspective is applied to two historical episodes: the photoelectric effect, and Planck's quantization. In the first one, the quasi-story typically used to present this episode is problematized. In the second episode, it was addressed the disagreement between two historical representations about the same historical episode. Finally, in Study III, we analyze three lectures produced by undergraduate physics students, guided to approach historical episodes from this perspective. This study allowed us to identify difficulties associated with the implementation of the proposal, especially in the case of students with little experience with discussions of the history, philosophy and sociology of science. The main difficulties encountered are: mastering the scientific theories of a specific historical period; addressing in-depth explanatory confrontations; and identifying epistemically relevant discussions.

Keywords: Inference to the Best Explanation, Nature of Science, History of Science, Philosophy of Science, Teacher Education, Physics Teaching.

Lista de Tabelas e Quadros

Quadro 1 – Esquematização da abordagem	60
Quadro 2 – Síntese da discussão sobre o episódio do planeta Vulcano	67
Quadro 3 – Síntese do episódio de IME sobre a explicação do efeito fotoelétrico	77
Quadro 4 – Síntese da discussão sobre o episódio histórico da quantização da energia ..	93
Quadro 5 – Valores de momento angular atômico (J) e os respectivos valores possíveis das suas componentes (m_j), em unidades de \hbar	112
Quadro 6 – Síntese da análise do seminário I (Experimento de Stern-Gerlach e o Spin do elétron)	115
Quadro 7 – Síntese da análise do seminário II (Teorias Sobre o Éter e os Experimentos de Michelson e Morley)	127
Quadro 8 – síntese da análise do seminário III (radioatividade).....	139

Lista de Abreviaturas e Siglas

AMHIC	Abordagem Multicontextual da História da Ciência
BNCC	Base Nacional Curricular Comum
CTS	Ciência, Tecnologia e Sociedade
FMC	Física Moderna e Contemporânea
HFC	História e Filosofia da Ciência
HFSC	História, Filosofia e Sociologia da Ciência
HPSS	Do inglês, <i>History, Philosophy and Sociology of Science</i>
IBE	Do inglês, <i>Inference to the Best Explanation</i>
IME	Inferência à Melhor Explicação
NdC	Natureza da Ciência
NoS	Do inglês, <i>Nature of Science</i>

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA NO ENSINO DE FÍSICA.....	16
2.1 Natureza da Ciência.....	16
2.1.1 O que é Natureza da Ciência?	16
2.1.2 Uma breve história da filosofia da Ciência (no século XX)	17
2.1.3 Reflexo para o ensino: uma história das pesquisas feitas no ensino de Ciências	19
2.1.4 Mitos do ensino de Natureza da Ciência	20
2.2 Tipos de Abordagens Defendidas pela Literatura	22
2.2.1 Visão consensual	23
2.2.2 Princípios heurísticos vs investigação científica	28
2.2.3 Ensinar com e sobre Natureza da Ciência	31
2.3 Natureza da Ciência Via História da Ciência	33
2.3.1 Justificativas para abordar a História, Filosofia e Sociologia da Ciência	33
2.3.2 Formas de abordar a História, Filosofia e Sociologia da Ciência	34
2.3.3 História distorcida	34
2.4 Professores de Ciências e a História, Filosofia e Sociologia da Ciência	37
2.4.1 Síntese das dificuldades encontradas	38
2.4.2 Alguns resultados e suas implicações	41
2.5 Implicações Para a Formação de Professores.....	41
2.5.1 Domínios de conhecimento para o ensino com e sobre Natureza da Ciência	42
2.5.2 Reflexões sobre a formação de professores	43
3 REFERENCIAL TEÓRICO: A INFERÊNCIA À MELHOR EXPLICAÇÃO	46
3.1 Inferência à Melhor Explicação: Algumas Definições Pertinentes	47
3.2 A Inferência à Melhor Explicação	49
3.3 Olhando Para Episódios Históricos Segundo a Inferência à Melhor Explicação	52
4 ESTUDO I: APROXIMANDO NATUREZA DA CIÊNCIA E INFERÊNCIA À MELHOR EXPLICAÇÃO	55
4.1 Aspectos Consensuais e a Inferência à Melhor Explicação.....	55
4.2 Esquematização da Abordagem.....	58
4.3 Por Uma Abordagem Que Não Seja Estruturalista Nem Relativista	62
4.4 Uma Ilustração Breve	65
5 ESTUDO II: ABORDAGEM DE EPISÓDIOS HISTÓRICOS	68
5.1 Episódio 1: O Efeito Fotoelétrico	69
5.1.1 Contexto científico da época	70

5.1.2 Explicação potencial 1: hipótese gatilho de Lenard.....	71
5.1.3 Explicação potencial 2: Einstein e o quantum	71
5.1.4 A década de 1900: Lenard vence a disputa	73
5.1.5 A década de 1910: teoria versus lei.....	73
5.1.6 Quando a hipótese de Einstein é aceita	75
5.1.7 Síntese do episódio.....	76
5.2 Episódio 2: Planck e a Quantização da Energia.....	77
5.2.1 Contexto científico anterior	79
5.2.2 A interpretação “padrão”	82
5.2.3 Interpretação alternativa.....	85
5.2.4 Quando a teoria quântica “nasceu”?	88
5.2.5 Quem é o “pai” da teoria?	90
5.2.6 Unidades de descoberta	91
6 ESTUDO III (PARTE I): EPISÓDIOS DE INFERÊNCIA À MELHOR EXPLICAÇÃO NA FORMAÇÃO DE PROFESSORES	95
6.1 Contexto do Estudo	95
6.1.1 A licenciatura em Física da UFRGS	95
6.1.2 A disciplina na qual o estudo foi desenvolvido	96
6.1.3 Os sujeitos de pesquisa	97
6.1.4 Desvios de Percurso	99
6.1.5 Sequência das Aulas até os Seminários Analisados.....	100
6.2 Metodologia do Estudo III	100
6.2.1 Delineamento do estudo III	100
6.2.2 Ferramenta de Análise de Seminários.....	101
7 ESTUDO III (PARTE II): OS SEMINÁRIOS ANALISADOS.....	104
7.1 Seminário I: Experimento de Stern-Gerlach e o Spin do elétron	104
7.1.1 Materiais disponibilizados ao estudante	104
7.1.2 Resumo do contexto histórico do episódio.....	104
7.1.3 Transcrição do seminário	105
7.1.4 Análise.....	109
7.1.5 Comentários sobre o seminário	114
7.2 Seminário II: Teorias Sobre o Éter e os Experimentos de Michelson e Morley	115
7.2.1 Materiais disponibilizados	115
7.2.2 Resumo breve do episódio histórico	116

7.2.3 Transcrição do seminário	119
7.2.4 Análise do seminário	122
7.2.5 Comentários sobre o seminário	126
7.3 Seminário III: Radioatividade	128
7.3.1 Referências fornecidas	128
7.3.2 Resumo breve do episódio histórico	128
7.3.3 Transcrição do seminário	131
7.3.4 análise do seminário	133
7.4 Conclusões do estudo III	139
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	141
REFERÊNCIAS	144
Apêndice A - Tópicos Abordados Pela Disciplina ao Longo do Semestre Do Estudo III	160
Apêndice B - Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.....	161
Apêndice C - Questionário Sobre Concepções de Natureza da Ciência.....	162
Apêndice D - A Inferência à Melhor Explicação como Heurística para Abordar Episódios da História da Ciência	163
Apêndice E - Texto de Apoio para o Seminário Sobre o Experimento de Stern-Gerlach.....	177
Apêndice F - Texto de Apoio para o Seminário Sobre as Teorias do Éter e o Interferômetro De Michelson-Morley.....	179
Apêndice G - Texto de Apoio para o Seminário Sobre Radioatividade	184

1 INTRODUÇÃO

A filosofia da Ciência é uma área da filosofia preocupada com os fundamentos, métodos e implicações da Ciência. Entre as principais questões abordadas por esta área estão: o que conta como Ciência? Qual a confiabilidade das teorias científicas? Qual o propósito final da Ciência? Nas últimas décadas a área de Educação em Ciências começou a se apropriar de elementos da filosofia da Ciência para promover uma formação cidadã mais reflexiva sobre as práticas da Ciência (Acevedo, Vázquez, Paixão, Acevedo, Oliva, & Manassero, 2005; Matthews, 1995; Praia, Pérez, & Vilches, 2007; Reis & Galvão, 2005). Ganha destaque, nesse sentido, a discussão de elementos de Natureza da Ciência (NdC), que possibilita conhecer (e problematizar) os mecanismos que regulam a atividade científica. Discutir elementos da NdC consiste também em uma forma de promover alfabetização científica por meio da educação **sobre e pela** Ciência, relacionada à compreensão da natureza, dos propósitos e da história da Ciência (Abd-El-Khalick, 2013; Acevedo et al., 2005; Vázquez-Alonso et al., 2008).

Pode-se destacar duas formas principais como aspectos de NdC vêm sendo abordados tradicionalmente na Educação Científica: através de práticas educativas que, em alguma medida, reproduzam aspectos da atividade científica (como ocorre em atividades de Ensino por Investigação); ou abordando episódios da História da Ciência como ponto de partida para discutir as características do conhecimento científico (McCain, 2015). O uso de episódios da História, em particular, é considerado fundamental para o trabalho de filósofos da Ciência, como ilustra a frase célebre de Imre Lakatos: “A Filosofia da Ciência é vazia sem História da Ciência; a História da Ciência é cega sem Filosofia da Ciência” (Lakatos, 1987, p. 12, nossa tradução). Entre as vantagens de utilizar episódios da História da Ciência para discutir aspectos da NdC, pode-se destacar: compreender as dimensões social e contextual da produção do conhecimento (e.g., Pérez, Montoro, Alís, Cachapuz & Praia, 2001; Praia et al., 2007; Silva & Moura, 2008); superar visões sobre a Ciência que a literatura tem apontado como “ingênuas” e limitadas por, dentre outros motivos, considerarem apenas uma parte do que é o empreendimento científico (e.g., Medeiros & Monteiro, 2002; Oki & Moradillo, 2008; Pérez et al., 2001; Praia et al., 2007; Reis & Galvão, 2005); e compreender a atividade científica como produtora de um conhecimento de caráter provisório, no sentido de poder ser substituído por outro conhecimento (científico) mais abrangente ou completo (Boas, Silva, Passos & Arruda, 2013).

Abordar História, Filosofia e Sociologia da Ciência (HFSC) pode ser pensado tanto como conteúdo (em si) das disciplinas científicas, como uma estratégia didática facilitadora na aprendizagem de conceitos, modelos e teorias (Martins, 2007). Mas se abordar tópicos de HFSC é defendido (quase) unanimemente pelos pesquisadores em Educação em Ciências (e.g., El-Hani, 2007; Matthews, 1995), porque não a vemos ser contemplada nas salas de aula (Martins, 2007) e nos livros didáticos (Medeiros & Monteiro, 2002)? Martins (2007, 2019) atribui ao fato de não ser algo simples de fazer. O autor aponta que há um abismo entre o valor atribuído à HFSC e a sua utilização, com qualidade, como conteúdo e estratégia didática em sala de aula. Em situações práticas a HFSC ainda é pensada como algo secundário, utilizado a título de “ilustração” para introduzir e motivar o ensino dos temas “regulares” (Martins, 2007). Isto faz a HFSC ser apresentada muitas vezes de forma simplista, sugerindo uma evolução crescente e linear que conduziu ao conhecimento científico atual. Dessa forma, parece não se levar muito a sério a perspectiva de aprender Física por meio da HFSC, mas como “ilustração” ela dificilmente cumprirá esse papel (Martins, 2007).

Uma das medidas que pode alterar esse quadro, ao menos em longo prazo, é abordar HFSC para discutir elementos da NdC na formação de professores de Ciência. Autores que defendem este ponto (e.g., Barros & Carvalho, 1998; Brito, Neves & Martins, 2004; Duarte, 2004; Marandino, 2003) criticam as licenciaturas por, usualmente, priorizarem a competência do conteúdo disciplinar. Nesse contexto, desenvolver as habilidades dos futuros professores refletirem sobre o conteúdo e problematiza-lo histórica e/ou filosoficamente têm recebido pouca ênfase (Boas et al., 2013). A inclusão de HFSC pode favorecer uma visão crítica dos professores sobre a Ciência, possibilitando que eles possam sustentar com seus alunos discussões com um nível razoável de profundidade sobre certos temas, além de serem capazes de analisar os pressupostos que estão assumindo em suas aulas (Paruelo, 2003). Além disso, Martins (2007) considera a **HFSC como uma necessidade formativa do professor de Ciências**, na medida em que pode contribuir para: evitar visões distorcidas sobre o fazer científico, permitir uma compreensão mais refinada dos diversos aspectos envolvendo o processo de ensino-aprendizagem da Ciência e proporcionar uma intervenção mais qualificada em sala de aula.

No cenário atual de fake news e pós-verdade, é demanda do ensino de Ciências proporcionar clareza sobre a produção e avaliação de hipóteses, a abordagem de questões controversas e saber avaliar, racionalmente, os pontos fortes e fracos dos lados opostos envolvidos em um debate. Trabalhos sobre argumentação científica têm abordado estes

pontos recentemente (e.g., McNeill & Pimentel, 2010; Sá & Queiroz, 2011; Sasseron & Carvalho, 2011). De nossa parte, tenta-se contribuir para esta questão ao integrar duas discussões distintas. De um lado, aspectos da NdC “consensualmente” defendidos entre pesquisadores em ensino de Ciências e, de outro, discussão epistêmica que tem sido realizada ao longo das últimas décadas na filosofia do conhecimento (i.e., epistemologia) sobre a Inferência à Melhor Explicação (IME) (McCain, 2015). Moura e Silva (2014) propõem abordagem que pode ser considerada um exemplo do tipo de trabalho que pretendemos realizar. Os autores apresentam uma proposta de ensino de conteúdos históricos para a formação de professores, denominada “Abordagem Multicontextual da História da Ciência” (AMHIC). Na AMHIC os episódios históricos são estudados a partir de um viés problematizador, por meio de três contextos: **científico**, **metacientífico** e **pedagógico**. O objetivo geral desta tese é apresentar uma abordagem para o ensino de HFSC na formação de professores, assim como a AMHIC faz, mas de modo diferente. Para isso, são adotadas como referências a IME, aspectos consensuais do ensino de NdC (e.g., Lederman, 2006), discussões do ensino de história da Ciência (e.g., Allchin, 2004; Gomes & Pietrocola, 2011), e domínios de conhecimento necessários para professores abordarem estas questões (Abd-El-Khalick, 2013).

Mais especificamente, este trabalho pretende responder às seguintes questões de pesquisa:

1- Como as características da Inferência à Melhor Explicação podem ser mobilizadas para abordar elementos da Natureza da Ciência por meio de episódios da história da Ciência no ensino de Física?

2- Quais as características principais do estudo de episódios históricos realizados segundo esta perspectiva?

3- Que dificuldades estudantes de licenciatura em Física apresentam ao tentar empregar esta perspectiva para abordar episódios históricos?

Nos próximos capítulos são apresentadas as bases teóricas que foram consideradas durante o desenvolvimento desta abordagem (capítulos 2 e 3) e os Estudos I, II e III, que foram realizados para responder as questões de pesquisa apresentadas (capítulos 4 a 7). Em particular, no capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura sobre questões referentes ao uso de História e Filosofia da Ciência no ensino de Ciências. Neste capítulo também é

apresentada a visão consensual sobre a Natureza da Ciência, adotada como referencial epistemológico para a sequência do trabalho. Em seguida, no capítulo 3, é apresentada uma breve introdução às principais ideias e discussões identificadas com respeito ao uso da IME. O capítulo 4 apresenta o Estudo I, no qual as duas literaturas abordadas nos capítulos anteriores são aproximadas. Neste estudo também é introduzida a abordagem que desenvolvemos. No capítulo 5 é apresentado o Estudo II, no qual são utilizados dois episódios históricos para ilustrar a abordagem de episódios históricos segundo esta perspectiva. Foi adotado o recorte de abordar episódios históricos relacionados a conteúdos de Física Moderna (o efeito fotoelétrico e a quantização da energia da radiação de corpo negro). Na sequência, o Estudo III foi dividido em dois capítulos. No capítulo 6 é apresentado o contexto no qual este estudo é realizado, enquanto que no capítulo 7 é apresentada a análise de três aulas que abordam episódios históricos com base na estrutura proposta, ministradas por estudantes de um curso de formação de professores de Física. Os episódios históricos contemplados foram: experimento de Stern-Gerlach e o Spin do elétron; teorias sobre o éter e o experimento de Michelson-Morley; e radioatividade. No capítulo 8, por fim, é feita uma síntese dos principais resultados obtidos ao longo da pesquisa.

2 HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA NO ENSINO DE FÍSICA

O objetivo deste capítulo é revisar o modo como a NdC vem sendo abordada entre pesquisadores em Ensino de Ciências. Este texto se baseia em outras revisões (e.g., Lederman, 2006; Moura, 2014; Boas et al., 2013). Não temos a intenção de fazer uma revisão ampla e detalhada sobre as pesquisas feitas nessa área em um intervalo de tempo específico, a partir de um conjunto de periódicos de referência, como é feito em outras revisões da literatura. O propósito desta revisão é destacar discussões sobre NdC relevantes para o tipo de proposta que este trabalho oferece. Dessa forma, serão discutidos: (1) tipos de abordagens propostos pela literatura para abordar NdC em aulas de Ciências, (2) como a HFSC tem sido abordada com este respeito e (3) o tipo de consideração que vem sendo feita sobre a abordagem destas questões no contexto da formação de professores.

Resumindo o conteúdo deste capítulo, ele começa discutindo brevemente o que é NdC, como a questão tem sido abordada pela filosofia da Ciência e como tem sido abordada pelo ensino de Ciências nas últimas décadas, com destaque para alguns aspectos que a literatura tem defendido de forma praticamente unânime (e.g., foco no ensino explícito de aspectos sobre a NdC). Em seguida, são apresentadas algumas das principais discussões que são identificadas na literatura contemporânea sobre o uso de NdC. A visão consensual sobre a NdC, o ensino por meio de princípios heurísticos e ensino por investigação são apresentados e problematizados. Depois são discutidos alguns aspectos voltados ao uso específico da história da Ciência para abordar a NdC. Essa discussão foca em problemas e desafios encontrados ao se tentar trazer episódios históricos para o ensino de Ciência, como a falta de fontes confiáveis, e a difusão de pseudohistória e história *whigg*. Esta revisão termina destacando as muitas dificuldades que professores apresentam para abordar a HFSC em suas aulas, concluindo com algumas reflexões retiradas da literatura sobre o que pode ser feito na formação de professores para tentar amenizar esta situação.

2.1 Natureza da Ciência

2.1.1 O que é Natureza da Ciência?

Vamos começar esclarecendo a que se refere a expressão “Natureza da Ciência”. Brian Alters (1997) considera não ser possível estabelecer uma **única** definição de natureza da Ciência. No entanto, pode-se dizer que, em linhas gerais, a NdC engloba um conjunto de saberes sobre aspectos epistemológicos, filosóficos, históricos e culturais da Ciência (Moura, 2014). Como dito por Lederman (1992), NdC tipicamente se refere à epistemologia da Ciência, à Ciência como um modo de saber, ou aos valores e crenças inerentes ao conhecimento científico e ao seu desenvolvimento. Dessa forma, estudar a natureza da Ciência significa compreender como o ser humano constrói o conhecimento científico em cada contexto e em cada época, tendo como base suas concepções filosóficas, ideológicas e metodológicas. (Moura, 2014).

Dessa forma, a NdC é entendida como um conjunto de elementos que tratam da construção, estabelecimento e organização do conhecimento científico. Ela pode se voltar para questões internas à Ciência (e.g., método científico, relação entre experimento e teoria) ou externas (e.g., influência de elementos sociais, culturais, religiosos e políticos na aceitação ou rejeição de ideias científicas). Este tema tem recebido foco contínuo no ensino de Ciências a, pelo menos, três décadas. Além disso, entender a NdC costuma ser associado com alguns objetivos educacionais. Driver, Leach e Millar (1996), por exemplo, destacam cinco deles: (1) **utilitário** – entender a NdC é necessário para entender a Ciência e manipular os objetos tecnológicos e processos na vida cotidiana; (2) **democrático** – entender a NdC é necessário para a tomada de decisões sociocientíficas informadas; (3) **cultural** – entender a NdC é necessário para apreciar o valor da Ciência como parte da cultura contemporânea; (4) **moral** – entender a NdC ajuda a desenvolver compreensão sobre compromissos morais da comunidade científica que possuem valor geral para a sociedade; e (5) **aprendizagem de Ciências** – entender a NdC facilita a aprendizagem de conteúdos científicos.

2.1.2 Uma breve história da filosofia da Ciência (no século XX)

Concepções sobre a NdC também mudam com o tempo. Múltiplas perspectivas filosóficas já surgiram para descrever e explicar o desenvolvimento do conhecimento científico. Duschl e Grandy (2013) destacam três movimentos principais que existiram na filosofia da Ciência ao longo do século XX, cada um com seus conflitos internos e

particularidades. (1) A visão lógica/formal do teste de hipóteses – que levou ao Positivismo Lógico, Empirismo Lógico e explicações Dedutiva-Nomológicas – para estudar a verificação das afirmações científicas; (2) a visão baseada na história do desenvolvimento de teorias – que levou a Paradigmas, Programas de Pesquisa, Princípios Heurísticos, e Tradições de pesquisa – para estudar o desenvolvimento do conhecimento científico; e (3) a visão baseada em modelos das dinâmicas cognitivas e sociais entre comunidades de pesquisadores – que levou à epistemologia social, filosofia naturalizada da Ciência e a epistemologia de acompanhamento – para estudar a produção e propagação de explicações científicas (Duschl & Grandy, 2013).

O primeiro movimento, dos Positivistas lógicos, surgiu do sucesso da lógica formal em clarificar e tornar rigorosos os fundamentos da Matemática. Esse movimento desejava estender esse sucesso para as Ciências. Embora o círculo de Viena seja o grupo mais famoso, existiram grupos paralelos em Varsóvia e Berlim. Esses pensadores buscavam primariamente clarificar a relação entre observações, leis e teoria. Eles definiram rigorosamente como observações específicas seriam capazes de confirmar ou refutar uma lei ou teoria. Como um resultado deste projeto, uma solução para o problema da demarcação foi encontrada: uma afirmação é significativa apenas no caso dela ser suscetível à confirmação ou à refutação. Ernst Mach inspirou muitas ideias deste grupo, mas entre os seus membros mais famosos podemos destacar Carnap, Hempel, Neurath e Reichenbach. Dois princípios importantes deste grupo são que: a análise de observações experimentais são objetivas e imparciais; e que o projeto da filosofia da Ciência é limitado a entender as teorias finalizadas, e não os processos por meio dos quais os cientistas chegam até elas (Reichenbach, 1961).

O segundo movimento passou a abordar a NdC a partir da ótica da história da Ciência. Ele introduziu três novos elementos: (1) análise do desenvolvimento histórico das teorias e da sua relação com evidências, (2) entender que **observação** é um conceito filosoficamente complexo, e (3) a relevância da comunidade de pesquisa científica para produção e avaliação de hipóteses. Seus estudos mostraram que as teorias não eram bem modeladas por sentenças estáticas, mas eram desenvolvidas ao longo do tempo, por uma comunidade de pesquisa, e em resposta a evidências positivas e negativas. Eles também mostraram que as comunidades de pesquisa relevantes eram diversas em suas opiniões e valores, e que a escolha entre teorias parecia às vezes ser uma questão de contingência ou de fatores econômicos ou sociais. A **Estrutura das Revoluções Científicas**, de Thomas Kuhn (1998), apresentou o quadro mais influente deste período, embora a maioria dos elementos presentes nesta obra possam ser

encontrados em outros escritores mais ou menos contemporâneos, como Feyerabend, Hanson, Toulmin e Fleck (Duschl & Grandy, 2013).

O terceiro movimento, filosofia da Ciência naturalizada, emergiu como um alternativa à virada histórica. Ele passou a olhar mais atentamente para o mundo material dos cientistas e suas práticas sociais e cognitivas. Visões contemporâneas (e.g., Cetina, 1999) adotaram uma abordagem naturalista para explicar a emergência de novos critérios ou padrões conceituais (o que nós sabemos), metodológicos (como nós sabemos), e epistemológicos (porque nós acreditamos) para o desenvolvimento do conhecimento científico. Dessa forma, a Ciência também passou a ser vista como um fenômeno natural, recrutando processos cognitivos e sociais para alcançar seus resultados (Duschl & Grandy, 2013). Como resultado, filósofos da Ciência começaram a olhar não só para a história, mas também para a psicologia cognitiva em sua busca por entender a atividade científica (Thagard, 2002).

Esta discussão aponta, em linhas gerais, como a filosofia da Ciência progrediu ao longo do último século. Os três principais movimentos na filosofia da Ciência, cada um com seus conflitos internos e variedades, podem ser utilizados como guia para examinar as várias representações e debates sobre a NdC na Ciência escolar. Um exemplo é a presença (ao menos implícita) de elementos da visão lógico-positivista em muitos livros didáticos. Esses estudos chegaram a alguns resultados importantes. Um deles é que os quadros conceitual e metodológico da Ciência mudam com o tempo. Mudanças na metodologia são uma consequência de novas ferramentas, novas tecnologias, modelos explicativos e teorias que, por sua vez, continuam a mudar o conhecimento e a prática científica. Além disso, o entendimento contemporâneo da NdC considera que a maioria do engajamento dos cientistas não é em esforços individuais na direção da aceitação de teorias finais, mas em comunidades de cientistas lutando para aprimorar e refinar teorias (Duschl & Grandy, 2013). No entanto, vale ressaltar que o debate sobre filosofia da Ciência entre filósofos é fundamentalmente diferente das discussões realizadas na literatura especializada em ensino de Ciências – apesar da existência de tópicos comuns.

2.1.3 Reflexo para o ensino: uma história das pesquisas feitas no ensino de Ciências

Se voltando agora para a Educação em Ciências, nota-se que no contexto pós-segunda guerra a formação de cientistas passa a ser uma necessidade política e econômica crescente, o

que acaba influenciando o ensino de Ciências como um todo. Nos EUA, por exemplo, as décadas entre 1950 e 1980 são marcadas pela ênfase do ensino de Ciências em atividades investigativas voltadas para a formação de cientistas. Por volta de 1980, essa agenda do ensino de Ciências começa a se afastar do foco em “Ciência para cientistas” e a se voltar para o foco em “Ciência para todos”. O mesmo movimento se observa, um pouco mais tarde, em países da América Latina como o Brasil. O resultado deste cenário foi a grande importância que a inclusão de aspectos da NdC adquiriu nas últimas décadas, tanto entre os pesquisadores do ensino de Ciências quanto em legislações educacionais em todo o mundo (e.g., AAAS, 1990; BRASIL, 2000; Matthews, 1995; McComas et al., 1998; Pérez et al., 2001).

Como uma compreensão adequada de NdC tornava-se um objetivo primário do ensino de Ciências, surgiu a necessidade de avaliar as concepções de professores e estudantes de Ciências sobre a NdC. Muitos questionários foram propostos com esta finalidade. O resultado mais relevante deste cenário é a esmagadora conclusão de que os estudantes não possuem concepções adequadas sobre a natureza do raciocínio científico (e.g., Dogan & Abd-El-Khalick, 2008; Kang et al., 2005; Rubba & Andersen, 1978).

O uso de instrumentos de avaliação de concepções de NdC é complexo e envolve tentativas de superar uma série de dificuldades. Cada pesquisador interpreta o que ele próprio considera a concepção correta, pesquisadores podem interpretar as respostas diferentemente da intenção de quem as responde¹, entre outras dificuldades. Foge do nosso escopo uma discussão detalhada dessas questões, e indicamos a leitura de Lederman (2006) para maior detalhe. Embora haja muitas críticas à validade de vários instrumentos de avaliação ao longo dos anos, a compreensão de professores e estudantes foram consistentemente identificadas como deficientes. Este resultado consistente, independente da abordagem de avaliação, suporta a noção de que a compreensão de estudantes e professores não está no nível desejado. Recentemente podemos notar uma mudança no foco de pesquisas sobre NdC. Embora pesquisas designadas para avaliar as concepções de estudantes e professores continuem sendo feitas até hoje, o foco tem se movido na direção da realidade das práticas escolares diárias (Lederman, 2006), o que Martins (2012) trata como ênfase no **como** fazer.

2.1.4 Mitos do ensino de Natureza da Ciência

¹ casos como o de Lederman e O'Malley (1990) relatam a discrepância entre suas interpretações de respostas escritas por estudante da interpretação que surgiu de entrevistas feitas com os mesmos indivíduos.

Há muito tempo a introdução de elementos de NdC tem sido aceita como importante e necessária no ensino de Ciências. No entanto, surgiram discussões sobre o modo de fazer isso. Acevedo et al. (2005), por exemplo, consideram dois “mitos” que surgiram no debate sobre a inclusão de elementos da NdC no ensino, que constituem considerações relevantes para qualquer proposta que se proponha a abordar esta questão. O primeiro mito diz respeito a considerar que a compreensão de um professor sobre NdC é necessariamente refletida em seu comportamento. Dessa forma, assume-se que o comportamento do professor em sala de aula é necessariamente e diretamente influenciado pelas suas concepções sobre NdC. Já o segundo mito, que está intimamente relacionado ao primeiro, assume que a concepção de Ciência dos professores afeta diretamente a concepção dos seus estudantes. Embora considerações desse tipo sejam afirmadas explicitamente em muitos trabalhos, a literatura demonstrou o quão simplistas estas considerações são (e.g., Brickhouse, 1989; Duschl & Wright, 1989; Lederman, 2006).

Outra discussão relevante, entre o final dos anos 1990 e começo dos anos 2000, foi o debate sobre o modo de abordar a NdC, mais especificamente sobre a questão desses elementos serem preferencialmente abordados de forma **implícita** ou **explícita**. Em geral, estudos sobre esta questão tomam um entre dois caminhos. O primeiro é chamado de “abordagem implícita”, e sugere que a compreensão da NdC é um resultado de aprendizagem que pode ser facilitado através de processos de instrução, cursos de conteúdos científicos e atividades de “fazer Ciência”. Pesquisadores que adotam esta abordagem implícita focam no desenvolvimento de habilidades específicas e/ou atividades de investigação científicas, na tentativa de aprimorar concepções sobre NdC de professores ou estudantes. Já pesquisadores que adotaram a segunda abordagem para estimular a compreensão sobre NdC utilizam elementos da história e filosofia da Ciência e/ou instrução focada em vários aspectos da NdC para aprimorar as concepções sobre a Ciência. Esta segunda abordagem é denominada de “abordagem explícita” (Lederman, 2006). Nas últimas duas décadas, tem se tornado consenso (ou, pelo menos, a visão dominante entre os pesquisadores) que o ensino explícito de elementos de NdC é a forma mais adequada de abordar esta questão. Como dito por Bell, Lederman e Abd-El-Khalick (1998), a literatura tem indicado que, assim como não é suficiente educar futuros professores sobre a NdC e esperar que isto automaticamente impacte seu ensino, também não é suficiente proporcionar um ambiente de sala de aula ou atividades consistentes com visões contemporâneas de natureza da Ciência na esperança de que os

estudantes aprenderão o constructo implicitamente. Como qualquer outro conteúdo científico, a natureza da Ciência deve ser abordada intencionalmente e de modo explícito.

Dentro desta perspectiva, os métodos de ensinar NdC têm-se mostrado eficazes quando abordam alguns dos seus aspectos básicos de maneira explícita e reflexiva. Há relatos positivos quando se usam atividades baseadas na pesquisa científica (Schwartz & Lederman, 2002), na História e Filosofia da Ciência (Abd-El-Khalick & Lederman, 2000b; Lin & Chen, 2002; Rudolph, 2003), com enfoque CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade) (Bagdonas, 2020; Spector, Strong & Porta, 1998), capazes de relacionar o mundo real e cotidiano dos alunos (Khishfe & Abd-El-Khalick, 2002) e na resolução de controvérsias científicas (Kolstø, 2000). A “vitória” da visão “explícita” não implica considerar que o ensino de NdC via investigação científica seja considerado inferior ou inviável. O resultado apontado pela literatura é que a investigação isoladamente não é suficiente para superar visões ingênuas sobre a NdC. Este tema será aprofundado na próxima seção.

Lederman (2006) sintetiza os resultados iniciais das pesquisas sobre NdC (que são suportados pelas pesquisas mais recentes) como segue: (a) em geral, professores e estudantes de ensino médio não possuem concepções adequadas sobre NdC (e.g., Dogan & Abd-El-Khalick, 2008; Kang et al., 2005; Rubba & Andersen, 1978); (b) concepções sobre NdC são melhor aprendidas por meio de instruções reflexivas e explícitas, em vez de implicitamente durante experiência de “fazer” Ciência (e.g., Anderson, 2007; Sweitzer & Anderson, 1983). Abordar aspectos históricos do conhecimento científico ou atenção explícita e direta para a NdC também obteve relativo sucesso. Além disso, (c) é bem documentado que as concepções dos professores sobre NdC não são automaticamente nem necessariamente traduzidas para práticas de sala de aula.

2.2 Tipos de Abordagens Defendidas pela Literatura

Os temas que abordamos na seção anterior são aqueles que, embora passíveis de alguma discordância, em geral podem ser considerados resultados bem estabelecidos ao longo das últimas décadas de pesquisa sobre NdC no ensino de Ciências. Já esta seção engloba

aspectos do debate sobre formas de abordar NdC que são atualmente vistas como controversas na literatura especializada, principalmente em nível internacional².

Há um vivo debate para caracterizar e ensinar “o que é Ciência”. Um de seus pilares é o objetivo de abordar a NdC como resultado dos trabalhos de historiadores, filósofos e sociólogos da Ciência. Uma das principais discussões deste campo envolve identificar aspectos consensuais sobre a NdC, que sejam amplamente aceitos como de validade geral (Abd-El-Khalick, 2012). De um lado deste debate estão defensores de que a NdC deve ser abordada utilizando aspectos consensuais desse tipo, ensinados por meio de referências explícitas a um conjunto de **princípios heurísticos** que filósofos e historiadores da Ciência (e.g., Holton, 1969; Kragh, 1992; Kuhn, 1998) utilizam para caracterizar a Ciência (e.g., Abd-El-Khalick, 2013; Lederman, 2006). Do outro lado do debate está a posição de que a Ciência, assim como o ensino de Ciências, deve ser abordada em termos de **práticas** cognitivas, epistêmicas e sociais (Giere, 1990; Nersessian, 2002) que exemplifiquem o fazer científico. A visão de ensino de Ciências defendida por esses autores é que o aprendizado de NdC ocorre quando estudantes se engajam nessas práticas situadas e em contextos apropriados à idade (Duschl & Grandy, 2013). Se de um lado estão autores defendendo que os professores liguem explicitamente as afirmações consensuais a elementos das atividades de ensino de Ciências, do outro estão autores defendendo que os estudantes se envolvam em atividades práticas durante unidades curriculares que podem durar semanas ou meses, voltadas a reproduzir, em alguma escala, a produção do conhecimento científico – com destaque para a construção de modelos e atos de refinamento encontrados em medidas, observações, argumentação com base em evidências, e explicações. Essas duas visões (visão consensual e de ensino por investigação) são detalhadas na sequência. Posteriormente, são apontados pontos de aproximação e afastamento entre as duas abordagens, utilizando a discussão de Abd-El-Khalick (2013) sobre o ensino **com** e **sobre** NdC.

2.2.1 Visão consensual

A visão Consensual reconhece que há discordâncias sobre a definição ou significado de NdC entre filósofos, historiadores e professores de Ciências (Lederman & Abd-El-Khalick,

² Vale ressaltar que não pretendemos abordar todas as discussões que existem atualmente, mas focar naquelas que consideramos mais relevantes para nos ajudar a refletir sobre o tipo de trabalho desenvolvido nesta pesquisa.

1998). No entanto, autores que defendem esta perspectiva entendem que estas discordâncias emergem ao se abordar especificidades de disciplinas e situações particulares. Por outro lado, eles destacam que, ao abordar o tema em sentido amplo, há certa universalidade em algumas características do conhecimento científico. Dessa forma, autores como Niaz (2009) e Abd-El-Khalick (2013) afirmam que, apesar da complexidade de questões multifacetadas da NdC e controvérsias entre filósofos, um certo grau de consenso foi alcançado dentro da comunidade de ensino de Ciências, de modo que a natureza da Ciência possa ser caracterizada por alguns aspectos específicos. No entender desses autores, ao trabalhar com natureza da Ciência no ensino deveríamos abordar esses aspectos consensuais, tidos como características sobre a construção do conhecimento científico que a maioria dos pesquisadores concorda acerca do tema (e.g., McComas, Clough, & Almazroa, 1998; Pérez et al., 2001). Entre esses aspectos estão: que o conhecimento científico é tentativo (sujeito a mudanças), empiricamente baseado (baseado e/ou derivado da observação do mundo natural) e subjetivo (influenciado por fatores pessoais, vieses e orientações teóricas); envolve necessariamente a inferência humana, a imaginação e a criatividade (envolve a invenção de explicações); e é social e culturalmente situado. Dois aspectos importantes adicionais são as distinções entre observações e inferências, e entre teorias científicas e leis (Lederman, 2006).

Vale destacar que esta não se propõe a ser uma lista exaustiva das características do conhecimento científico, e que outros pesquisadores podem excluir alguns dos aspectos ou incluir outros (e.g., Osborne, Collins, Ratcliffe, Millar & Duschl, 2003; Scharmann & Smith, 2001). No entanto, existem pontos comuns às principais listas deste tipo. Nosso objetivo aqui não é o de enfatizar o (existente) confronto entre uma lista e as demais, mas destacar as características principais que as abordagens baseadas em consenso destacam. Dessa forma, pode-se considerar que os tópicos mencionados anteriormente, de modo geral, possam ser considerados uma boa representação do que os autores desta perspectiva consideram as principais características consensuais sobre a NdC.

Detalhando um pouco mais os aspectos da NdC considerados consensuais, começamos com a importância de entender a distinção crucial entre observação e inferência³. Como dito por Lederman (2006), observações são afirmações descritivas sobre os fenômenos naturais e são “diretamente” acessíveis aos sentidos (ou a extensões dos sentidos). É relativamente fácil

³ Vale destacar que este tema, como os demais, é alvo de intenso debate entre os filósofos da Ciência. Hanson (1975), por exemplo, sustenta que observações e interpretações são inseparáveis - no sentido de ser inconcebível manifestar qualquer das partes sem a outra.

obter consenso entre muitos observadores sobre aquilo que é observado (e.g., descrição da morfologia de um organismo vivo). Inferências, por outro lado, vão além dos sentidos. Por exemplo, alguém pode criar explicações sobre a morfologia observada em termos de suas possíveis contribuições para atividades orgânicas. Em um nível mais alto, um cientista pode inferir modelos ou mecanismos que explicam observações de fenômenos complexos (e.g., modelos do clima, evolução).

Um segundo ponto, estreitamente relacionado com a distinção entre observações e inferências, é a **distinção entre leis científicas e teorias**. É comum que as pessoas tenham uma noção simplificada e hierarquizada da relação entre teorias e leis. Segundo esse quadro, leis científicas possuem um status maior do que teorias científicas, e teorias podem se tornar leis, dependendo das evidências disponíveis e da confiança que os cientistas tenham nelas. Ambas as noções, no entanto, são inapropriadas porque, entre outras coisas, os dois conceitos se aplicam a tipos diferentes de conhecimentos, e a primeira não se desenvolve para se tornar a segunda. Embora definições como essas sejam foco de intensos debates na filosofia da Ciência, podemos utilizar as definições de Lederman (2006) para fins didáticos. Segundo o autor, leis são **afirmações ou descrições de relações** entre fenômenos observáveis. A lei de Boyle, que relaciona a pressão de um gás com seu volume a uma temperatura constante, é um exemplo. Teorias, por outro lado, são **explicações inferidas** de fenômenos observáveis (e.g., a teoria cinética molecular proporciona uma explicação para o que é observado e descrito pela lei de Boyle). Modelos científicos são exemplos comuns de teorias e inferências na Ciência. Além disso, teorias são um produto tão legítimo da Ciência quanto leis. Cientistas normalmente não formulam teorias na esperança de que um dia elas adquiram o status de uma “lei”.

Outro aspecto amplamente aceito da NdC é que **não existe um método científico universal**. Ao contrário das visões de senso comum sobre o método científico, os pesquisadores na área concordam que não existe um conjunto de passos universais (i.e., uma “receita de bolo”) a seguir para se chegar à “verdade científica” (Moura, 2014). É propagada pelo senso comum a visão de que uma teoria científica é sempre consequência de resultados experimentais. Esta ideia de uma relação linear entre teoria e experimento corrobora uma noção superficial do processo de construção do conhecimento científico. Entre os filósofos da Ciência contemporâneos, há um consenso de que a relação entre teoria e experimento é complexa, de modo que a teoria não seja uma consequência imediata da observação/experimento, nem o inverso (Niaz, 2009). Nenhuma observação é livre de uma

expectativa ou concepção prévia de quem a realiza, contrariando a visão que Chalmers (1993) chama de indutivismo ingênuo⁴.

Também considera-se que um modo importante por meio do qual o conhecimento científico é produzido é pela elaboração de modelos, explicações e conceitos a respeito do mundo natural. No entanto, a história da Ciência aponta de forma contundente como estas construções são, no fim, provisórias e falíveis. Elas se transformam ao longo do tempo e das sucessivas mudanças de contextos científicos, sociais e culturais (Moura, 2014). Segue desta discussão que **o conhecimento científico nunca é absolutamente certo**. Este conhecimento, incluindo “fatos”, teorias e leis, é tentativo e sujeito a mudança. Essas mudanças vão ocorrendo à medida que nova evidência, feita possível por avanços teóricos e/ou tecnológicos, é avaliada pelas teorias e leis existentes, ou quando evidências antigas são reinterpretadas à luz de um novo avanço teórico (Lederman, 2006). Nega-se, portanto, a visão de que a Ciência é um conjunto de verdades absolutas a serem aceitas cegamente. Pelo contrário, por ser conhecimento em contínua mudança, ela está sempre se reformando internamente, revendo seus modelos e bases, o que implica que nossa própria percepção dela também muda com o tempo (Moura, 2014).

Também percebe-se **a Ciência como um empreendimento humano praticado no contexto de uma larga cultura**. Como seus praticantes (os cientistas) são produtos desta cultura, a Ciência afeta e é afetada pelos vários elementos e esferas intelectuais da cultura na qual ela se situa. Esses elementos incluem, mas não são limitados a, tecido social, estruturas de poder, política, fatores socioeconômicos, filosóficos e religiosos. Este aspecto evidencia a não neutralidade da Ciência e do pensamento científico, isto é, os cientistas são influenciados pela época e o local em que vivem. Abordagens contemporâneas da NdC destacam como essas influências podem desempenhar um papel importante na aceitação, rejeição e desenvolvimento das ideias da Ciência (Moura, 2014). Além disso, a atividade científica é caracterizada pela competição entre teorias rivais (Niaz, 2009), mediada por uma grande organização social (Longino, 1990) que possui seus próprios meios de regulação – como revisão pelos pares, confronto de hipóteses concorrentes, tentativa de reproduzir resultados, etc.

⁴ Ideia de que a partir da generalização de um conjunto de observações neutras pode-se chegar a um conhecimento inquestionável.

Além disso, cientistas são seres humanos que cometem erros, têm qualidades e defeitos (Moura, 2014). Ademais, seus compromissos teóricos, crenças, conhecimentos prévios, treinamentos, experiências e expectativas influenciam o trabalho e a Ciência que eles fazem. Podemos incluir ainda que a Ciência envolve, muitas vezes, a **invenção** de explicações, e isto requer uma grande quantidade de criatividade por parte dos cientistas. Fatores como esses agregam elementos de subjetividade na produção do conhecimento científico (Lederman, 2006), tornando possível que, por exemplo, cientistas diferentes interpretem os mesmos dados experimentais de mais de uma forma (Niaz, 2009). Todos esses fatores influenciam os problemas que os cientistas investigam e como eles conduzem suas investigações, o que eles observam (ou não observam), e como eles entendem, ou interpretam, suas observações (Lederman, 2006).

As afirmações feitas nos seis parágrafos anteriores são representativas dos elementos incluídos por pesquisadores em listas consensualistas (e.g., Lederman, 2006; McComas et al., 1998; Osborne et al., 2003). Eles propõem que tópicos como estes podem ser utilizados como princípios heurísticos do conhecimento científico. Tais princípios poderiam ser utilizados para documentar o crescimento e desenvolvimento do conhecimento de áreas científicas como a Física, podendo ser usado como quadro teórico para guiar o ensino sobre NdC (Niaz, 2009). Como apontado por Moura (2014), diversos trabalhos têm se fundamentado em listas como essas, inclusive grande parte daqueles realizados no Brasil.

Apesar de ter muitos defensores, o ensino de NdC por meio da abordagem de aspectos consensuais também sofre suas críticas. Matthews (2012), por exemplo, considera confusa a forma como aspectos epistemológicos, sociológicos, psicológicos, éticos, comerciais e filosóficos são reunidos em uma única lista de consenso. Outra crítica é que itens unificadores ignoram a heterogeneidade da Ciência (Dijk, 2011), sem descrever adequadamente práticas de certos domínios científicos como a Química (Rudolph, 2000). Eijck, Hsu e Roth (2009) criticam as listas de consenso quando utilizadas como práticas instrucionais que guiam os estudantes a aprender imagens particulares da Ciência, que são desviadas de práticas científicas, enquanto Irzik e Nola (2011) afirmam que a Ciência é tão rica e dinâmica que dificilmente poderíamos descrevê-la sob um conjunto estático de regras ou aspectos. Por fim, Matthews (2012) chama atenção para os riscos de privilegiar um lado do que são argumentos controversos e muito debatidos entre filósofos da Ciência sobre a metodologia da natureza da Ciência, além do uso de soluções particulares para disputas de demarcação. Estas estão entre as principais críticas feitas ao uso de abordagens consensualistas. Há também críticas com

respeito ao uso (que alguns desses autores fazem) de questionários para averiguar a concepção de estudantes sobre NdC⁵ (e.g., Allchin, 2011; Rudolph, 2000; Wenning, 2006) e preocupação com a omissão da história da Ciência no ensino e aprendizagem de conhecimentos sobre Ciência (e.g., Matthews, 2012).

Por fim, diversos críticos da visão consensualista consideram que práticas baseadas em reproduzir, em algum nível, atividades do “fazer científico” são a principal forma de ensinar sobre o desenvolvimento deste conhecimento. Para esses autores, abordagens baseadas em aspectos consensuais da NdC são omissas quanto a fatores cruciais da atividade científica (e.g., produção, crítica e comunicação de ideias), voltados ao engajamento em práticas de discurso científico. Para Duschl e Grandy (2013), o foco no acúmulo de fatos científicos e princípios heurísticos, sem utilizar esta informação para propor explicações, fazer previsões e avaliar o desenvolvimento do conhecimento científico, não deve ser o objetivo do ensino da NdC. A próxima subseção é dedicada ao debate entre o ensino de princípios heurísticos versus atividades de investigação, trazendo os argumentos dos dois lados e suas implicações para o ensino de Ciências.

2.2.2 Princípios heurísticos vs investigação científica

Duschl e Grandy (2013) apresentam três questões com respeito a abordagens instrucionais sobre a NdC: (1) o que significa ensinar NdC “explicitamente”? (2) se investigação científica e NdC devem ser vistas como uma dupla inseparável ou como elementos distintos? e (3) como avaliar a imagem dos aprendizes sobre a NdC? (i.e., que observações e medidas proporcionam interpretações confiáveis?). Nos concentramos em como a literatura tem buscado responder às duas primeiras delas. Para os defensores da visão consensual, ensinar NdC explicitamente significa apresentar e problematizar com os estudantes princípios heurísticos e características da Ciência consensualmente aceitas. Defensores desta visão tipicamente consideram que NdC e atividades de investigação científica são distintas. Já outros autores colocam atividades de “prática científicas” nas quais os estudantes se envolvam ativamente como ponto central do ensino explícito de NdC. Para esses autores, NdC e investigação científica são vistas como indissociáveis.

⁵ Não entraremos nesta questão por fugir do escopo deste trabalho.

Um princípio básico desta visão integrada é que a compreensão de NdC é associada com certas habilidades relacionadas ao fazer científico, como: (1) conhecer, saber usar e interpretar explicações científicas sobre o mundo natural; (2) gerar e avaliar evidência e explicação científica; (3) entender a natureza do desenvolvimento do conhecimento científico; e (4) participar produtivamente em práticas e discursos científicos. A mensagem por trás desta visão é que o ensino de Ciências é mais do que ensinar o que sabemos. Também é importante ensinar como sabemos e por que acreditamos no que sabemos (Duschl & Grandy, 2013). Nessa perspectiva, ensino “explícito” não se refere a apontar para os estudantes onde os elementos da NdC ou princípios heurísticos são encontrados. Em vez disso, o objetivo é imergir os estudantes em práticas da Ciência que envolvam levantar e refinar hipóteses, realizar medições, e construir modelos e explicações científicas. Os autores que adotam esta perspectiva consideram que o melhor caminho para os estudantes aprenderem o que é ser racional e objetivo é por meio da experiência (e.g., Marchlewicz & Wink, 2011; Russell & Weaver, 2011), e não apenas ao aceitar esses adjetivos como descritores da Ciência. Alguns deles vão além, sugerindo que a NdC não pode ser ensinada diretamente, mas é aprendida, como a linguagem, ao se fazer parte de uma cultura de práticas científicas (Abd-El-Khalick, Boujaoude, Duschl, Lederman, Mamlok-Naaman, Hofstein, Niaz, Treagust & Tuan, 2004). Muitos deles defendem também a integração entre aprendizagem conceitual (os conteúdos) e práticas científicas.

Quanto à natureza da Ciência, os elementos que esta visão destaca são: construção de teorias e modelos; coleta e análise de dados de observações ou experimentos; construção de argumentos; e utilização de modos especializados de falar, escrever e representar fenômenos (Duschl & Grandy, 2013). Thagard (2014), por exemplo, considera que coerência (no sentido amplo) e coerência explicativa são alcançados através de processos complementares, nos quais teorias se ampliam e se aprofundam ao longo do tempo, abordando novos fatos e promovendo explicações do porquê da teoria funcionar. Esse autor coloca o refinamento, ampliação e aprofundamento de teorias na base para ambos o “fazer Ciência” e o “aprender ciência”. Desta forma, esta abordagem defende que as instruções explícitas sobre NdC sejam abordadas em conjunto com atividades de investigação científica, sem separar o ensino de conceitos e práticas científicas. NdC e investigação científica são considerados como um contínuo, e não como entidades separadas.

Por fim, a associação de ensino de NdC com atividades práticas de investigação científica também possui suas limitações, com trabalhos empíricos questionando esta crença

(e.g., Bell, Blair, Crawford, & Lederman, 2003; Khishfe & Abd-El-Khalick, 2002). Sandoval e Morrison (2003), por exemplo, apontaram que as ideias epistemológicas dos estudantes não parecem mudar como resultado das experiências investigativas deles. Como Abd-El-Khalick (2013) aponta, é bem entendido e documentado que atividades de investigação podem servir como um contexto ideal para ajudar estudantes e professores a desenvolverem visões informadas sobre NdC, mas não segue que participar de atividades de investigação necessariamente resulta em melhor compreensão da NdC.

Lederman (2006) considera que embora investigação científica e NdC se sobreponham e interajam de modos importantes, é necessário distinguir entre as duas. Uma grande dificuldade de implementar NdC é a expectativa de que estudantes irão entendê-la ao fazer Ciência. Niaz (2009) considera que tal concepção é semelhante a assumir que os estudantes devem entender fotossíntese apenas por observar uma planta crescer. Esses autores defendem que para facilitar a compreensão de NdC, professores precisam ir além do currículo tradicional, e enfatizar as dificuldades enfrentadas pelos cientistas, como a interpretação de dados ser sempre problemática, etc. Oportunidades cuidadosamente planejadas e estruturadas para refletir sobre experiências de investigação são necessárias para alcançar compreensões desejadas de NdC (Abd-El-Khalick & Lederman, 2000; Bell et al., 2003; Khishfe & Abd-El-Khalick, 2002; Peters & Kitsantas, 2010; Yacoubian & Boujaoude, 2010).

Distinguir NdC de investigação científica não significa que NdC seja considerada a mais importante para os estudantes aprenderem. Certamente, ambos os constructos são importantes e investigação e NdC, embora diferentes, são intimamente relacionadas. Há evidência, inclusive, de que NdC é melhor ensinada em um contexto de investigação científica, ou atividades que são razoavelmente semelhantes à investigação. Isto é, atividades de investigação proporcionam aos estudantes experiências fundamentais com as quais refletir sobre aspectos de NdC (Lederman, 2006). As duas, no entanto, não são a mesma coisa. Parafraseando a distinção de Rodrigues e Pereira (2018) entre explicações científicas e explicações escolares, podemos dizer que atividades investigativas atendem a objetivos distintos na atividade científica e no ensino de Ciências. Enquanto que na Ciência a investigação científica busca por testar hipóteses e produzir conhecimento novo, o ensino de Ciências está preocupado em apresentar as características de um corpo de conhecimento pré-existente. De acordo com Osborne e Patterson (2012), qualquer tipo de prática realizada com propósitos educacionais será apenas uma aproximação de práticas científicas autênticas. Isto significa que realizar atividades investigativas com o objetivo de explicitar elementos da NdC

deixa de ser uma atividade científica autêntica rapidamente, mas a questão não é se esta é uma atividade científica autêntica, e sim se esta é uma atividade educacional autêntica – um julgamento para o qual critérios distintos devem ser aplicados.

Nossa postura é similar à de Lederman (2006). Não consideramos o ensino de NdC por meio de princípios heurísticos necessariamente superior ou inferior ao uso de atividades investigativas. Mas nos parece importante ter clareza de que estes dois elementos importantes do ensino de Ciências não são a mesma coisa. Na nossa concepção o equívoco maior diante de debates deste tipo reside em se filiar dogmaticamente a uma das duas posturas, ignorando as vantagens e desvantagens que cada uma das abordagens proporciona. Defendemos a relevância – para pesquisadores do ensino de Ciências e professores de Ciências interessados em abordar estas questões – de conhecer as duas abordagens, cabendo a cada indivíduo em seu contexto de atuação particular considerar o tipo de atividade mais frutífero para alcançar os objetivos pedagógicos almejados. Acima de tudo, consideramos que as duas abordagens representam avanços com respeito ao ensino tradicional – que aborda implicitamente aspectos de NdC, promovendo com frequência concepções sobre NdC que a literatura aponta como ingênuas e limitadas (Medeiros & Monteiro, 2002).

2.2.3 Ensinar com e sobre Natureza da Ciência

Abd-El-Khalick (2013) tenta conciliar as duas visões a partir de dois tipos de instrução explícita com respeito ao ensino de NdC: ensinar **com** e **sobre** NdC. Ensinar **sobre** NdC se refere à instrução que busca permitir que os estudantes atinjam objetivos de aprendizagem focados em compreensões epistemológicas informadas sobre a geração e validação de conhecimento científico, e a natureza do conhecimento resultante. Em comparação, ensinar **com** NdC busca designar e implementar ambientes de aprendizagem de Ciência que levam em consideração esse robusto conhecimento epistemológico sobre a geração e validação do conhecimento científico. Certamente ensinar **com** e **sobre** NdC está interligado, mas não se tratam da mesma coisa.

Ensinar **sobre** NdC é uma instrução com o objetivo de ajudar os aprendizes (estudantes e professores de Ciências) a desenvolverem compreensão epistemológica informada sobre a natureza do conhecimento resultante. Como apontado anteriormente, o engajamento com investigação ou HFSC por si só, embora necessário, não é suficiente para

atingir essa aprendizagem. Em vez disso, instrução efetiva de NdC é melhor alcançada através de um quadro teórico **explícito e reflexivo** (Abd-El-Khalick et al., 1998; Abd-El-Khalick & Lederman, 2000; Akindehin, 1988). Para começar, é importante abordar algumas confusões ou equívocos com respeito a este quadro teórico (e.g., Allchin, 2011). O termo “explícito” não se refere ao tipo de instrução didática realizada, mas sim aos conteúdos curriculares. Ele engloba a inclusão de resultados específicos da aprendizagem da NdC em qualquer sequência instrucional que busque desenvolver compreensão sobre NdC. Já o termo “reflexivo”, por outro lado, possui implicações instrucionais na forma de oportunidades estruturadas para ajudar os aprendizes a examinar experiências de aprendizagem de Ciência com um quadro epistemológico. Especificamente, tal reflexão deve se centrar em questões relacionadas às características, desenvolvimento e validação do conhecimento científico (Abd-El-Khalick, 2013).

Nas abordagens pedagógicas **sobre** a NdC, forte preferência é dada para abordagens ativas, centradas nos alunos, colaborativas e orientadas para a investigação. De fato, pesquisadores relataram ganhos substanciais da compreensão de NdC de estudantes da educação básica e de professores utilizando intervenções de NdC explícito-reflexiva que se baseiam em e/ou são preenchidas com casos históricos ricos (e.g., Howe, 2007; Howe & Rudge, 2005; Kim & Irving, 2010), práticas científicas autênticas (e.g., Bell et al., 2003), contextos baseados em investigação (e.g., Khishfe & Abd-El-Khalick, 2002; Yacoubian & Boujaoude, 2010), desenvolvimento profissional de professores (e.g., Morrison, Raab & Ingram, 2009), aprendizado como mudança conceitual (e.g., Abd-El-Khalick et al., 2004), argumentação (McDonald, 2010), e estratégias meta-cognitivas (Peters & Kitsantas, 2010).

Já ensinar **com** NdC dá atenção para a junção de “ensinar sobre NdC com investigação”. Em vez de considerar que professores podem utilizar investigação para desenvolver compreensão informada de NdC nos estudantes, ensinar com NdC afirma que professores com compreensão informada de NdC estão melhor posicionados para conduzir ambientes de aprendizagem por investigação em suas salas de aula. A consideração que baseia a noção de ensino **com** NdC é que o modo como estudantes desenvolvem a compreensão deles sobre conhecimento científico guarda alguma semelhança (embora de modo algum uma correspondência direta) com o modo que comunidades de prática científica geram e avaliam esse conhecimento. Começando com esse pressuposto, professores de Ciências que tenham internalizado compreensão robusta de aspectos chave da NdC, e que entendam seriamente a importância desses aspectos para a prática científica, são mais

prováveis de abandonar certas “orientações antigas” (Anderson, 2007) de práticas de ensino de Ciências, em favor de práticas que podem favorecer ambientes de aprendizado científico autêntico (Abd-El-Khalick, 2013).

2.3 Natureza da Ciência Via História da Ciência

2.3.1 Justificativas para abordar a História, Filosofia e Sociologia da Ciência

O uso da história da Ciência tem frequentemente sido considerado uma das principais formas de abordar a NdC (Lederman, 2006). Agrupamos os argumentos em prol da abordagem de elementos de NdC por meio da história da Ciência em três grupos. O primeiro está relacionado com o aprendizado de aspectos da NdC em si. Nesse sentido, tem-se destacado a importância da História e Filosofia da Ciência como uma das maneiras de promover uma melhor compreensão da natureza da Ciência (Moura, 2014). Os autores que defendem o uso de história da Ciência no seu ensino parecem concordar que a história da Ciência fornece subsídios para compreender como a Ciência é produzida, como os cientistas trabalham e quais são as influências sofridas e exercidas por eles (e.g., Laburú & Carvalho, 2005; Matthews, 1995; Ogborn, 1997; Posner, Strike, Hewson, & Gertzog, 1982), afastando concepções ingênuas e distorcidas sobre o processo de construção do conhecimento científico (Moura & Silva, 2014).

O segundo argumento é o potencial de utilizar HFSC para proporcionar compreensão sobre conceitos e desenvolver habilidades científicas. Padrões curriculares em muitos países salientam a importância de contextualizar histórica e socialmente o conhecimento científico (AAAS, 1990; BRASIL, 2000, 2018). Eles também sugerem que a HFSC é uma estratégia instrucional apropriada para promover compreensão profunda do conteúdo científico, desenvolver habilidades de raciocínio complexo, aprender procedimentos da Ciência e desenvolver habilidades argumentativas (Henke & Höttecke, 2015). Trabalhos empíricos também respaldam esta visão, seja por aulas de Ciências enriquecidas por informações históricas (e.g., Abd-El-Khalick & Lederman, 2000b; Solomon, Duveen, Scot & McCarthy, 1992), experimentos da Ciência do passado ou reflexões historicamente situadas sobre a NdC (e.g., El-Hani, 2007; Martins, 2007; Matthews, 1995; Pérez, 1993). Já o terceiro argumento diz respeito às atitudes com relação à Ciência. Nesse caso, professores de Ciências e

pesquisadores enfatizam o potencial da HFSC para aumentar o interesse dos estudantes pela Ciência e incentivar atitudes positivas com relação à história e a filosofia (Matthews, 1995; Teixeira, Greca & Freire, 2012).

2.3.2 Formas de abordar a História, Filosofia e Sociologia da Ciência

Quanto às formas de abordar a HFSC na prática da sala de aula, o leque de opções é amplo (e.g., Clough, 2011; Conant, 1957; Höttecke & Silva, 2011; McComas et al., 1998). Os professores capazes e desejosos de utilizar ou adaptar recursos curriculares sobre HFSC podem fazê-lo ao (1) incluir ideias-chaves da história e filosofia da Ciência no seu ensino; (2) traçar e refletir sobre o desenvolvimento de conceitos e modelos científicos; (3) ilustrar, analisar e reproduzir modos paradigmáticos de resolução de problemas científicos; e (4) expor o contexto cultural dos conceitos científicos curriculares (Galili, 2012; Matthews, 1995). Como apontado por Henke e Höttecke (2015), o uso de HFSC também pode trazer práticas específicas para a sala de aula, como: (1) leitura, análise e discussão de artigos, diários de laboratório ou relatórios técnicos originais de pesquisas históricas (e.g., Bevilacqua & Giannetto, 1996; Kovács, 1996; Solbes & Traver, 2003); (2) contar anedotas históricas ou histórias breves acompanhadas por reflexões conceituais, metodológicas e filosóficas (e.g., Clough, 2011; Klassen, 2009); (3) conduzir experimentos de pensamento históricos ou replicar procedimentos de laboratório reais, traçando o desenvolvimento de metodologias científicas, conceitos e teorias (e.g., Binnie, 2001; Höttecke, 2000; Kipnis, 1998; Kubli, 1999); e (4) combinações das estratégias anteriores, por meio de estudos de caso detalhados que durem múltiplas aulas (e.g., Irwin, 2000; Klopfer, 1969; Stinner, McMillan, Metz, Jilek & Klassen, 2003).

2.3.3 História distorcida

No entanto, a literatura também aponta uma série de problemas associados com o uso da história da Ciência para fins didáticos. Como apontado por Gomes e Pietrocola (2011), a história da Ciência se encontra na encruzilhada entre os objetivos específicos do historiador, do educador e do cientista. Dependendo do objetivo predominante no contexto em que narrativas sobre a história da Ciência são produzidas, essas reconstruções históricas podem ser

moldadas retrospectivamente. Esta é uma questão relevante para abordar a NdC segundo a história da Ciência, uma vez que adaptações históricas que subestimem a influência do contexto histórico para o desenvolvimento científico podem apresentar versões distorcidas do que tenha sido historicamente registrado. Além disso, as pesquisas sobre o modo como a história da Ciência têm sido abordadas em livros didáticos revela que muitos livros justificam o aparecimento de conteúdos físicos por meio de contextos históricos fantasiosos e excessivamente simplificados (e.g., Medeiros & Medeiros, 2001).

A principal justificativa apontada para essas simplificações é a de tornar o conhecimento científico mais convincente para os alunos (Whitaker, 1979). Dessa forma, é comum que em muitos livros a história seja utilizada para dar um pano de fundo aos conceitos e fórmulas físicas. Mas como a prioridade costuma ser gerar lógica interna ao sistema de ideias apresentado – implicando na crença de uma racionalidade crescente no desenvolvimento da Ciência – a história é muitas vezes reescrita (Gomes & Pietrocola, 2011). Analisando a formulação da lei de radiação de corpo negro envolvendo Rayleigh, Jeans e Planck, Whitaker (1979) mostra como a ordem lógica embutida no relato didático é muitas vezes contrária à ordem cronológica revelada pela análise histórica. O autor classifica esses relatos históricos distorcidos, com o objetivo de reforçar a racionalidade interna da Ciência, como **quasi-história**.

Outra das principais formas da literatura abordar distorções na história da Ciência é por meio de **histórias Whigg**. Allchin (2004) utiliza esse termo para se referir a reinterpretções do passado em termos de normas e padrões atuais. O termo surge no contexto político da primeira metade do século XX na Grã-Bretanha, onde um partido distorcia intencionalmente narrativas históricas para promover seu ponto de vista sobre os fatos. A história é utilizada nesses casos como um dispositivo político para legitimar autoridade. Histórias da Ciência também podem exibir “Whiggismo” ao colocar uma teoria particular, agora considerada correta, como provada desde o início. Já ideias diferentes são apresentadas em oposição a ela, em vez de serem trajetórias alternativas em um processo cego de tentativa e erro. As incertezas históricas são suprimidas e as razões pelas quais cientistas podem ter dado suporte para uma alternativa são atribuídas a **interferências** psicológicas ou sociais, em vez de serem baseadas em evidências ou julgamentos científicos adequados à época. Apontar a história da Ciência de outro modo é visto como ameaça à legitimidade do resultado final e, com isso, à própria autoridade da Ciência. É claro, cientistas históricos podem ter raciocinado de forma científica e ainda assim estarem “errados”, mas a história *Whigg* da Ciência eclipsa

esta possibilidade. Ela culpa todos os erros a fatores inconscientes, e credita todo o sucesso ao uso de métodos adequados (Allchin, 2004).

Outro problema é que muitas histórias “romantizam os cientistas, inflam o drama de suas descobertas e simplificam excessivamente os processos da Ciência” (Allchin, 2004, p. 179, nossa tradução). Essas histórias podem ser consideradas mitos sobre a Ciência. Enquanto baseados em eventos históricos reais, elas distorcem a base da autoridade científica e estimulam estereótipos indesejáveis. Allchin (2004) compara essas histórias à pseudociência – ao promoverem ideias falsas sobre como a Ciência funciona – tratando-as como **pseudo-histórias**. Assim como a pseudociência, pseudo-história utiliza fatos seletivamente e promove imagem equivocada e/ou incompleta sobre a história científica. Por exemplo, uma história romantizada sobre uma descoberta científica pode destacar excessivamente as contribuições de um único indivíduo, minimizar o papel de erros ou acidentes, simplificar processos investigativos, ignorar motivações nem tão nobres, e esconder o efeito de valores pessoais ou culturais. Elas transformam a Ciência real em uma Ciência imaginada e idealizada.

Usando casos concretos como exemplo: dois heróis convencionais da revolução científica, Isaac Newton e Robert Boyle, ambos praticaram alquimia (Dobbs, 1975; Principe, 1999), agora vista como uma prática não-científica. Este pequeno detalhe transforma profundamente como alguém interpreta o papel deles em estabelecer a Ciência moderna e, de fato, o que faz a Ciência ser Ciência. Na química, mesmo um século depois da descoberta do oxigênio, muitos cientistas apoiavam a ideia do flogístico (Allchin, 1992). Mas de acordo com a história convencional da revolução Química, esses dois conceitos foram mutuamente excludentes. Aqui, a história polarizada obscurece como os defensores do flogístico raciocinavam. Em todos esses casos, as “histórias de livro didático” eclipsam informação relevante, enquanto perpetuam uma caricatura da Ciência (Gauld, 1992).

Já quando as distorções históricas se referem a exaltar os feitos de algum cientista individualmente, trata-se de uma **hagiografia** (Allchin, 2004). O termo é originalmente utilizado por historiadores para se referir a biografias de santos, beatos e outras figuras religiosas. A hagiografia trata de textos não necessariamente históricos, como a descrição de martírios, lendas, tradições, vida religiosa e revelações, com especial atenção nos milagres e processos canônicos de beatificação e/ou santificação. Na história da Ciência, hagiografia também pode ser observada quando a biografia de algum cientista é apresentada, destacando seu brilhantismo, genialidade e/ou dedicação sobre-humana. Essa hagiografia engana por

hipérbole e relata apenas o que reflete favoravelmente para o cientista. Os mitos dos cientistas idealizados ou romantizados promovem modelos irrealistas do que cidadãos podem esperar dos cientistas em nossa sociedade. Eles distorcem a natureza do conhecimento científico, escondendo seus limites e simplificando excessivamente a natureza da evidência e interpretação (Allchin, 2004).

Terminamos esta seção sintetizando algumas características destas histórias distorcidas utilizadas no ensino de Ciências. Primeiramente, ideias concorrentes das teorias vencedoras são apresentadas como ideias que devem ser desmentidas. Nos casos de hagiografia, um cientista deve estar completamente “certo” e os seus concorrentes completamente “errados”. Conhecimento e ignorância entram em conflito, e dramaticamente a teoria vencedora dá um “golpe fatal” em sua concorrente para vencer a disputa, o que é muitas vezes apresentado por meio de um resultado experimental que julga as teorias “imparcialmente”. O status do vencedor como “herói” é ampliado. Mas como a teoria alternativa é meramente apresentada como uma caricatura, ela dificilmente é mais do que um espantalho. Não há sentido real de um encontro intelectual, porque apenas as justificativas que dão suporte a um dos lados são incluídas. A assimetria da perspectiva é outra dica de que uma abordagem não ilumina o processo da Ciência, mas utiliza apenas um dos lados de forma autoritária (Allchin, 2004).

Ao reinterpretar a história, essas narrativas também **deturpam a NdC**. Esta não é só uma questão de omitir detalhes desnecessários. Ao eclipsar contexto histórico e romantizar os cientistas como heróis, ela promove uma noção particular sobre como a Ciência trabalha, às custas da fidelidade histórica. Professores podem argumentar que eles utilizam a história para ensinar apenas os conteúdos da Ciência, sem qualquer intenção de abordar a NdC em suas aulas. Pode parecer que isto minimize os perigos da pseudohistória (Matthews, 1995), mas toda narrativa sobre a Ciência é explicativa implicitamente, e toda história da Ciência ensina natureza da Ciência de alguma forma (Allchin, 2004). Resposta parecida pode ser dada para quem considera que a transparência da história depende apenas de uma descrição direta dos fatos históricos. No entanto, o uso seletivo desses fatos pode confundir tanto quanto o uso seletivo de fatos científicos (Allchin, 2004).

2.4 Professores de Ciências e a História, Filosofia e Sociologia da Ciência

O foco desta seção é o resultado de pesquisas empíricas sobre tentativas de professores de ciências utilizarem HFSC (e.g., Galili & Hazan, 2001; Höttecke & Silva, 2011; Monk & Osborne, 1997). Aqui serão abordadas as dificuldades encontradas, refletindo na seção seguinte sobre possíveis implicações que estes resultados possam ter para a formação de professores. As pesquisas apontam que implementar HFSC de forma efetiva e sustentável na educação básica continua sendo desafiador para os professores de Ciências (Pena & Teixeira, 2017). Apesar do (reconhecido) efeito educacional positivo da HFSC, de uma aparente mudança na atitude dos professores de Ciências sobre seu uso e da crescente disponibilidade de materiais pedagógicos de HFSC, seu emprego nas salas de aula de Ciências continua limitado (Martins, 2012). Enquanto muitos professores de Ciências veem a história como uma ferramenta para desenvolver habilidades e ilustrar os aspectos procedimentais da Ciência real, eles sentem falta de conhecimento profissional adequado, de pano de fundo epistemológico e de confiança para utilizar HFSC (Wang & Marsh, 2002).

2.4.1 Síntese das dificuldades encontradas

Em geral, implementar HFSC não difere substancialmente de implementar qualquer outra inovação pedagógica e/ou curricular. Com esse respeito, pesquisas identificaram inúmeros obstáculos a mudanças educacionais, como: estrutura tradicional da organização escolar, crenças de ensino centradas no professor, falta de conhecimento profissional e de habilidades pelo professor, e ainda características relacionadas a mudanças (idade, experiência, formação acadêmica) (e.g., Anderson, 2002; Cuban, Kirkpatrick, & Peck, 2001). Inúmeros fatores contribuem para a discrepância entre o currículo desejado e o currículo aplicado. Algumas características que podem facilitar ou dificultar a difusão de uma inovação didática são: (1) as características formais da inovação em si; (2) características da escola onde a inovação ocorre; (3) condições e limites do sistema educacional local/nacional; (4) características dos professores envolvidos direta e indiretamente no processo (Henke & Höttecke, 2015).

Com respeito à HFSC especificamente, há um considerável corpo da literatura demonstrando que a conexão entre as crenças dos professores sobre NdC e suas práticas de sala de aula não é nem simples nem direta (e.g., Bell et al., 1998). Em particular, esses estudos identificaram muitos limites na tradução de crenças à prática, incluindo: preocupação

com habilidades e motivações dos estudantes (Brickhouse & Bodner, 1992; Duschl & Wright, 1989), pressões percebidas para cobrir o conteúdo (Brickhouse & Bodner, 1992; Briscoe, 1991; Duschl & Wright, 1989; Hodson, 1993; Lantz & Kass, 1987), conhecimento insuficiente dos conteúdos (Brickhouse & Bodner, 1992; Lantz & Kass, 1987), considerações sobre administração e organização de sala de aula (Hodson, 1993; Lantz & Kass, 1987), currículo e recursos inadequados (Brickhouse & Bodner, 1992; Gallagher, 1991; Hodson, 1993; Lantz & Kass, 1987), várias restrições institucionais (Brickhouse & Bodner, 1992), e falta de experiência de ensino (Brickhouse & Bodner, 1992; Brickhouse, 1989). Por fim, o estudo de Abd-El-Khalick, Bell e Lederman (1998) demonstrou que mesmo alunos de cursos de formação de professores que possuem considerável compreensão da natureza da Ciência podem não abordar o tópico em seu ensino, demonstrando sentimento de inadequação em ensinar e avaliar o constructo. Assim, os resultados de todas essas investigações são consistentes com a conclusão de Lederman e Zeidler de que “o comportamento em sala de aula de um professor não varia necessariamente como um resultado direto das concepções dele/dela [sobre NdC]” (1987, p. 731, nossa tradução).

Moura e Silva (2014) relatam os resultados de uma pesquisa empírica que buscou compreender as visões de licenciandos e professores em exercício sobre o uso de história da Ciência no ensino. Os dados coletados mostraram uma contradição: embora muitos professores reconheçam a importância de conteúdos históricos para o ensino de conteúdos científicos e tenham cursado/cursem disciplinas relacionadas à história da Ciência, grande parte deles pensa a história da Ciência como um apêndice ao ensino, não como parte integrante dele. Além disso, alguns relatam o incômodo em trabalhar com propostas ditas “inovadoras”, uma vez que estão acostumados com abordagens tradicionais do conteúdo específico. Os autores concluem que não basta ter disciplinas de História e Filosofia da Ciência nas licenciaturas. É preciso refletir sobre como utilizá-las. Este resultado está de acordo com o apontado por Martins (2007), que aplicou questionário sobre HFSC a 82 professores ou futuros professores de Física. As respostas apontam o grande interesse e atração dos indivíduos pesquisados pela HFSC, e também a existência de um abismo entre a enorme importância atribuída à HFSC e a sua utilização, com qualidade, como conteúdo e estratégia didática nas salas de aula de nível médio.

Tratando HFSC como uma inovação curricular e pedagógica no ensino de Ciências, Höttecke e Silva (2011) analisaram os principais obstáculos para vários esforços de implementação de HFSC ao longo das últimas décadas. Eles apontam quatro áreas principais

de preocupação: (1) representações inadequadas/ausentes de HFSC em livros didáticos e materiais curriculares; (2) um quadro instrucional que não dá suporte para a HFSC; (3) uma cultura autoritária do ensino de Ciências na escola; e (4) características dos professores de Ciências (conhecimento profissional, atitudes, crenças) incompatíveis com HFSC.

Tobin e McRobbie (1996) apontam distintos mitos impedidores de mudanças com respeito à cultura tradicional de ensino de Ciência. Esses mitos culturais são refletidos pelo modo como professores de Ciências – especialmente professores em formação – avaliam como ensinar com inovações curriculares permite a eles: (1) transmitir o conteúdo curricular para os estudantes; (2) cobrir o conteúdo científico com eficiência; (3) assegurar que o rigor do currículo seja mantido; e (4) preparar estudantes para terem sucesso em avaliações externas (Brickhouse & Bodner, 1992). Professores de Física experimentados com HFSC, entrevistados por Galili e Hazan (2001), apontaram dificuldades para justificar a relevância de HFSC para os estudantes, criar novos materiais de aprendizagem de HFSC, e em atingir o nível necessário de conhecimento histórico e filosófico. Spiliotopoulou-Papantoniou e Agelopoulos (2009) concluíram que alunos em curso de formação de professores, depois de terem empregado materiais enriquecidos com HFSC, assumiram que HFSC não era atraente para os estudantes e estavam preocupados com a possibilidade de eles ficarem confusos pelas ideias científicas do passado. Eles também perceberam o planejamento de aulas de HFSC como exigente, devido à falta de recursos históricos, insegurança em como reduzir complexidade histórica, falta de habilidades para apresentar informação histórica e para manusear as dificuldades dos estudantes com conhecimento histórico nas aulas de Ciências.

As dificuldades apontadas pelos professores podem ser resumidas em oito grupos: (1) falta de recursos educacionais de HFSC, assim como a falta de um conhecimento pedagógico e técnico para adaptar materiais às necessidades dos estudantes; (2) insegurança sobre modelos instrucionais para desenvolver e estruturar aulas baseadas em HFSC; (3) insegurança em reduzir a complexidade histórica, falta de estratégias para introduzir e apresentar informação histórica de forma motivadora; (4) preocupação com modos ingênuos dos estudantes de pensar sobre história da Ciência; (5) preocupação em como guiar atividades histórico-investigativas abertas, à luz da incerteza empírica do trabalho dos estudantes e de histórias com resultado já conhecido; (6) problema em dar suporte para a construção de significados pelos estudantes com base no conhecimento científico do passado, e em encontrar caminhos conceituais adequados entre as ideias científicas históricas e a Ciência moderna; (7) alinhar o ensino baseado em HFSC com padrões de conteúdo científico e com

avaliações de resultados de aprendizagem específicos da HFSC; e (8) pressões curriculares socialmente mediadas por colegas que não ensinam Ciências com HFSC (Henke & Höttecke, 2015).

2.4.2 Alguns resultados e suas implicações

Resultados como os mencionados na subseção anterior possuem uma consequência imediata: a literatura aponta repetidamente (e.g., Abd-El-khalick & Lederman, 2000; Acevedo et al., 2005; Lederman, 1992; Massoni & Moreira, 2014) que mesmo que as concepções dos professores sobre NdC possam ser consideradas uma condição **necessária**, essas concepções não devem ser consideradas **suficientes** para se refletir em práticas distintas de sala de aula (Boaro & Massoni, 2018). Uma implicação imediata para pesquisas relacionadas à NdC é aparente: os esforços precisam se estender além da compreensão dos professores da natureza da Ciência, já que a tradução dessa compreensão para atividades de sala de aula é mediada por um conjunto complexo de variáveis situacionais (Lederman, 1992). Além disso, apesar do uso de HFSC possuir muitas vantagens para o ensino de Ciências, e ser amplamente incentivado por pesquisadores e professores de Ciências, ele também é considerado muito exigente.

A história pode ser utilizada como elemento introdutório para um ensino focado nos conteúdos, para o ensino explícito de elementos de NdC, ou algum tipo de combinação das duas formas. Para se realizar uma boa intervenção, no entanto, se faz necessário o estudo do episódio histórico em questão, dos elementos da NdC que se pretende abordar, e de estratégias pedagógicas que possibilitem colocar todo este conhecimento em prática. Consideramos que este seja o grande desafio de abordagens que se proponham a utilizar HFSC no ensino de Ciências. Esse quadro é agravado em muitos casos pela falta de bons materiais de apoio desenvolvidos para esta finalidade. Destacamos duas formas principais para atacar este problema especificamente: desenvolvimento de materiais instrucionais adequados e, como sugerido por Henke e Höttecke (2015), focar no desenvolvimento do conhecimento profissional dos professores necessários para o ensino baseado em HFSC.

2.5 Implicações Para a Formação de Professores

Já que são bem aceitas as grandes contribuições que a HFSC pode trazer para a Educação em Ciências, surge a questão de como abordar esta questão nos cursos de formação de professores, principalmente porque ensinar Ciência com HFSC possui particularidades com respeito a caminhos conceituais e atividades de sala de aula. Os cursos de licenciatura das áreas científicas têm tentado contemplar essa questão, seja por intermédio de disciplinas específicas que tratem do conteúdo histórico e/ou filosófico, seja por meio de seminários, palestras, etc. (Martins, 2012). Além disso, documentos oficiais, tais como a Base Nacional Curricular (BNCC), incluem recomendações explícitas de que os estudantes devem construir competências relacionadas à compreensão do conhecimento científico como consequência de um processo histórico. Assim, a aprendizagem de conteúdos históricos e suas implicações pedagógicas são tomadas como relevantes para a formação de professores de Ciências, sendo etapa necessária para o desenvolvimento de uma percepção mais adequada sobre a Ciência e o fazer científico (Moura & Silva, 2014).

Reconhecendo que o conhecimento de professores sobre NdC é necessário (mas não suficiente) para sua implementação na educação básica, melhorar a compreensão dos professores sobre NdC favorece que eles (a) compartilhem com os seus estudantes imagens da Ciência e da prática científica compatíveis com o conhecimento da história, filosofia, psicologia e sociologia da Ciência (ensinar **sobre** NdC), e (b) sejam capazes de estruturar ambientes de aprendizagem que contribuam para compreensão de como o conhecimento é gerado e validado pela comunidade científica (ensinando **com** NdC) (Abd-El-Khalick, 2013). Considera-se que a formação de professores deve fortalecer a competência de professores de Ciência para ensinar temas científicos e habilidades investigativas por meio de HFSC. Dessa forma, a HFSC é uma ferramenta promissora para alcançar resultados em acordo com uma grande variedade de requerimentos curriculares. No caso específico de professores iniciantes, é possível que recursos pedagógicos bem definidos, de pequena escala e de boa qualidade, possam servir como modelos para ensinar Ciência com HFSC (Henke & Höttecke, 2015). Apesar disso, pesquisas apontam que ainda há lacunas em relação ao ensino de história da Ciência nos cursos e formação de professores e a utilização de conteúdos históricos nas práticas docentes (e.g., Forato, Martins & Pietrocola, 2012; Höttecke & Silva, 2011; Martins, 2007; Moreira, Massoni & Ostermann, 2007).

2.5.1 Domínios de conhecimento para o ensino com e sobre Natureza da Ciência

Não há dúvida de que suporte deve ser dado durante o curso de formação de professores para que eles sejam capazes de conceber e preparar aulas baseadas em HFSC. Como dito anteriormente, também é sabido que muitos fatores influenciam (e dificultam) a abordagem de NdC em sala de aula. Os empecilhos incluem prioridades curriculares que têm historicamente caracterizado o ensino de Ciências (e.g., Shanahan & Nieswandt, 2011), a natureza da formação do professor de Ciências, o entendimento do professor sobre a própria NdC e a investigação científica (Abd-El-khalick & Lederman, 2000a), e desafios que frequentemente dificultam mudanças sistêmicas na educação básica (e.g., Vesilind & Jones, 1998). Reconhecendo a grande relevância de todos esses outros fatores, a partir de agora este texto irá se concentrar em um único, porém crucial, aspecto: o domínio de conhecimentos relevantes para os professores de Ciências alcançarem os dois objetivos mencionados anteriormente.

Abd-El-Khalick (2013) aponta três domínios de conhecimento que parecem cruciais para o ensino com e sobre NdC. São eles: o **domínio da compreensão do conteúdo científico** em questão, **domínio geral de compreensão sobre NdC** e **domínio de compreensões e habilidades pedagógicas**. O primeiro diz respeito a entender o conteúdo científico de referência a ser abordado na atividade pedagógica. O segundo está associado com o domínio de aspectos considerados relevantes para abordar a NdC, como os princípios heurísticos apontados anteriormente ou noções informadas sobre a epistemologia e o fazer científico. E o último domínio diz respeito ao conhecimento de práticas e estratégias pedagógicas capazes de articular os dois outros domínios. Exemplos desse domínio incluem estratégias para realizar atividades investigativas e formas de abordar princípios heurísticos no estudo de episódios históricos.

2.5.2 Reflexões sobre a formação de professores

As discussões feitas até aqui nos levam a fazer algumas reflexões sobre a formação de professores. Primeiramente, é importante ter em mente que o objetivo do ensino de Ciências na educação básica e da formação de professores não é formar filósofos nem historiadores da Ciência, mas ajudar a compreender melhor o conhecimento científico e os processos por meio do qual ele foi construído. Dessa forma, atividades pedagógicas vivem sempre a tensão de

fazer um recorte que simplifique as questões abordadas sem abrir mão de englobar suas características mais importantes (Matthews, 1998). Discutir na formação de professores sobre o que é pseudohistória, história *whigg* e aspectos consensuais da NdC (entre outros) pode ser um caminho para viabilizar esses objetivos. Além disso, mesmo dentro de uma Ciência específica (e.g., Física) é possível esperar que os professores desenvolvam compreensão profunda acerca da história e filosofia de alguns episódios (e.g., teoria eletromagnética), mas não de outros (e.g., teoria cinética dos gases). No entanto, o conjunto de compreensões fornecidas pode servir como exemplos que guiem o professor no trabalho com outros tópicos disciplinares no futuro.

Abd-El-Khalick (2013) aponta como caminho capacitar professores a ensinar ambos **com** e **sobre** NdC. A ideia não é incrementar a já cara agenda dos professores de Ciência: alcançar resultados instrucionais relacionados à NdC não precisa ser mais uma unidade isolada ou componente para acrescentar mais peso sobre os professores e a Ciência. A literatura aponta que ajudar professores de Ciências a desenvolver compreensões heurísticas sobre NdC pode ser efetivamente alcançado por meio de robustas intervenções instrucionais explícito-reflexivas sobre NdC (e.g., Abd-El-Khalick, 2013; Abd-El-Khalick & Akerson, 2009; McDonald, 2010; Moura & Silva, 2014) e/ou historicamente baseadas (e.g., Howe, 2007). Mas, acima de tudo, os professores necessitam experimentar o tipo de ensino sobre NdC como estratégia integrada nos seus cursos de formação inicial (Abd-El-Khalick, 2013). Não é esperado que a formação inicial cubra todas as lacunas que um professor possa encontrar, mas que ela prepare os professores para que tenham autonomia ao tomar suas próprias decisões de forma consciente no futuro.

Estas discussões acompanham uma mudança no foco da literatura sobre o uso de NdC no ensino de Ciências. As últimas décadas marcaram a superação de discussões sobre o “porque fazer”, passando a buscar respostas para “como fazer” (e.g., Henke & Höttecke, 2015; Martins, 2012). Experiência tem se acumulado nessa direção, como evidenciam estudos recentes que têm desenhado materiais e estratégias didáticas para o ensino de Ciências com HFC (História e Filosofia da Ciência) e discussões acerca da NdC (e.g., Allchin, 1997; Guerra, Reis & Braga, 2004; Heering, 2000; Höttecke, 2000). O uso de episódios históricos com abordagens explícitas sobre tópicos de NdC é apontado (e.g., Abd-El-Khalick, 2012; Allchin, 2004; Martins, 2012) como uma boa opção para superar algumas das dificuldades relatadas até aqui, mas há uma longa estrada a ser percorrida nesse sentido. Como dito por Martins,

se é preciso investir na criação de materiais, é ainda mais necessário investir no **uso** desses materiais, no planejamento de unidades didáticas e de intervenções em sala de aula que possam ser avaliadas em termos da pesquisa em ensino de ciências. Transformar **saber** da HFC em **saber a ser ensinado** ainda é um desafio (2012, p. 19, destaque no original).

O debate metodológico tem sido apontado como fundamental para esta transição.

3 REFERENCIAL TEÓRICO: A INFERÊNCIA À MELHOR EXPLICAÇÃO

Quando vamos falar de Ciência a partir de uma perspectiva filosófica, uma primeira barreira é obter uma definição única e unânime para esse termo. Para os propósitos deste texto, no entanto, será suficiente considerarmos a Ciência como uma atividade humana que busca entender a natureza ao prever, controlar e explicar fenômenos naturais (McCain, 2015). Muitas das principais formas de se engajar nesta atividade envolvem o uso de explicações científicas, seja na comunicação de ideias, na compreensão adequada de conceitos (Chambliss, Christenson & Parker, 2003) ou no compartilhamento de hipóteses e princípios científicos (e.g., Nieswandt & Bellomo, 2009).

Tendo em vista a relevância que explicações possuem para a Ciência, este conceito será utilizado para contrapor o ensino expositivo tradicional, com uma alternativa que contemple aspectos de NdC. Para isso, é pertinente distinguir explicitamente uma **explicação** do ato de **explicar**. Explicar é uma **ação** particular; um ato discursivo no qual é comunicado – verbalmente ou não – uma explicação para alguém. Já uma explicação é **algo** que alguém percebe (ou compreende) e que torna o mundo mais inteligível (Harman, 1986). Uma forma de entender essa distinção é em termos de resultados cognitivos e processos cognitivos. Explicar é o processo cognitivo que, quando bem-sucedido, leva a um resultado cognitivo particular, a explicação, que proporciona entendimento (McCain, 2015). Apesar da conexão entre explicação e explicar, o foco do ensino tipicamente se concentra mais em compartilhar explicações corretas – ou seja, as vencedoras das disputas históricas – do que entender o processo que levou essas explicações a serem aceitas.

Se por um lado há um valor inegável em aprender explicações verdadeiras, por outro lado entender a construção e o confronto de explicações concorrentes na Ciência, por meio do estudo de episódios históricos, pode ser particularmente frutífero para abordar aspectos da NdC no ensino de Física. É desejável que os estudantes entendam não só quais são as explicações que a Ciência produz, mas também o processo por meio do qual essas explicações são avaliadas e selecionadas. A Inferência à Melhor Explicação (IME) é uma abordagem da filosofia da Ciência que discute os critérios epistêmicos utilizados para avaliar explicações. Este capítulo se propõe a introduzir alguns dos principais conceitos dessa abordagem, que adaptamos para a abordagem de episódios históricos no ensino de Física.

3.1 Inferência à Melhor Explicação: Algumas Definições Pertinentes

Antes de apresentar as características gerais da IME, é pertinente explicitar o significado de alguns conceitos importantes. São eles: o que é uma inferência; o que é uma explicação; e o que torna uma explicação “melhor” do que outra.

Inferência é o ato de chegar a uma conclusão a partir de um conjunto de evidências. Ela constitui a base de diversos raciocínios investigativos. Quando um detetive está investigando um crime, ele tenta coletar provas (e.g., impressões digitais, amostras de DNA, gravações de câmeras de segurança, etc.) que possam ser utilizadas como evidência para **inferir** o provável culpado pelo crime. O mesmo que ocorre quando um médico, a partir do conjunto de sintomas e resultados de exames, tenta **inferir** o diagnóstico de um paciente. Cientistas também utilizam inferência. Quando tentam explicar um fenômeno, um resultado experimental ou uma conclusão teórica, eles estão inferindo qual a melhor forma de explicar o conjunto de evidência disponível. Em nosso cotidiano também utilizamos inferências com muita frequência, muitas vezes sem nos dar conta. Se alguém caminha em uma praia e avista pegadas de botas na areia, pode **inferir** que uma pessoa utilizando esses calçados tenha passado por ali caminhando naquela direção. A inferência é o ato, comum a todos esses exemplos, de chegar a uma conclusão a partir da evidência disponível. É importante notar, no entanto, que toda inferência é tentativa e falível. O detetive pode errar sua acusação, e o médico pode fazer um diagnóstico equivocado. No caso das pegadas na areia, uma pessoa pode ter passado por ali caminhando de costas, e a inferência pode estar equivocada quanto ao sentido do seu movimento. Poderia ser possível também que uma vaca calçando botas tivesse passado por ali e deixado aquele rastro, mesmo que isso pareça improvável. Este último exemplo destaca a necessidade de sermos capazes de avaliar a confiabilidade das inferências que são feitas (questão abordada na próxima seção).

Entendendo inferência como o ato de chegar a uma conclusão a partir da evidência disponível, um uso importante deste tipo de raciocínio é na tentativa de produzir explicações. Antes de relacionar as duas coisas, cabe definir explicação com algum rigor. Explicação é um conceito difícil de definir de forma simples (Norris, Guilbert, Smith, Hakimelahi & Phillips, 2005). Uma possibilidade é considerar que explicação é, essencialmente, o ato de tentar tornar algo compreensível, claro, ou inteligível (Brewer, Chinn & Samarapungavan, 2000). A questão é que quase tudo pode ser alvo de uma explicação concebida de forma tão ampla:

palavras, poemas, expressões faciais e fenômenos naturais. Passmore (1965) investigou explicações na vida cotidiana, na ciência e na história, concluindo que elas podem atender a diversas funções diferentes. As funções mais frequentes são: atribuir, desenvolver ou expandir significados; oferecer justificativas; fornecer uma descrição; e apresentar uma relação de causalidade. De acordo com Hempel e Oppenheim (1948), podemos considerar que toda explicação envolve dois entes: aquilo que precisa ser explicado (*explanandum*) e aquilo que tenta explicar o que estamos tentando compreender (*explanans*). Uma das formas de fazer isso é realizando inferência. O que há de interessante na relação entre explicação e inferência é que ao tentar inferir uma explicação para dar conta de um conjunto de evidências, automaticamente o que estamos fazendo, geralmente inconscientemente, é considerar um conjunto de explicações potenciais que poderiam explicar o fato em questão, e inferindo que a explicação que nos parece mais plausível é a explicação correta.

A IME é apresentada na próxima seção, problematizando quais critérios cientistas utilizam para considerar que uma explicação é melhor que suas concorrentes. Antes disso, é pertinente distinguir entre **inferência** e **causação**. Causação é o termo que os filósofos utilizam para designar o ato de atribuir relação causal entre um evento e sua causa. Pode-se considerar que entre os objetivos principais da Ciência estejam: identificar causas de fenômenos naturais e propor estruturas teóricas que expliquem o funcionamento da natureza (McCain, 2015). No entanto, inferência e causação não são a mesma coisa. Há uma importante diferença entre causação física e inferência racional. Considere, por exemplo, as duas sentenças a seguir.

Carlos está doente porque ele comeu lagosta ontem.

Carlos está doente, porque já amanheceu e ele ainda está na cama.

A primeira sentença lança uma hipótese de causa e efeito, afirmando que a doença atual de Carlos foi **causada** pela ingestão de lagosta ontem (Carlos pode ser alérgico a frutos do mar, ou talvez a lagosta tenha ficado muito tempo no sol e tenha estragado). A segunda sentença, no entanto, não diz respeito a uma relação de causa e efeito. Não é afirmado que o fato de Carlos ter permanecido na cama por mais tempo que o habitual **causou** sua doença. Em vez disso, ele permanecer na cama é uma **evidência** de que ele pode estar doente. Dessa forma, do fato de que Carlos permanece na cama na hora em que ele usualmente está de pé é **inferido** que Carlos está doente. A primeira sentença está mais próxima de ser uma explicação, enquanto a segunda se aproxima mais de uma inferência. Este exemplo simples

ilustra uma distinção importante: causação é um processo físico que acontece no mundo, enquanto inferência é um processo que ocorre na mente de uma pessoa racional. Existe uma grande diferença entre dizer: (1) o evento físico A produziu um evento físico B, e (2) sabendo que A ocorreu, posso inferir que B ocorreu (McCain, 2015). Visto isso, passamos às características principais da **Inferência à Melhor Explicação**.

3.2 A Inferência à Melhor Explicação

Embora a conexão entre inferência e explicação seja muito importante para a Ciência, um componente-chave do conhecimento científico está faltando. Mesmo que seja possível gerar explicações a partir de um raciocínio particular, essas explicações não vão proporcionar entendimento sobre a natureza a menos que sejam consideradas plausíveis. Não adianta sermos capazes de fazer inferências que tentem explicar aquilo que estamos tentando entender se não estabelecermos alguma forma de avaliar a qualidade da inferência que fazemos (McCain, 2015). Esse tipo de “confiança” nas explicações é parte importante do conhecimento científico. Mas, como ela é alcançada? Essa questão tem sido abordada de muitas formas na epistemologia, e a IME é uma delas. O termo foi introduzido no artigo pioneiro de Gilbert Harman (1965), sendo aprofundado desde então. Basicamente a discussão se propõe a identificar critérios que possam ser utilizados para, racionalmente, inferir a melhor explicação para um conjunto de evidências. Nesse sentido, o foco é a avaliação que permite identificar a melhor explicação para um grupo de evidências entre um conjunto de hipóteses concorrentes.

Os filósofos afirmam que a IME é utilizada com tanta frequência em na vida cotidiana que ela pode ser “tão rotineira e automática que facilmente passa despercebida” (Douven, 2017, p. 3, nossa tradução). Alguns exemplos do seu emprego incluem: diagnósticos médicos, compreensão da linguagem – ao interpretar o que um falante quer dizer (Dascal, 1979; Hobbs, 2004) – e até na elaboração de modelos agrícolas (Gauch, 2012). Assim como na vida cotidiana, exemplos paradigmáticos deste tipo de inferência também são encontrados nas Ciências naturais. As evidências que a Ciência usa são, tipicamente, os conhecimentos aceitos por aquele domínio e resultados experimentais. Passando para um exemplo simples: assume-se que substâncias materiais possuem estrutura atômica porque esta hipótese explica melhor

que suas concorrentes um conjunto de observações e de questões teóricas com respeito ao modo como essas substâncias interagem.

Para esquematizar o uso dessa abordagem, Peter Lipton (2000) considera que o processo de IME possui dois estágios. No primeiro deles explicações potenciais são geradas, formando um conjunto limitado. No segundo estágio uma entre essas explicações potenciais é escolhida como sendo a melhor. Hipóteses claramente absurdas, como teorias da conspiração, são eliminadas no primeiro estágio, que deve contemplar somente hipóteses que são epistemicamente plausíveis (ou prováveis). Assim, somente no segundo estágio, o processo de seleção, uma dentre essas explicações é escolhida como sendo a mais explicativa.

Vamos então explorar com mais detalhe a estrutura dessas inferências associadas à seleção das explicações. Lycan (2002) utiliza a seguinte representação esquemática dessa seleção de explicações pela IME:

F_1, F_2, \dots, F_n são fatos que precisam ser explicados (F_i).

A hipótese H explica os fatos que precisam ser explicados.

Nenhuma hipótese competidora explica os F_i tão bem quanto H faz.

Assim, H é considerada verdadeira.

A estrutura é simples, mas não é simples identificar qual é a melhor explicação dentro de um conjunto dado. É preciso definir o que pode tornar uma explicação melhor do que outra. Os critérios que influenciam a escolha entre explicações concorrentes são chamados de **virtudes explicativas**. Uma série de virtudes explicativas têm sido identificadas e apontadas em contextos científicos diversos. Adequação empírica (explicar dados empíricos relevantes), vários tipos de simplicidade, poder explicativo (o alcance do fenômeno explicado, ou quão iluminadora a explicação é), consistência com teorias atualmente aceitas (conservadorismo epistêmico), não incluir hipóteses *ad-hoc*, poder preditivo e levantar menos questões sem respostas são algumas delas.

Em geral, ao fazer inferências à melhor explicação, as várias hipóteses disponíveis são avaliadas em termo de suas virtudes explicativas, inferindo-se que a hipótese mais virtuosamente explicativa é (provavelmente e provisoriamente) verdadeira. Assim, mesmo se cada uma das hipóteses competidoras explicar todos os fatos relevantes, ainda pode haver uma melhor explicação entre elas. A melhor explicação é aquela que satisfaz melhor as virtudes explicativas consideradas relevantes para aquele contexto (Lipton, 2004). A questão

então seria quantificar o peso dessas virtudes explicativas para chegar a um veredito objetivo sobre qual é a melhor explicação disponível para cada caso. E é aí que está o problema. Não há como fazer isso. Quando situações variadas e em áreas científicas diversas são analisadas, percebe-se que as virtudes relevantes mudam de um caso para outro. O mesmo é observado no estudo de episódios históricos. Em resumo, cada virtude explicativa individualmente não é critério necessário nem suficiente para a IME.

Para entender a variação do peso dado às virtudes explicativas em diferentes contextos, será introduzida a ideia de **crenças de fundo** (*background beliefs*) (Lipton, 2004). Estas são crenças sobre o tipo de descrição que é aceita como genuinamente explicativa. Voltando ao exemplo do detetive investigando um crime: o detetive pode considerar que coletar impressões digitais, procurar pela arma do crime, etc, correspondem a evidências relevantes para resolver o caso. São essas evidências que vão leva-lo a inferir quem cometeu o crime. Mas por que ele deve considerar que coletar impressões digitais é uma boa evidência? São as crenças de fundo que respondem a esse tipo de questão. Elas vão informar a adequação geral dos métodos utilizados pelo detetive. Ou seja, o detetive está preocupado em juntar provas que estejam de acordo com o que ele considerada relevante como evidência, mas são as crenças de fundo dele que vão fornecer as virtudes explicativas utilizadas para julgar a pertinência das evidências potenciais (Day & Kincaid, 1994). Dessa forma, julgar uma explicação como sendo a melhor depende de dois fatores: as crenças de fundo e as virtudes explicativas consideradas (Thagard, 2004). Como a relevância atribuída a diferentes crenças de fundo e virtudes explicativas depende do contexto em questão, **é possível que uma mesma hipótese possa fornecer uma boa explicação em um contexto teórico, mas não seja aceita em outro** (Junges, 2008).

Isto fica evidenciado quando se compara o debate entre especialistas em uma área, por um lado, e a discussão envolvendo céticos (ou leigos), por outro. Quando um conjunto de especialistas em determinado campo debate sobre um tema de amplo consenso, várias peças de conhecimento são assumidas como pano de fundo, por serem compartilhadas pelos membros do grupo. Já quando o debate envolve leigos externos ao domínio da disciplina em questão, não se pode presumir que haja extenso conhecimento de fundo compartilhado, nem que a confiabilidade das evidências seja tomada como garantida. Como os leigos podem não compartilhar das crenças de fundo que os especialistas possuem, o julgamento das **mesmas evidências** pode levar a resultados divergentes entre os dois grupos (Day & Kincaid, 1994). Isso é bem ilustrado pela discussão sobre as causas antropogênicas do aquecimento global.

Enquanto que na comunidade científica há amplo consenso sobre a influência humana no aumento da temperatura média do planeta, entre o público geral esta questão ainda é tratada como controversa (Junges & Massoni, 2018). Esta discussão dá alguma noção sobre como fatores contextuais estão envolvidos e determinam a força da IME.

Com isso, é possível esboçar um breve quadro do conhecimento científico. Inferir a melhor explicação permite avaliar hipóteses explicativas geradas por teorias científicas, com base nas virtudes explicativas consideradas. E com base no conhecimento adquirido sobre hipóteses explicativas, é inferido o quão justificadas as teorias científicas são (McCain, 2015). No entanto, é importante notar que a IME não é um processo que leva a inferir a **única** explicação possível. Inferência à melhor explicação não pode nunca mostrar que uma explicação **precisa** ser verdadeira, mas (no máximo) que é mais provável de ser verdadeira que suas concorrentes em contexto no qual certas crenças de fundo são consideradas (Wilkenfeld & Lombrozo, 2015).

Outra consequência importante da IME é que a Ciência é vista como uma atividade essencialmente **competitiva**. O valor científico de uma hipótese não é conhecido olhando-se simplesmente para ela. São necessárias **outras** explicações para compará-las com essa hipótese. Uma hipótese pode parecer muito provável, mas se outra hipótese parecer ainda mais provável, a primeira explicação perde força. O inverso também pode acontecer. Uma hipótese pode parecer uma explicação pobre, mas se todas as teorias alternativas forem consideradas ainda piores, a hipótese se torna mais plausível. O processo exato pelo qual conhecimento é adquirido e a qualidade de explicações concorrentes é avaliada é muito mais complexo do que este quadro, mas ele fornece uma noção sobre como as várias peças do quebra-cabeças se encaixam (McCain, 2015).

3.3 Olhando Para Episódios Históricos Segundo a Inferência à Melhor Explicação

Será discutido agora o olhar da IME para episódios históricos. Inúmeros são os exemplos apontados pelos filósofos como ilustrações do uso da IME na Ciência. Alguns deles incluem: a disputa entre o modelo heliocêntrico do sistema solar de Copérnico e o modelo geocêntrico da teoria Ptolomaica (Gauch, 2012); a disputa entre a teoria da combustão do oxigênio de Antoine Lavoisier e a teoria do flogístico (Thagard, 1978); e a descoberta do elétron por J. J. Thomson para explicar o comportamento de raios catódicos (Achinstein,

2001). Outro exemplo célebre é Charles Darwin, que recorreu ao mérito explicativo da seleção natural para defender sua teoria. Nas palavras dele: “é difícil supor que uma teoria falsa poderia explicar, de forma tão satisfatória como faz a teoria da seleção natural, as várias classes de fatos especificados anteriormente” (Darwin, 1962, como citado em Thagard, 1978, p. 77, nossa tradução). Episódios de IME são tão frequentes no raciocínio científico que Ernan McMullin (1992) chega a se referir a ela como “a inferência que faz a Ciência” (p. 144, nossa tradução).

Seguem três episódios históricos com um pouco mais de detalhe. O primeiro deles é a resistências dos cientistas do século XVII a aceitar a lei da gravitação universal proposta por Isaac Newton. A filosofia mecânica do século XVII considerava que causas não podiam atuar a distância, exatamente o que as forças propostas por Newton faziam (Day & Kincaid, 1994). Como a lei da gravitação universal não atendia a esta importante crença de fundo da época, a teoria enfrentou forte resistência a princípio. Só com o passar dos anos, com a capacidade preditiva da teoria superior à de suas concorrentes, esta resistência foi sendo revista e posteriormente abandonada, implicando na aceitação da teoria e adoção de novas crenças de fundo para este campo do conhecimento (Gingras, 2001).

O segundo caso é a recusa de Albert Einstein em aceitar a realidade física proposta pela Física Quântica. Einstein rejeitou a teoria quântica porque ela falhava em fornecer previsões determinísticas para os fenômenos, uma virtude explicativa que Einstein considerava valiosa demais para abandonar. No entanto, o subsequente desenvolvimento teórico e sucesso empírico da Física Quântica fez com que a comunidade científica fosse gradativamente abrindo mão dessa exigência. Como resultado, a física quântica não atendeu às expectativas de Einstein, que teve sua crença sobre o que seria necessário para uma explicação satisfatória eclipsada pelo sucesso desta teoria (Day & Kincaid, 1994).

E, por fim, um terceiro exemplo interessante ocorreu na astronomia do século XIX. No começo daquele século foi percebido que a órbita de Urano, um dos sete planetas conhecidos na época, diferia da órbita prevista com base na teoria da gravitação universal de Newton. Uma conclusão possível era que a teoria de Newton havia sido refutada. No entanto, dado o grande sucesso empírico por (na época) mais de dois séculos, esta explicação não aderiu bem às crenças de fundo vigentes. Dois astrônomos, John Couch Adams e Urbain Le Verrier (independentemente um do outro, mas quase simultaneamente) sugeriram que havia um oitavo planeta, um planeta ainda desconhecido no sistema solar. Isto, eles imaginaram,

proporcionou a melhor explicação do desvio da órbita de Urano. Não muito tempo depois este planeta, que agora é conhecido como Netuno, foi observado pela primeira vez (Douven, 2017). Mas isto gerou um precedente: quando um planeta desvia do seu curso Newtoniano, a gravidade de algum outro planeta desconhecido pode ser a causa. Mercúrio foi o próximo cuja órbita foi notada como imprecisa⁶. O próprio Le Verrier considerou que a melhor explicação seria haver outro planeta, cuja órbita foi calculada para estar dentro da de Mercúrio, ainda mais perto do Sol. Esse novo planeta foi chamado de Vulcano. Para considerar se a hipótese de Vulcano era uma boa explicação da derivação da órbita de Mercúrio, note que a única alternativa (prática) seria dizer que a mecânica newtoniana estava equivocada (supondo que as observações estivessem corretas). E a mecânica newtoniana era uma grande realização científica da história humana, a teoria que serviu de fundação para toda a Física. Alguns astrônomos chegaram a reivindicar ter observado Vulcano, mas a maioria não conseguiu e a hipótese definiu. Outras alternativas foram propostas, como a existência de um satélite de Mercúrio; massas até 10% maiores para o planeta Vênus; um achatamento gravitacional do Sol; e modificações na lei da gravitação universal. Mas todas elas possuíam seus problemas, e a anomalia foi ignorada até que uma explicação melhor fosse fornecida (Douven, 2017). O problema foi retomado na segunda metade da década de 1910, quando a teoria da relatividade geral de Einstein previu a órbita observada de Mercúrio sem assumir a existência de um planeta entre Mercúrio e o Sol.

Esses episódios breves ilustram o desenrolar complexo de diferentes episódios históricos. É na tentativa de produzir explicações que virtudes explicativas, crenças de fundo e teorias são avaliadas e eventualmente substituídas. No entanto, não existem fórmulas prontas e universais. O emprego do mesmo raciocínio a duas situações semelhantes pode levar a resultados opostos, e a ausência de uma boa explicação pode fazer uma anomalia ser “negligenciada” enquanto não houver uma teoria capaz de resolvê-la. O objetivo aqui não é fazer uma análise detalhada desses episódios – análises desse tipo serão feitas nos capítulos seguintes. O propósito, por ora, é apresentar características do olhar da IME para o “fazer científico”.

⁶ Havia uma discrepância significativa entre o valor previsto e o valor observado para a precessão do periélio de Mercúrio (deslocamento ao longo dos anos do ponto da órbita mais próximo do Sol).

4 ESTUDO I: APROXIMANDO NATUREZA DA CIÊNCIA E INFERÊNCIA À MELHOR EXPLICAÇÃO

Este primeiro estudo busca responder à questão de pesquisa número 1: Como as características da Inferência à Melhor Explicação podem ser mobilizadas para abordar elementos da Natureza da Ciência por meio de episódios da história da Ciência no ensino de Física? Para isso, dois movimentos são realizados no presente capítulo. O primeiro deles é apresentar argumentos que justifiquem a aproximação entre a abordagem de aspectos epistêmicos via IME e as características da NdC defendidas pela visão consensual. O segundo movimento corresponde a desenvolver uma esquematização que sintetize a abordagem que propomos para o estudo de episódios da história da Ciência, integrando os pontos levantados anteriormente.

4.1 Aspectos Consensuais e a Inferência à Melhor Explicação

No capítulo 2 foram apresentadas algumas características da NdC defendidas pela visão consensual. Entre elas estão: o conhecimento científico ser tentativo, empiricamente baseado e subjetivo; envolver a inferência humana, a imaginação e a criatividade; e ser social e culturalmente situado. Já no capítulo 3, foram apresentadas as principais características da Inferência à Melhor Explicação. A IME oferece uma forma de descrever como o conhecimento científico é produzido e avaliado. Ela parte do princípio de que um dos principais objetivos da atividade científica é proporcionar explicações que levem à compreensão da natureza. Dessa forma, é no confronto entre explicações concorrentes que hipóteses científicas são criadas e avaliadas. Crenças de fundo e virtudes explicativas especificam os critérios utilizados para avaliar a melhor explicação em um contexto específico. Quando uma teoria particular gera hipóteses que explicam um conjunto de evidências melhor que suas rivais, podemos inferir que essas hipóteses são (provisoriamente) verdadeiras. Evidentemente esse conhecimento é tentativo, no sentido de que ele pode ser revisto à luz de novas evidências ou de novas teorias rivais.

Dessa forma, algumas características importantes da NdC consideradas pela visão consensualista são naturalmente abordadas pela IME. Exemplos incluem: o caráter provisório do conhecimento científico; a importância da competição entre teorias rivais; a complexa

relação entre teorias e experimentos; e a discussão dos critérios utilizados pela Ciência para avaliar o conhecimento que ela produz. Os aspectos sociais e culturais da atividade científica também podem ser destacados ao se explicitar como esses fatores influenciam as explicações produzidas e a escolha entre explicações rivais. A IME viabiliza isso quando é feito explícito que os compromissos disciplinares, crenças, conhecimentos prévios, treinamentos e expectativas dos cientistas influenciam o trabalho deles. Estes fatores de fundo afetam a escolha dos cientistas dos problemas para investigar e dos métodos de investigação, observação e interpretação das observações. Contrário à crença comum, a Ciência nunca começa com observações neutras. Observações são sempre motivadas e guiadas por certas perspectivas teóricas, além de só adquirem significado à luz de questões e problemas também inseridos em um quadro teórico mais amplo (Abd-El-Khalick, 2013).

A vantagem de utilizar a IME para abordar episódios históricos é (1) a identificação dos compromissos disciplinares, crenças, conhecimentos prévios, expectativas, etc. que influenciaram os trabalhos dos cientistas em momento particular da história, e (2) a reflexão com os estudantes sobre a racionalidade e objetividade do conhecimento científico, focando em discussões sobre como o conhecimento científico é produzido e como ele é justificado. Há ainda a vantagem adicional de (3) apresentar aos estudantes não só a explicação que “venceu” as disputas científicas e se tornou conhecimento aceito, mas destacar o processo por meio do qual esses conflitos ocorrem, por que a Ciência pode ser considerada uma atividade racional e as justificativas que sustentam a aceitação deste conhecimento.

Um exemplo de discussão que a IME pode proporcionar envolve o papel de evidências na produção e validação de conhecimento científico. Contrária à concepção ingênua de que as evidências disponíveis determinam qual explicação é de fato a “melhor”, existe a tese de que **teorias não são determinadas pelas evidências observacionais disponíveis**. Em seu sentido fraco, a tese sugere que, na prática da Ciência, a evidência disponível não é suficiente para decidir entre teorias ou hipóteses rivais (Newton-Smith, 2000). No sentido forte, a tese afirma que teorias são indeterminadas pelas evidências observacionais disponíveis porque qualquer teoria científica possui uma teoria rival à qual ela é empiricamente equivalente. Em ambos os sentidos, proponentes da indeterminação das teorias científicas pela evidência disponível (Duhem, 1991; Quine, 1951) argumentaram que, do ponto de vista lógico, cientistas podem permanecer fiéis a suas teorias independentemente das novas evidências empíricas disponíveis, mesmo que contraditórias (Abd-El-Khalick, 2013).

Nesta mesma direção, Chinn e Brewer (1993) examinaram a literatura de HFSC e identificaram sete modos distintos de cientistas e estudantes de Ciências responderem a dados anômalos. Apenas um dos sete tipos de resposta inclui a aceitação de dados anômalos e a mudança de suas ideias. As outras seis respostas permitem cientistas e estudantes a manterem ou apenas modificar suavemente suas ideias centrais e concepções prévias. Essas respostas incluem: ignorar os dados anômalos, rejeitar todos os dados, excluir os dados do domínio de validade da teoria/concepção prévia, deixar o dado em suspensão, reinterpretar o dado mantendo a teoria/concepção prévia, ou reinterpretar os dados e fazer mudanças periféricas nas concepções/teorias prévias. Esses padrões de respostas dos estudantes a anomalias são encontrados em diversos estudos empíricos (Duncan, Freidenreich, Chinn, & Bausch, 2010). É importante notar que, de acordo com Duhem (1991), cientistas e estudantes, nos seis casos identificados por Chinn, **não estão necessariamente** agindo irracionalmente ou de forma não-lógica quando mantêm suas ideias centrais em face de evidências aparentemente refutadoras (Abd-El-Khalick, 2013).

Isto justifica a relevância de não se deter apenas à análise da evidência disponível e da hipótese em questão. A IME aponta dois caminhos para ir além dessa questão: (1) comparar as hipóteses alternativas disponíveis e (2) investigar as crenças que justificam as interpretações concorrentes sobre tal evidência. Estudos como o de Sadler, Chambers e Zeidler (2004) mostram que, para tomar decisões sociocientíficas, muitos estudantes confiam mais na informação relevante para defender suas crenças pessoais do que no valor científico das evidências disponibilizadas. Aceitar a falibilidade de nossas crenças de fundo é o primeiro passo para participar de debate científico que supere esta questão. Ao olhar para a história da Ciência, nota-se que qualquer fator que leve uma explicação científica a ser considerada “a melhor” é falível. A evidência disponível pode ser inadequada ou incompleta, virtudes explicativas consideradas adequadas em um contexto podem se mostrar equivocadas em outro, e crenças de fundo mudam e são substituídas com o tempo. Reconhecer e aceitar isso faz parte de um profundo exercício de humildade intelectual.

Allchin (2004) lista mitos científicos corriqueiramente proporcionados no ensino de Ciências. Entre eles está que: interpretar evidência não é problemático e leva a respostas de sim ou não, e que o método científico leva certa e inevitavelmente à verdade, sem erro. Esses mitos são utilizados predominantemente para explicar e justificar a autoridade da Ciência. No entanto, eles se baseiam em distorções históricas. Estudantes não entenderão as garantias e limites da Ciência se os professores promoverem essas “concepções míticas” (Allchin, 2004).

Um mérito que enxergamos no uso da IME para abordar episódios históricos é permitir discutir essas questões sem adotar postura dogmática em defesa da Ciência (defesa autoritária do conhecimento científico), por um lado, nem favorecer um relativismo no qual conhecimento científico e opinião sejam igualmente válidos (considerar que a Ciência não possua qualquer autoridade), por outro. O conhecimento científico e os cientistas são falíveis, o conhecimento é considerado provisório e a Ciência não é neutra. Mas, apesar de tudo isso, há boas razões para considerar que uma explicação é melhor que suas concorrentes dentro do domínio científico. Obviamente, explicitar essas questões não é uma exclusividade da IME, mas elas são destacadas naturalmente em um estudo pautado por esta abordagem.

4.2 Esquematização da Abordagem

Nesta seção é apresentada uma esquematização que busca sintetizar e integrar as discussões feitas até aqui. De modo semelhante e inspirado no trabalho de Abd-El-Khalick (2013), consideramos a existência de três domínios principais para a inclusão de NdC no ensino de Ciências por meio do uso de História da Ciência. Um domínio com respeito aos **conhecimentos científicos**, um domínio para o **conhecimento de aspectos de NdC**, e um domínio para o **conhecimento de práticas e habilidades pedagógicas** capazes de abordar e/ou integrar os domínios anteriores. Nessa perspectiva, colocamos dentro do domínio científico não só o (fundamental) conhecimento do conteúdo científico em questão (e.g., leis de Newton), mas também o domínio de narrativas históricas específicas sobre o episódio histórico em questão. O domínio do conhecimento de aspectos da NdC inclui temas da visão consensual sobre NdC, e também compreensão sobre o uso de história no ensino de Ciências (e.g., discussão sobre pseudohistória, hagiografia, história *whigg*). Da intersecção desses domínios surge a necessidade de identificar os aspectos da NdC relevantes para o estudo de um episódio histórico particular. O terceiro domínio engloba o conhecimento de práticas que possibilitem concretizar os conhecimentos pretendidos pelos outros dois. Embora existam formas diversas de fazer isso (e.g., Moura & Silva, 2014), este trabalho focará nesta abordagem proposta através do uso da IME.

Após apresentar os aspectos considerados necessários para uma boa abordagem de episódios históricos para o ensino de Ciências segundo a IME, chegou a hora de tentar esquematizar como ela se concretiza na prática. Começamos tentando representar todo o

conhecimento mobilizado até aqui de forma sucinta. Como apontado em Rodrigues e Pereira (2020), entendemos que seja importante identificar seis elementos principais para uma boa caracterização da abordagem de um episódio da história da Ciência. São eles: (1) identificar o episódio histórico abordado, (2) apresentar o contexto científico da época na qual as explicações em questão foram propostas, (3) destacar as explicações potenciais envolvidas (duas ou mais explicações concorrentes), (4) apontar virtudes explicativas específicas **daquele contexto** para avaliar e justificar as explicações científicas, (5) identificar crenças de fundo nas quais cada uma das explicações potenciais se baseiam, e (6) identificar aspectos da NdC (e quando necessário da historiografia da Ciência também) discutidos na análise em questão. O quadro 1, a seguir, sintetiza esta esquematização.

Episódio	Nome do episódio
Contexto científico	Teorias científicas e eventos históricos relevantes para entender o contexto no qual o episódio histórico sob estudo ocorreu.
Explicação potencial 1	Uma das explicações propostas para abordar o problema em questão.
Explicação potencial 2	Explicação concorrente para abordar o problema em questão.
Crenças de fundo de cada uma das explicações envolvidas.	<ul style="list-style-type: none"> • Quais teorias são consideradas válidas para abordar este domínio de conhecimento. • Quais metodologias são consideradas confiáveis para a aquisição e interpretação de evidências. • Fatores sociais/culturais que possam influenciar a preferência pelas explicações.
Virtudes explicativas	Critérios utilizados para avaliar qual a melhor entre as explicações consideradas.
NdC	Aspectos da NdC e/ou história da Ciência considerados

	pertinentes para discutir por meio do estudo do episódio histórico em questão.
--	--

Quadro 1 – esquematização da abordagem.

Este quadro será utilizado para orientar a discussão sobre episódios históricos, como ilustrado nos capítulos seguintes. No entanto, pode haver elementos adicionais relevantes para discutir outros episódios históricos. Um exemplo é contrastar as virtudes explicativas e crenças de fundo utilizadas **no contexto histórico** em questão com as virtudes explicativas e crenças de fundo utilizadas *a posteriore*, compondo o olhar contemporâneo do episódio. A lista abaixo apresenta algumas características da NdC que podem preencher a última linha do quadro.

- Conhecimento científico é tentativo (sujeito a mudanças), empiricamente baseado (baseado e/ou derivado da observação do mundo natural) e subjetivo (influenciado por fatores pessoais, vieses e orientações teóricas).
- A Ciência envolve necessariamente a inferência humana, a imaginação e a criatividade (envolve a invenção de explicações).
- Distinguir inferência de observação.
- Distinguir leis de teorias.
- Não existe um método científico universal.
- A Ciência é um empreendimento humano e praticado no contexto de uma larga cultura.
- Desmistificar a figura do cientista. Eles são influenciados pelo seu contexto histórico e cultural, e o desenvolvimento científico não é regido pelo trabalho individual de gênios isolados.
- Elementos da historiografia da Ciência (e.g., história *whigg*, pseudohistória, quase-história).

Já quanto a crenças de fundo e virtudes explicativas, falar delas em linhas gerais é um tanto vago, porque o valor delas é amplamente dependente do contexto em questão. Segue um exemplo ilustrativo. Considere um caso que envolva superstição, como ocorre com torcedores que acham que usar uma mesma camisa “da sorte” influencie no resultado de um jogo de futebol. Este raciocínio está pautado em uma crença de fundo distinta das que estamos destacando aqui. Obviamente esta não é uma crença que possua valor no contexto científico,

mas é importante considerar esses casos já que, dependendo do contexto, é possível que fatores como esses sejam relevantes para o confronto entre explicações. Consideramos que um dos méritos desta abordagem é justamente levar em consideração as crenças que estão sendo mobilizadas em situações diversas. Explicitar as crenças de fundo envolvidas certamente não é condição suficiente para convencer alguém sobre sua adequação (ou não) a determinado contexto, mas definitivamente é um passo importante nessa direção.

A lista a seguir exemplifica, de algum modo, virtudes explicativas valorizadas pelo contexto científico (com base na filosofia da Ciência). A lista deve ser olhada com a ressalva de que estas são virtudes explicativas características do contexto científico que, por um lado, não são suficientes para exaurir todos os critérios que podem ser utilizados nesse contexto, e que, por outro lado, muitas vezes são inadequadas para explicar a avaliação de explicações fora deste contexto. Essas virtudes explicativas são:

- Adequação empírica (explicar dados empíricos relevantes);
- Simplicidade;
- Poder explicativo (o alcance do fenômeno explicado, ou quão iluminadora a explicação é);
- Consistência com teorias atualmente aceitas (conservadorismo epistêmico);
- Não incluir hipóteses ad-hoc;
- Poder preditivo;
- Levantar poucas questões sem respostas.

Uma última ressalva deve ser feita sobre esta abordagem: no contexto desse trabalho, o conceito de “crenças de fundo” não será empregado para avaliar as virtudes explicativas envolvidas. É evidente que qualquer virtude explicativa empregada possui crenças de fundo que justifiquem sua escolha em detrimento de outras virtudes explicativas possíveis. Em qualquer IME haverá certa arbitrariedade inerente à escolha de um conjunto particular de virtudes explicativas. Esta questão é abordada nos estudos que seguem e destaca-se a importância de se estar atento a ela. Mas o termo “crença de fundo” não será empregado com essa finalidade, para evitar confusão. Dessa forma, optou-se por preservar o conceito de crenças de fundo apenas para se referir às bases teóricas, metodológicas, sociais, etc. nas quais as **explicações** envolvidas se baseiem.

4.3 Por Uma Abordagem Que Não Seja Estruturalista Nem Relativista

Agora que a perspectiva foi apresentada, gostaríamos de situá-la com respeito a uma discussão que opõe o estruturalismo e o relativismo (Rodrigues & Pereira, 2020). Esta questão se refere a uma variedade de conflitos que surgiram durante a segunda metade do século XX, geralmente opondo cientistas e investigadores das ciências naturais, sobretudo da área da Física, contra teóricos e críticos oriundos de áreas como história e sociologia⁷. A discordância se dá por meio de divergências com respeito a concepções epistemológicas, metodológicas e axiológicas, e se materializa em oposições como: realismo vs antirrealismo (Bagdonas, Zanetic & Gurgel, 2014), racionalismo vs relativismo (Damasio & Peduzzi, 2015) e estruturalismo vs relativismo (Jardim & Guerra, 2017).

Esta oposição surge porque, durante séculos, o conhecimento científico se viu como autônomo em relação a outras áreas de conhecimento, imune a condições sociais, psicológicas, históricas, morais, religiosas, etc. No entanto, em meados do século XX este cenário mudou. Como mencionado na seção 2.1.2, autores como Paul Feyerabend (1977) e Thomas Kuhn (1998) levantaram dúvida sobre a objetividade e a universalidade do conhecimento científico⁸, a partir de seus estudos sobre a história da ciência. Como resultado, ocorreu o que ficou conhecido como “virada sociológica” nesta área – com o surgimento de escolas sociológicas como as de Paris, Bath e Edimburgo (Vasconcelos, 2014). Nesse cenário surgem autores que destacaram os aspectos irracionais da produção do conhecimento científico, além de sua estreita relação com fenômenos históricos, sociais e culturais. O objetivo era relativizar a aura de certeza e autonomia da ciência, apresentando-a como uma construção social.

Como recorte, vamos focar na faceta desta questão voltada ao contraponto entre estruturalismo e relativismo. O estruturalismo é uma corrente de pensamento presente em disciplinas como psicologia, filosofia, antropologia e sociologia, que se inspirou no modelo

⁷ Vários autores chamam atenção para o fato de ser demasiado simplista identificar os cientistas, por um lado, e os sociólogos, historiadores e filósofos, pelo outro, como adversários. Como Michael Lynch (2001) destaca, há cientistas que deram contribuições relevantes para a sociologia da ciência (como Gerald Holton), assim como há filósofos que atacam o relativismo e o construtivismo (como Mario Bunge, Susan Haak ou Noretta Koertge). De modo geral, é reducionista e simplista categorizar quem está contra quem. No entanto, há críticas e trocas de argumentação entre as partes que são extremamente claras e diretas, e que expressam questões importantes. São estas as questões que a presente seção busca abordar.

⁸ Esta desconfiança pode ser percebida, anteriormente, na crítica de David Hume à indução, e nas obras dos chamados filósofos da suspeita: Nietzsche, Freud e Marx.

da linguística proposto por Ferdinand Saussure na década de 1910. Esta perspectiva concebe a realidade social a partir de um conjunto considerado elementar (ou formal) de relações (Vasconcelos, 2014). De forma resumida, o método estruturalista consiste na análise da realidade social a partir da construção de modelos que expliquem seu funcionamento por meio de um conjunto de estruturas universais. Quando aplicadas à ciência, noções estruturalistas buscam identificar padrões e regularidades no desenvolvimento da ciência. Um exemplo são os falseacionistas que, baseados em Popper (1962), consideravam que a falseabilidade é o critério que separa o que é ciência daquilo que não é. Um estruturalista extremo dá grande valor à sua estrutura, acreditando que ela leve à verdade. Estas estruturas podem ser utilizadas como critério de demarcação e/ou para definir (normativamente) como a ciência deve funcionar. Segundo perspectivas desse tipo, exemplos históricos servem para respaldar tais concepções, consideradas universais e atemporais. Como ressaltado por Slezak (1994), uma concepção desse tipo também flerta com uma visão essencialista da ciência, em que se acredita que há uma essência ou um conjunto de critérios que descrevam as atividades e as investigações consideradas científicas. Dessa forma, o objetivo da filosofia da ciência seria produzir modelos tão próximos quanto possível dessa “essência” científica.

No entanto, o estruturalismo desconsidera as condições históricas. Desde sua origem, este movimento é criticado por estabelecer certo determinismo estrutural em detrimento à habilidade de pessoas individuais de atuar, além de ignorar as particularidades de diversas áreas da ciência. Além disso, é bem documentado pela história da ciência que se os padrões da lógica e da racionalidade tivessem sido aplicados com rigor, teriam sido muito prejudiciais para o desenvolvimento da ciência (Damasio & Peduzzi, 2015). Por conta disso, o estruturalismo tem sido abandonado, dando lugar ao que ficou conhecido por pós-estruturalismo.

Já o relativismo é uma corrente de pensamento que se opõe fundamentalmente ao estruturalismo. O relativismo é associado principalmente ao conhecimento de ciências humanas, como antropologia e filosofia. Ele questiona as verdades universais, desconstruindo crenças estabelecidas previamente. Aquele que relativiza suas opiniões é aquele que acredita na existência de mais de uma verdade, a partir de diferentes perspectivas, e que não há necessariamente uma interpretação única para entender algo. Ao olhar para a ciência, o relativista considera que a ciência é apenas mais uma tradição, perdendo sua condição de privilegiada. Com respeito à racionalidade, por exemplo, o relativista nega que haja um padrão único, universal e não-histórico, com o qual se possa julgar que uma teoria seja melhor

do que outra (Chalmers, 1993). Podemos citar Paul Feyerabend como um exemplo célebre de postura epistemológica relativista⁹. Feyerabend (1977) argumenta que a ideia de um método com princípios fixos e universais é insustentável a partir da perspectiva historiográfica, pois não há uma regra única sequer que não seja violada ao se analisar a história da ciência. Considerando posições mais radicais, o programa forte da sociologia da ciência (proposto por sociólogos como Latour, Woogar, Pinch, Collins, Bloor e Shapin) descreve a ciência como refletindo somente interesses e relações de poder entre diferentes grupos (Bagdonas et al., 2014). O determinismo social que este relativismo radical propõe tem sido contestado por diversos historiadores, filósofos e sociólogos da ciência. Além disso, pesquisadores do ensino de Ciências como Pietrocola (1999) se preocupam que o fortalecimento do relativismo radical faça a ciência perder credibilidade em comparação com outras tradições sociais, como religião e astrologia.

Trazendo a discussão para o âmbito do ensino de ciências, o “ensino tradicional”, tão criticado por ser excessivamente racionalista e por propagar concepções positivistas e empiristas, possui afinidade com uma visão estruturalista, embora nem sempre uma estrutura seja apresentada explicitamente. Além disso, perspectivas de ensino pautadas numa visão estruturalista costumam não abordar a complexidade da filosofia da ciência. Em vez disso, se limitam a discutir questões filosóficas (e muitas vezes controversas) por meio da defesa de uma visão única, criticando qualquer alternativa. O problema de adotar uma perspectiva como essa é conceber o ensino de ciências (e da filosofia da ciência, principalmente) como a propagação de ideias prontas, e não como uma atividade fundamentalmente reflexiva. Como dito por Bagdonas *et al.* (2014), uma visão do conhecimento científico limitada a proposições positivas sobre o mundo contribui para a formação de sujeitos alienados. Mas as críticas ao estruturalismo não significam que o relativismo seja o caminho ideal para ensinar sobre a natureza da ciência. Nola e Irzik (2005) criticaram a importância exagerada que se tem atribuído à dimensão social para a atividade científica. Esses autores defendem uma concepção realista e racionalista da ciência, recusando a visão de que os conteúdos científicos sejam amplamente determinados por variáveis sociais. A crítica destes autores se direciona aos entusiastas do “programa forte” da sociologia.

Uma saída para esse impasse é adotar postura moderada nos debates controversos sobre a natureza da ciência (Eflin, Glennan, & Reisch, 1999; Pietrocola, 1999), evitando

⁹ Apesar de não se tratar de um relativista extremo, como apresentado por Damasio e Peduzzi (2015).

posições radicais de ambos os lados. Abordagens mais voltadas ao estruturalismo ou ao relativismo podem ser legítimas para atenderem a objetivos pedagógicos distintos. Quando o objetivo é o ensino da maior quantidade de conteúdo no menor tempo possível, na formação de cientistas, por exemplo, o uso de uma reconstrução racional da história da ciência pode ser uma boa opção, desde que isto esteja explícito e seja uma escolha consciente. Por outro lado, se pudermos proporcionar uma desejável formação mais crítica sobre a ciência, reconhecendo o seu valor e os perigos da confiança cega em sua autoridade, então a problematização mais profunda de questões sociológicas e históricas será muito bem-vinda.

Para terminar, acreditamos que Bagdonas *et al.* (2014) foram felizes ao considerar que:

“sendo a ciência uma produção humana tão complexa e diversificada, não nos cabe assumir, a princípio, que fatores sociais, culturais, políticos e econômicos sejam sempre mais ou menos importantes que fatores experimentais, lógicos ou racionais. Cada caso deve ser analisado separadamente, tanto no âmbito dos estudos de sociologia, história e filosofia da ciência, quanto nas discussões sobre as ciências no contexto da educação” (p. 253).

Estamos de acordo com autores que reconhecem o valor da pluralidade de abordagens historiográficas e filosóficas. Nesse sentido, rejeitam-se abordagens dogmáticas que dificultem o surgimento de abordagens diferentes.

4.4 Uma Ilustração Breve

No capítulo anterior, um dos exemplos utilizados para ilustrar o olhar da IME sobre episódios históricos foi a existência hipotética do planeta Vulcano (depois da “descoberta” de Netuno). Vamos retomar este episódio para ilustrar como ele poderia ser esquematizado com base no que foi apresentado até aqui.

O problema da época era explicar as observações da órbita de Mercúrio que divergiam do resultado previsto com o uso da lei da gravitação universal. Muitas explicações foram propostas para tentar resolver este problema. Destacam-se duas delas em particular: o postulado da existência de Vulcano (explicação potencial 1) e a proposta de fazer ajustes à lei da gravitação universal (explicação potencial 2). Uma importante crença de fundo que permeava este contexto foi a confiança na validade da lei da gravitação universal. Já no julgamento das explicações propostas, muitas virtudes explicativas são utilizadas

simultaneamente para testar as inúmeras hipóteses (Douven, 2017). Uma delas, em defesa da hipótese de Vulcano, era a importância dada à lei da gravitação universal naquela época e o grande valor que era atribuído às soluções que preservavam o domínio de validade desta importante teoria (conservadorismo epistêmico).

Em oposição à hipótese, no entanto, advogou posteriormente o fato de que, embora ela fosse teoricamente eficaz, a importante virtude explicativa de realizar medições reproduzíveis não foi atendida. Resultados experimentais são, com frequência, evidências relevantes em embates científicos, embora não seja o único tipo de evidência relevante. Este próprio caso será resolvido posteriormente pela teoria da relatividade, a partir de uma perspectiva puramente teórica. No entanto, iremos restringir o episódio em questão apenas ao conhecimento obtido até o século XIX. Pode-se tirar algumas conclusões valiosas para o ensino de aspectos da NdC daqui. Uma delas diz respeito ao caráter tentativo do conhecimento científico. A Ciência é, em grande medida, a busca por refinar explicações com base em experiências de tentativa e erro. O episódio também possibilita fazer uma boa distinção entre observação e inferência, inclusive ao abordar a falibilidade de observações científicas (como as supostas observações de Vulcano), e o caráter tentativo das inferências realizadas. O episódio também é propício para problematizar a existência de um método científico único na Ciência, principalmente pelo fato de que o mesmo raciocínio aplicado a dois casos semelhantes (Netuno e Vulcano) levou a resultados opostos. No entanto, episódios de êxito científico são naturalmente exaltados no ensino de Ciências, enquanto seus fracassos são raramente mencionados, o que pode incentivar a sacralização da atividade científica e dos cientistas.

Esta é um breve exemplo ilustrativo do uso da abordagem que estamos propondo. Deixamos para o próximo capítulo a realização de análise mais profunda de outros episódios. Os pontos mencionados nesta ilustração estão sintetizados no Quadro 2, a seguir:

Episódio	Periélio anômalo de Mercúrio
Contexto científico	Descoberta de Netuno e observação de órbita anômala de Mercúrio.
Explicação potencial 1	Deve existir um novo planeta chamado Vulcano.

Explicação potencial 2	A lei da Gravitação Universal precisa ser corrigida.
Crenças de fundo da explicação 1	<ul style="list-style-type: none"> • Domínio de validade da Lei da Gravitação Universal. • Reprodução do raciocínio bem-sucedido no caso de Netuno.
Crença de fundo da explicação 2	<ul style="list-style-type: none"> • Adequação de teorias da época aos resultados experimentais obtidos.
Virtudes explicativas	<ul style="list-style-type: none"> • Resolver a discordância sem falsear a adequação da teoria aceita (Alterar a lei da gravitação poderia gerar muitos problemas com respeito a outras situações nas quais ela era aplicada com sucesso).
NdC	<ul style="list-style-type: none"> • Caráter tentativo do conhecimento científico. • Distinção entre inferência e observação. • Não existe um método científico universal. • O êxito científico costuma ser muito exaltado (caso de Netuno), enquanto equívocos são (frequentemente) ignorados (caso de Vulcano).

Quadro 2 – Síntese da discussão sobre o episódio do planeta Vulcano.

5 ESTUDO II: ABORDAGEM DE EPISÓDIOS HISTÓRICOS

Este segundo estudo busca responder à questão de pesquisa número 2: quais as características principais do estudo de episódios históricos realizados segundo a perspectiva desenvolvida no capítulo anterior? Para isso, foi adotado como recorte o uso de tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) como conteúdo abordado pelos episódios históricos apresentados na sequência deste trabalho. A relevância de incluir tópicos de (FMC) no ensino de Física tem sido destacada na literatura ao longo das últimas décadas (e.g., Ostermann & Moreira, 2000; Pereira & Ostermann, 2009; Terrazzan, 1992). Gradual e lentamente, estes tópicos têm sido incluídos em livros didáticos de educação básica – se esses capítulos são abordados pelos professores é outra história – e tem sido cada vez mais contemplados em cursos de formação de professores (e.g., Monteiro, Nardi & Bastos Filho, 2009; Ostermann & Ricci, 2005; Rezende Junior & Cruz, 2009). O tema também tem recebido atenção de avaliações como o ENEM, o que contribui para que seja incluído no currículo e receba cada vez mais atenção por parte dos professores. Por outro lado, professores apontam dificuldade em abordar o tema, principalmente por ser uma temática com a qual muitos deles não têm familiaridade ou domínio (Ostermann & Moreira, 2000). A complexidade matemática dos conteúdos também se apresenta como uma grande dificuldade para sua transposição para o nível da educação básica (Terrazzan, 1992).

Uma alternativa para superar essas barreiras, presente em muitos livros didáticos, é abordar a Física Moderna a partir de uma perspectiva histórica. No entanto, a história contada tradicionalmente para abordar estes conteúdos costuma cometer muitos dos equívocos da quase-história discutida na seção 2.3.3. Como apontado por Kragh (1992), virtualmente todos os livros-textos introduzem o postulado quântico – a necessidade de conceber processos físicos como descontínuos em nível atômico ou subatômico – ao se referirem ao número de fatos experimentais que foram descobertos no início do século XX e que parecem inexplicáveis sem a hipótese de quantização. Os fenômenos discutidos usualmente incluem a radiação de corpo-negro, o efeito fotoelétrico, linhas do espectro óptico e de raios-X, e espalhamento Compton. O objetivo principal do uso da história da Ciência, nesses casos, não costuma ser que os estudantes aprendam sobre a história desses experimentos. Eles costumam ser utilizados como um meio de persuadir os estudantes de que a quantização de energia é uma conclusão inevitável.

O problema é que o objetivo didático é muitas vezes contradito pelo curso real da história, o que torna tentador inventar uma quase-história para propósitos educacionais. No entanto, essas introduções são apresentadas cronologicamente, dando a impressão de que elas são resumos confiáveis do desenvolvimento real que levou à aceitação da teoria quântica. A ideia é reconstruir partes do passado, e dessa forma convencer os estudantes de que a conclusão obtida pelos físicos do passado é a única racional (Kragh, 1992). Como resultado, a história do início da teoria quântica é apresentada como uma sequência acumulativa de experimentos que apontam para a quantização da energia. Esta visão é problematizada neste capítulo, por meio de dois episódios históricos abordados segundo a perspectiva da IME. O primeiro deles envolve tentativas de explicar o efeito fotoelétrico nas duas primeiras décadas do século XX (seção 5.1). A fonte histórica utilizada como referência para este episódio é o artigo de Kragh (1992). Já na seção seguinte (5.2), é abordado o episódio da radiação de corpo negro. Este episódio é desenvolvido a partir dos estudos historiográficos de Jammer (1966), Kuhn (1978) e Kragh (2000).

5.1 Episódio 1: O Efeito Fotoelétrico

O efeito fotoelétrico é a liberação de elétrons da superfície de um metal quando luz incide sobre ela em determinadas circunstâncias. A explicação deste fenômeno tem desempenhado papel importante na apresentação de livros didáticos sobre a quantização da energia (Kragh, 1992). Kragh (1992) aponta que, com poucas exceções, a estrutura desta abordagem é a seguinte: próximo a 1900 a compreensão do efeito fotoelétrico causou uma crise, porque a teoria Ótica Clássica não era capaz de explicar sua ocorrência. Então, em 1905, Einstein brilhantemente resolveu a crise com a hipótese de Planck da quantização de energia da luz, que levou a conceber a luz como um feixe de quanta de energia, posteriormente chamados de fótons. Como a teoria de Einstein esteve em acordo com os experimentos realizados na época, e a teoria clássica não, ela foi rapidamente adotada pelos físicos.

É bem ilustrado na literatura que esta versão da história do efeito fotoelétrico é grosseiramente simplificada e contém muitos mitos ou erros (Kragh, 1992, 2000). Entre os mitos que geralmente entram na apresentação desta quase-história estão os seguintes: (1) A teoria de Einstein de 1905 se baseou e foi uma extensão natural da teoria de Planck de 1900;

(2) que o trabalho de Einstein foi uma teoria do efeito fotoelétrico; (3) que o núcleo da teoria de Einstein foi uma explicação de experimentos que provaram que a energia cinética dos elétrons dependia linearmente da frequência da luz, mas é independente de sua intensidade; (4) que este fato experimental foi (e é) inexplicável sem a hipótese do fóton; (5) que a explicação de Einstein foi rapidamente aceita, não havendo nenhuma alternativa clássica a ela; e (6) que a verificação final da teoria de Einstein foi proporcionada por Millikan em experimentos de 1916. Como Kragh (1992) discute, **todas essas afirmações são representações equivocadas da história real**. Mas elas são essenciais para o uso que os livros didáticos têm feito da história do efeito fotoelétrico. Sem elas, a história não funcionaria como um meio de educar os estudantes no que é considerado o “método apropriado da Ciência”. Nesta seção os resultados do detalhado estudo histórico que Kragh (1992) realizou sobre este episódio serão utilizados para abordá-lo segundo a perspectiva da IME discutida no capítulo anterior.

5.1.1 Contexto científico da época

É apresentado, a seguir, um recorte (obviamente resumido) do contexto científico no qual o estudo do efeito fotoelétrico se insere na primeira década do século XX. O ponto de partida são os experimentos realizados por Philipp Lenard¹⁰ em 1902. O físico alemão observou empiricamente que a corrente fotoelétrica produzida é proporcional à intensidade da luz incidente, mas independente de seu comprimento de onda. Ele também percebeu que, ao contrário da corrente elétrica, a energia cinética máxima dos elétrons emitidos não depende da intensidade da luz incidente. Esta observação da independência da energia máxima com a intensidade da luz constituía uma anomalia para a Física Clássica? De acordo com a teoria clássica, a intensidade é uma medida da energia da luz. Então, seria esperado, pela conservação da energia, um aumento da energia do elétron quanto maior for a intensidade da luz incidente. A partir disso, livros didáticos costumam apontar que a teoria clássica era incapaz de explicar porque luz de alta intensidade e baixa frequência não era capaz de liberar um único elétron. Mas este argumento é falho. A observação só leva à inconsistência com a teoria clássica se for assumido que esteja ocorrendo transmissão de energia da luz para o elétron. Mas essa consideração não havia sido feita pela maioria dos físicos por volta de 1905.

¹⁰ Lenard foi laureado com o prêmio Nobel de Física de 1905 por suas pesquisas com raios catódicos.

Além disso, já em 1902 Lenard reconheceu que havia uma inconsistência, mas entre (a) a noção clássica da luz, (b) os resultados dos seus experimentos e (c) a hipótese de que o efeito fotoelétrico é um processo de transmissão de energia. Se qualquer uma dessas premissas é descartada, o problema desaparece (Kragh, 1992). São apresentadas, a seguir, as explicações potenciais propostas por Lenard e Einstein para resolver esta questão. Cada uma delas abre mão de uma hipótese distinta para resolver a incoerência entre as três ideias citadas. Veremos então a repercussão dessas explicações, e como elas foram avaliadas pela comunidade científica da época no processo de inferência à melhor explicação daquele contexto.

5.1.2 Explicação potencial 1: hipótese gatilho de Lenard

Lenard concluiu que a premissa (c) estava errada e que o efeito fotoelétrico deveria ser explicado por outro mecanismo. Logicamente, ele poderia também ter dúvida da validade de (a), de (b) ou qualquer combinação das três, mas isto levaria apenas a mais problemas. Pelo conhecimento que se tinha na época, era natural considerar que a hipótese (c) era a mais fraca delas. Como alternativa, Lenard propôs o que ficou conhecido como hipótese “gatilho” (*trigger*). Segundo ela, a distribuição de energia dos elétrons não é determinada pela luz incidente, mas pela estrutura interna dos átomos do cátodo. Adotando um modelo atômico simples, ele assumiu que o átomo fosse constituído de um grande número de elétrons, cada um com uma velocidade e frequência característica. Um raio de luz monocromática incidente poderia, então, disparar (*trigger*) o elétron cuja frequência estava em ressonância com a frequência da luz. Como os elétrons atômicos poderiam ter uma velocidade máxima, a energia máxima do elétron dependeria do metal catódico e da composição espectral da luz, de acordo com as observações. Esta explicação se baseava na crença de fundo de que o efeito fotoelétrico não envolvia trocas de energia e na validade da teoria ondulatória da luz – amplamente aceita na época. Ela também tinha certo suporte e afinidade com as visões correntes sobre a estrutura do átomo. A explicação tinha as virtudes de estar de acordo com a teoria ondulatória vigente na época, estar de acordo com as observações realizadas e não possuir hipóteses *ad hoc*.

5.1.3 Explicação potencial 2: Einstein e o quantum

Um dos, agora, célebres artigos de Einstein de 1905 apresenta sua explicação para o efeito fotoelétrico. Antes de apresentá-la, é pertinente destacar que o artigo de Einstein propôs uma nova abordagem para a luz. Ele considerou que a luz consistia de, ou poderia frutiferamente ser considerada composta de, quanta de luz (Kragh, 1992). Na cuidadosa argumentação teórica dele, o efeito fotoelétrico foi apenas um componente, e não era central. Como apenas três das dezessete páginas do artigo lidavam com o efeito fotoelétrico, é um erro se referir ao artigo como uma “teoria sobre o efeito fotoelétrico”. Ao abordar os três aspectos que geravam inconsistência apontados por Lenard, Einstein optou por rejeitar a hipótese (a) – a noção clássica da luz. Entre as principais crenças de fundo nas quais a explicação de Einstein se baseou estavam as leis de radiação de corpo negro. Mas ele não foi de modo algum uma continuação da lei de Planck de 1900. Ele não parte da “revolucionária” lei de radiação de Planck – retrospectivamente celebrada como o nascimento da teoria quântica –, mas da lei não-quântica de Wilhelm Wien de 1896, que é válida apenas para altas frequências. A razão foi que Einstein, em 1905, acreditava que a teoria de Planck não seria compatível com a ideia do quanta de luz (Kragh, 1992).

O grande ponto controverso, e posteriormente considerado revolucionário, da explicação de Einstein foi atribuir um comportamento corpuscular para a luz incidente no cátodo fotoelétrico. Com isso, Einstein manteve a noção de que o efeito fotoelétrico é um processo de transmissão de energia. A hipótese do quanta de luz com energia $E = h\nu$ foi introduzida teoricamente, e não como a resposta a experimentos. Experimentos desempenharam um papel, mas principalmente como virtudes explicativas para julgar uma ideia que já havia sido introduzida. Ao conceber o efeito fotoelétrico como um processo de troca de energia, Einstein deduziu a famosa equação¹¹ $E_m = h\nu - \mathbf{P}$, onde \mathbf{P} é a função trabalho do metal do cátodo. Esta (agora famosa) equação não existia até então, nem mesmo como uma regra empírica. O trabalho de Einstein não poderia ser uma resposta teórica para uma anomalia experimental simplesmente porque tal anomalia não existia na época. Por conta disso, a dedução de Einstein foi uma **previsão**. Até então não parecia relevante investigar a relação entre a energia máxima dos elétrons emitidos e a frequência da luz incidente, de modo que Lenard e os demais físicos da época não estudaram esta relação.

¹¹ Da próxima seção em diante, esta equação será mencionada como “lei de Einstein”, em concordância com terminologia da seção 2.2.1.

5.1.4 A década de 1900: Lenard vence a disputa

No embate entre as duas explicações, teve grande peso o conservadorismo epistêmico. Em princípio, a teoria de Einstein não foi considerada uma alternativa séria pela comunidade de físicos. A razão não é que Einstein tenha sido um gênio (embora ele fosse) e os outros físicos fossem conservadores abraçados a uma visão de mundo antiga (embora alguns fossem). Os físicos, incluindo Einstein, perceberam que havia um alto preço a pagar para a aceitação da teoria: abandonar a teoria das ondas eletromagnéticas, uma das mais impressionantes e bem-sucedidas teorias da Física. A maioria dos físicos não desejava pagar esse preço, e não ficaram impressionados pela previsão de Einstein. Vale destacar que nos primeiros anos após sua publicação, a previsão de Einstein ainda não possuía suporte experimental. E mesmo se ela tivesse sido verificada, isto poderia não contar como um “experimento crucial” (Raicik & Peduzzi, 2017). Embora uma dependência linear de E_m com v não siga da hipótese gatilho de Lenard, também não a contradiz.

A radicalidade da teoria de Einstein ser incompatível com a bem-estabelecida teoria ondulatória da luz fez a maioria dos físicos ignorá-la, ou criticá-la como especulativa e mal fundamentada. A (frequentemente citada) avaliação de Planck na qual ele, junto com Nernst, Rubens e Warbug, propõe que Einstein se torne membro da academia prussiana em 1913 exemplifica a atitude geral: “que ele [Einstein] possa às vezes ter errado o alvo nas suas especulações, como, por exemplo, em sua hipótese dos quanta de luz, não pode realmente ser usada demais contra ele, já que não é possível introduzir ideias realmente novas nas Ciências mais exatas sem às vezes correr um risco” (Kirsten & Körber, 1975, como citado em Kragh, 1992, p. 355, nossa tradução). A hipótese gatilho de Lenard foi a mais aceita pela grande maioria dos físicos, sendo considerada a melhor explicação naquele contexto. Isto também implicou não considerar o efeito fotoelétrico incompatível com a teoria clássica da luz. A opinião de Rudolf Ladenburg, em 1909, de que a hipótese de Lenard pertencia às “verdades amplamente aceitas da Física” foi muito compartilhada por certo tempo (Kragh, 1992).

5.1.5 A década de 1910: teoria versus lei

Como a hipótese gatilho venceu os primeiros anos do debate, os primeiros experimentos sistemáticos para achar uma relação entre a energia máxima do elétron e a frequência da onda incidente não foram conduzidos para testar a lei de Einstein, mas ocorreram segundo o quadro da teoria de Lenard. Levou cerca de 10 anos, de 1906 a 1916, para se chegar à conclusão de que energia e frequência são de fato relacionadas como Einstein previu. Por muitos anos, os dados experimentais mostraram uma disparidade confusa que não podia ser tomada como suporte para a lei de Einstein. Muitos físicos experimentais (e.g., Erich Ladenburg, Abraham Joffé, Frederick A. Lindemann, Arthur L. Hughes, Karl Compton e Peter Pringsheim) obtiveram resultados diversos ao medir a relação entre E_m e ν . Foi apenas com a famosa série de experimentos de Robert Millikan, em 1916, que consenso foi obtido e a lei de Einstein foi definitivamente adotada.

No entanto, todos esses experimentos, incluindo os de Millikan, foram fenomenológicos. Eles buscavam estabelecer a curva correta (E_m, ν), e não a teoria correta. Os experimentos de Millikan **não** foram uma confirmação da **teoria** de Einstein. A confirmação de uma lei (equação) não pode ser identificada com a confirmação de uma teoria. Além disso, o que é mais importante nesse contexto, Millikan não defendia a aceitação da teoria quântica da luz. Pelo contrário, como Richardson e Compton tinham feito em 1913 e Hughes em 1914, Millikan utilizou a oportunidade para descartar a “hipótese ousada, para não dizer irresponsável, de Einstein”, que felizmente “agora [tem] sido amplamente abandonada” (Millikan, 1916, p. 355, nossa tradução). Em 1917, no seu livro *The Electron*, ele reafirmou que a explicação de Einstein do efeito fotoelétrico em termos do quanta de luz era “insustentável” e “errada” (1917). Na época, a maior parte dos físicos estava de acordo.

A hipótese do gatilho foi se tornando gradualmente desacreditada e desapareceu por volta de 1912. No entanto, a razão não é que a alternativa de Einstein a superou, o que só ocorreu muito tempo depois. E ela também não foi refutada diretamente, porque a teoria vaga e qualitativa de Lenard não era facilmente refutável. A hipótese do gatilho foi abandonada por que os experimentos indicaram que a ideia da luz ativar a matéria sem trocas de energia não era sustentável. No entanto, o abandono da hipótese de Lenard não implicou a aceitação da teoria de Einstein. Existiam muitos modos não-Einstenianos de explicar os efeitos fotoelétricos (i.e. sem fóton), e por um tempo eles foram considerados mais promissores que a alternativa radical de Einstein. Os advogados de tais teorias clássicas, ou semi-clássicas, incluíram físicos proeminentes como J. J. Thomson, Arnold Sommerfeld, H. A. Lorentz, Pieter Debye e Max Planck. As teorias clássicas para o efeito fotoelétrico de Sommerfeld,

Planck e Thomson incluíam uma relação linear entre E_m e v . Outro a fazer isso foi Owen Richardson, que inclusive propôs em 1912 uma teoria para o efeito fotoelétrico a partir da qual ele deduziu exatamente a mesma equação que Einstein tinha obtido em 1905. Essas teorias não serão aprofundadas aqui, mas todas elas concebiam o efeito fotoelétrico como um tipo de fenômeno de ressonância, onde movimentos próprios dos elétrons atômicos eram liberados por uma onda de luz incidente. Essas teorias focaram na estrutura atômica como a chave para entender o efeito fotoelétrico, e consideravam que a energia cinética dos elétrons não era transferida a partir da luz, mas era pré-existente dentro dos átomos. Por conta disso, elas estavam inseridas na tradição de Lenard (Kragh, 1992).

Como essas interpretações não-Einstenianas mostram, foi perfeitamente possível derivar a **lei** de Einstein sem usar a **teoria** de Einstein. Em geral é importante distinguir teorias de equações (leis), entre outras razões, porque é usualmente a lei que é testada empiricamente, e não a teoria. Se a mesma lei pode ser obtida a partir de diferentes teorias, concordar com as medidas não significa que qualquer uma das teorias em particular seja confirmada. Este é um exemplo da tese discutida na seção 4.1 de que **as teorias não são determinadas pelas evidências observacionais disponíveis**. Quando surgiu evidência experimental de uma relação linear por volta de 1912, Richardson notou com satisfação que uma confirmação da lei de Einstein não significa uma confirmação da “restritiva e duvidosa hipótese utilizada por Einstein” (Stuewer, 1970, p. 259, nossa tradução).

5.1.6 Quando a hipótese de Einstein é aceita

Por várias razões, especialmente pela aceitação do modelo quântico do átomo de Bohr, as teorias não Einstenianas foram sendo abandonadas a partir de 1914, o que deixou a teoria de Einstein como a única a oferecer uma explicação para o efeito fotoelétrico. Em tal situação a atitude racional a se tomar, ao que parece, seria aceitar a teoria de Einstein – porque uma teoria controversa parece melhor do que nenhuma teoria. Mas não foi isso o que aconteceu. Durante o período de 1914 até por volta de 1922, físicos estavam bem dispostos a seguir sem uma explicação teórica para o efeito fotoelétrico. A estratégia preferida foi aceitar a lei de Einstein, mas considerá-la uma lei fenomenológica, e não a consequência da teoria de Einstein do quanta de luz (Kragh, 1992).

Ainda em 1923, Millikan não tinha aceitado a hipótese do quantum de luz. Ao se pronunciar naquele ano, ele cuidadosamente distinguiu entre a teoria de Einstein e sua lei, afirmando que apenas a última tinha sido experimentalmente provada. Tanto quanto ele soubesse, o efeito fotoelétrico ainda não havia recebido uma explicação teórica (Millikan, 1917). Essa atitude cautelosa mudou logo depois, quando a teoria de Einstein e o conceito de fóton se tornaram partes autorizadas da Física Quântica. A partir daí, Millikan se tornou celebrado como aquele que tinha descoberto experimentalmente o que Einstein havia teorizado (o fóton), e muito rapidamente o mito foi estabelecido de que os experimentos de Millikan confirmaram a teoria de Einstein. Millikan pareceu acreditar ele mesmo no mito e esquecer sobre sua resistência inicial contra o fóton. Por exemplo, em sua autobiografia de 1950 ele afirmou que já em 1915 ele havia percebido que os seus experimentos “simplesmente e irrefutavelmente” provaram a verdade da teoria de Einstein do quanta de luz (Millikan, 1950). Partindo da própria caneta de Millikan, não é surpresa que o mito tenha sido repetido posteriormente em livros didáticos e muitos textos “históricos”.

5.1.7 Síntese do episódio

Acaba aqui a discussão do primeiro episódio histórico abordado neste estudo II. Entre os aspectos da NdC que ele é frutífero para discutir, destaca-se: o importante e complexo papel da comunidade científica para a aceitação de um conhecimento científico; indeterminação das teorias científicas pelas evidências disponíveis; problematizar a quase-história sobre este episódio presente em livros didáticos e materiais instrucionais; e a importância epistêmica de distinguir uma lei de uma teoria. O quadro 3, a seguir, sintetiza a abordagem deste episódio.

Episódio	Efeito fotoelétrico
Contexto científico	Descoberta do efeito fotoelétrico e experimentos de Lenard.
Explicação potencial 1	Teoria corpuscular da luz de Einstein.
Explicação potencial 2	Hipótese gatilho de Lenard.

Crenças de fundo da explicação 1	<ul style="list-style-type: none"> • Efeito fotoelétrico envolve transmissão de energia; • Concepção corpuscular da luz.
Crenças de fundo da explicação 2	<ul style="list-style-type: none"> • Validade da teoria eletromagnética clássica; • Caráter ondulatório da luz; • Efeito fotoelétrico não envolve transmissão de energia.
Virtudes explicativas	<ul style="list-style-type: none"> • Conservadorismo epistêmico; • Coerência entre explicações, experimentos e crenças de fundo aceitas.
NdC	<ul style="list-style-type: none"> • Distinguir lei de teoria; • Papel social e coletivo da produção de conhecimento científico; • Problematizar quase-história presente em livros didáticos; • Indeterminação das teorias científicas pelas evidências disponíveis.

Quadro 3 – Síntese do episódio de IME sobre a explicação do efeito fotoelétrico.

5.2 Episódio 2: Planck e a Quantização da Energia

Esta seção consiste em uma segunda ilustração da abordagem de episódios da história da Ciência segundo a IME. No entanto, a abordagem deste episódio será distinta da anterior. O foco deste episódio não é o confronto entre duas explicações científicas inseridas em um contexto científico particular. Em vez disso, são confrontadas duas narrativas concorrentes, que podem ser encontradas na literatura sobre a história utilizada para abordar o nascimento da teoria quântica.

Sobre a adequação de aplicar a Inferência à Melhor **Explicação** a **narrativas**, há discussões na literatura sobre as semelhanças e diferenças entre narrativas e explicações (e.g., Norris et al., 2005; Rodrigues & Pereira, 2018). Em seu livro clássico sobre filosofia da

Ciência, Ernest Nagel (1961) aponta as “explicações genéticas” como um tipo de explicação, correspondente a histórias que resultem no evento a ser explicado. Para o autor, “a tarefa das explicações genéticas é estabelecer as sequências dos principais eventos através dos quais algum sistema anterior se transforma em um posterior” (Nagel, 1961, p. 25, nossa tradução). Já Norris *et al.* (2005), ao compararem explicações e narrativas, observam que uma narrativa busca por instigar no leitor a vontade de conhecer o desfecho de uma história **particular**, enquanto que o principal objetivo de uma explicação na Ciência é apresentar **regularidades generalizáveis** para certo conjunto de situações. Com base nesses e em outros argumentos, Rodrigues e Pereira (2018) concluem que narrativas desempenham um papel importante na explicação de eventos únicos (como a extinção dos dinossauros ou o Big Bang). Por outro lado, o papel de narrativas na explicação científica se torna limitado quando a Ciência busca por generalidade e não por particularidades. Assim, entende-se que narrativas, como as que seguem, possam ser abordadas como explicações sobre um evento único (o surgimento da teoria quântica). Dessa forma, o episódio a seguir será abordado como um caso de Inferência à Melhor Explicação, mesmo que envolva narrativas.

Muitos aspectos podem ser discutidos com base em um episódio histórico tão rico quanto este. No entanto, vamos nos restringir a abordar especificamente as seguintes questões: quando a teoria quântica “nasceu”? E quem é o “pai” dessa teoria? Como será visto, estas questões serão utilizadas para problematizar aspectos relacionados ao uso da história da Ciência.

“A teoria quântica, em sua primeira formulação, deve sua origem à inabilidade da Física Clássica em lidar com a distribuição de energia experimentalmente observada no espectro contínuo da radiação de corpo negro” (Jammer, 1966, p. 1, nossa tradução). É dessa forma que o surgimento da Física Quântica é introduzido em muitos textos didáticos. O principal objetivo desta subseção é utilizar o episódio histórico do surgimento da ideia de quantização, introduzida por Planck¹² no começo do século XX, para problematizar aspectos do uso da história da Ciência no ensino de Física. Para isso, começamos com uma breve, resumida e simplificada introdução sobre o contexto da Física do final do século XIX. Na seção seguinte, é apresentado um exemplo de como a interpretação “padrão” aborda a introdução do conceito de quantum por Planck, segundo a qual o trabalho de Planck foi, basicamente, um procedimento matemático com o objetivo de interpolar a lei de Wien com a

¹² Planck foi laureado com o prêmio Nobel de física de 1918 pela sua “descoberta do quanta de energia”.

lei de Rayleigh-Jeans. O texto utilizado como base para representar este ponto de vista é o primeiro capítulo do influente livro “*The Conceptual Development of Quantum Mechanics*”, de Max Jammer¹³ (1966). Em seguida, é apresentada a interpretação alternativa que Thomas Kuhn¹⁴ (1978) oferece para este episódio, acrescida de comentários do historiador da Ciência dinamarquês Helge Kragh (2000). Esta interpretação, como veremos, aponta a fragilidade de considerar, anacronicamente, os trabalhos de Planck de 1900 como o nascimento da ideia de quantum. O confronto entre as duas visões é utilizado para discutir tentativas de identificar um autor individual e/ou uma data específica como origem de um conhecimento científico.

5.2.1 Contexto científico anterior

Começamos apresentando resumidamente o contexto histórico que antecedeu os trabalhos de Planck de 1900. Naquela época, a universalidade da mecânica newtoniana estava sendo confrontada com avanços recentes do eletromagnetismo e da termodinâmica. Para o eletromagnetismo, um problema fundamental era a relação entre mecânica e eletrodinâmica, ou entre a matéria e o éter hipotético. Enquanto isso, especialistas em termodinâmica investigavam a relação entre as leis da mecânica e as duas leis básicas do calor – o princípio da conservação da energia e a segunda lei da termodinâmica. Esta segunda discussão analisava o status da Física Estatística Molecular, abordando a questão fundamental de a matéria ser composta por átomos (Kragh, 2000). Uma descrição profética dos problemas levantados naquela época foi dada por Lord Kelvin em palestra de 27 de abril de 1900 na *Royal Institution*, em Londres. Ele disse:

“A beleza e clareza da teoria dinâmica, que afirma que calor e luz são modos de movimento, é no presente obscurecido por duas nuvens. A primeira ... envolve a questão de como a Terra pode se mover através de um sólido elástico, como é essencialmente o éter luminífero? A segunda é a doutrina da partição da energia de Maxwell-Boltzmann” (Royal Institution, 1902, p. 1, nossa tradução).

Embora as duas discussões tenham muito em comum, foi particularmente a partir da segunda que a teoria quântica emergiu (Kragh, 2000). É de particular interesse para este episódio as teorias propostas para entender a emissão de radiação por um corpo-negro. Vamos

¹³ Jammer foi um físico e filósofo da ciência israelense. O livro adotado consiste em uma abordagem histórica do desenvolvimento conceitual da teoria quântica.

¹⁴ Kuhn foi um físico, filósofo e historiador da ciência estadunidense. Ele se tornou conhecido pelo livro célebre “A estrutura das revoluções científicas” (T. Kuhn, 1998), onde introduz a ideia de *paradigma científico*.

começar nossa abordagem em 1879, quando Stefan chegou à lei da quarta potência que leva seu nome, a partir dos resultados experimentais de diversos cientistas. Esta equação estabelece que a energia emitida por um corpo negro é proporcional à quarta potência da temperatura em que ele se encontra ($E = \sigma T^4$). Uma prova teórica foi promovida por Boltzmann em 1884, tornando a equação conhecida como lei de Stefan-Boltzmann (Jammer, 1966). No entanto, nem a lei de Stefan nem a derivação dela de Boltzmann deu atenção para a distribuição espectral da radiação, ou seja, como a quantidade de energia emitida se distribui entre diferentes frequências. Em 1893 Wilhelm Wien fez o cálculo desta distribuição por meio do efeito doppler, chegando à celebre lei do deslocamento de Wien [$E_\lambda = \lambda^{-5} \varphi(\lambda T)$]¹⁵. A lei do deslocamento de Wien mostrava que: dada a distribuição espectral da radiação de um corpo-negro para uma temperatura, a distribuição para qualquer outra temperatura poderia ser deduzida. Outra conclusão imediata da lei do deslocamento é a relação $\lambda_{\max} T = b$, onde b é uma constante. Ela significa que o comprimento de onda λ_{\max} – para o qual E_λ tem seu valor máximo – é inversamente proporcional à temperatura T (relação confirmada empiricamente logo em seguida) (Jammer, 1966).

Àquela altura, o problema de explicar a distribuição empírica das curvas de E_λ pareceu estar quase resolvido, sendo reduzido a explicar uma única função $\varphi(\lambda T)$. Foi rapidamente entendido, no entanto, que – ao contrário das numerosas constantes físicas e funções encontradas na termodinâmica, eletromagnetismo, etc, cujos valores pareciam expressar propriedades mais ou menos acidentais da matéria – a independência da função $\varphi(\lambda T)$ das propriedades particulares das substâncias representava um problema envolvendo questões fundamentais. Como veremos na sequência, uma interpretação possível, ao se analisar a história *a posteriori*, pode considerar que a inabilidade dos físicos do século XIX em abordar a função experimentalmente estabelecida para $\varphi(\lambda T)$ propiciou o colapso da Mecânica Clássica (Jammer, 1966). Naquela época, no entanto, tentativas desesperadas foram feitas para explicar os dados empíricos.

Aqui entra em ação nosso personagem principal: Marx Karl Ernst Ludwig Planck. Nascido em 1858 e filho de um professor de jurisprudência, Planck foi nomeado professor de Física na universidade de Berlim em 1889. A tese de doutorado dele – pela Universidade de Munique em 1879, aos 21 anos – lidou com a segunda lei da termodinâmica, que também foi o foco da maior parte do seu trabalho até cerca de 1905. O trabalho de Planck se concentrou

¹⁵ Wien recebeu em 1911 o Prêmio Nobel de física por seu trabalho sobre a radiação do calor.

no conceito de entropia, e em utilizar a versão da segunda lei da termodinâmica formulada em termos deste conceito, para entender a reversibilidade de processos físicos (Kragh, 2000). Na década de 1890, o debate sobre a segunda lei era centrado na interpretação estatística (ou probabilística) que Ludwig Boltzmann tinha proposto em 1872 e expandido em 1877. A teoria de Boltzmann, que pressupõe a existência de átomos e moléculas, foi desafiada por William Oswald e outros “energicistas”, que desejavam libertar a Física da noção de átomos, e baseá-la em Energia e quantidades relativas. É curioso notar que, devido à sua crença na validade absoluta da segunda lei, Planck não apenas rejeitou a versão estatística de Boltzmann da termodinâmica, mas também duvidou da hipótese atômica na qual ela se baseava (Kragh, 2000).

Àquela altura, a lei de Wien parecia dar uma explicação adequada para todos os dados experimentais disponíveis, apesar de se basear em argumentos questionáveis. Experimentos realizados por físicos como Paschen e Wanner confirmaram a lei, ao menos para a região visível, para temperaturas abaixo de 4000°C (Jammer, 1966). Planck chegou a uma derivação mais rigorosa da lei de Wien – baseada nos escritos de Clausius sobre termodinâmica –, em uma série de artigos apresentados à Academia de Ciências de Berlim entre os anos de 1897 a 1899 (Jammer, 1966). O elemento básico da derivação de Wien era a distribuição de velocidades de Maxwell-Boltzmann que, de acordo com a teoria cinética dos gases, caracteriza o equilíbrio alcançado por processos irreversíveis, a partir de condições iniciais arbitrárias. Como a radiação de cavidade é um processo relacionado ao eletromagnetismo, em vez da teoria cinética dos gases, Planck decidiu que ele poderia fazer para a teoria de Maxwell do campo eletromagnético o mesmo que Boltzmann tinha feito para a mecânica com seu famoso, embora ainda disputado, teorema H. Planck tentou então provar que as equações de Maxwell-Hertz, se aplicadas aos ressoadores com condições iniciais arbitrárias, determinariam o espectro de energia da radiação de corpo-negro. Em resumo, o que Planck parecia ter em mente para esta interpretação é uma tradução do raciocínio que levou à distribuição de velocidade de Maxwell-Boltzmann da teoria cinética, aplicada à estrutura conceitual da teoria eletromagnética (Jammer, 1966).

Antes da virada do século, no entanto, a irrestrita validade da lei de radiação de Wien foi seriamente desafiada. Lummer e Pringsheim fizeram medidas sistemáticas para frequências menores (no intervalo de 12 a 18 μm), segundo as quais os autores concluíram que: “foi demonstrado que a radiação de corpo-negro não é representada, no intervalo de comprimentos de onda medido por nós, pela equação espectral de Wien-Planck” (Lummer &

Pringsheim, 1900, citado por Jammer, 1966, p. 16, nossa tradução). Enquanto isso, Lord Rayleigh, em um artigo de duas páginas publicado em junho de 1900, mostrou que o teorema da equipartição da mecânica estatística, se aplicado às vibrações eletromagnéticas da radiação de cavidade, leva necessariamente para uma fórmula radicalmente diferente da lei de Wien. Rayleigh, um especialista no tratamento de ondas estacionárias, obteve para a densidade de energia por unidade de comprimento de onda (considerando a correção subsequente de Jeans) $u_\lambda = 8\pi kT/\lambda^4$, ou equivalentemente $u_\nu = 8\pi\nu^2 kT/c^3$, onde k é a constante de Boltzmann introduzida por Planck. Esta fórmula, a lei de radiação de Rayleigh-Jeans, concordava, em geral, com a lei do deslocamento de Wien. Ela também concordava com todo o dado experimental na região de frequências extremamente baixas, onde a lei de Wien falhava. No entanto, parecia claro que a equação estava errada para frequências altas. Ela não atribuía nenhum máximo para u_ν , contrariando a experiência, e deixava – em vista do aumento ilimitado para frequências maiores – uma integral divergente para a densidade de energia total u , uma situação que foi chamada bem depois por Ehrenfest (1911) de “catástrofe do ultra-violeta” (Jammer, 1966).

5.2.2 A interpretação “padrão”

A partir de agora são apresentadas as “explicações potenciais” sobre a sequência histórica de eventos que levou à hipótese do quantum de Planck. A primeira explicação é conhecida como interpretação “padrão”. Ela começa destacando a incapacidade das principais teorias existentes – a Lei de Wien-Planck e a Lei de Rayleigh-Jeans – em explicar os resultados experimentais obtidos para os limites superior e inferior das frequências do espectro de emissão de corpo-negro. Uma série de medidas realizadas por Rubens e Kurlbaum tinha estabelecido que para baixas frequências (ν) e altas temperaturas (T) a densidade de energia (u) era proporcional à temperatura, como requerido pela lei de Rayleigh-Jeans, e em contraste à lei de Wien. Poucos dias antes de apresentar seus resultados para a Academia de Berlin, que seria convocada em outubro de 1900, Rubens e Kurlbaum relataram suas observações para Planck. Convencido da inadequação da lei de radiação de Wien, Planck percebeu que o raciocínio que o levou à fórmula de Wien precisava ser revisto. Uma nova equação era necessária, que concordasse com a expressão de Wien para ν grande e T pequeno, mas que se reduzisse a uma proporcionalidade de u_ν com T para ν pequeno e T grande. Segundo a interpretação “padrão”, proposta por Jammer (1966), é dessa interpolação

matemática que nasce a lei de radiação de Planck, que posteriormente vai ser apontada como marco do nascimento da teoria quântica. Nas palavras desse autor:

essa interpolação foi, apesar de um mero truque matemático, uma das contribuições mais significantes e monumentais já feitas na história da Física. Ela não só levou Planck, na busca por sua corroboração lógica, para a proposta de seu quantum de ação elementar e, assim, iniciou o primeiro desenvolvimento da teoria quântica, como veremos; mas também continha certas implicações que, quando reconhecidas por Einstein, afetaram decisivamente as próprias fundações da Física e suas pressuposições epistemológicas. Nunca na história da Física houve uma interpolação matemática tão singela e com consequências físicas e filosóficas de alcance tão amplo (Jammer, 1966, p. 18, nossa tradução).

Planck, tentando integrar sua teoria com a experiência, interpolou as expressões para as derivadas parciais de primeira e segunda ordem da entropia (**S**) com relação à energia média (**U**):

$$\partial^2 S / \partial U^2 = \text{constante} / U,$$

que leva à lei de radiação de Wien, e

$$\partial^2 S / \partial U^2 = \text{constante} / U^2,$$

que leva à fórmula de Rayleigh-Jeans, a equação resultante

$$\partial^2 S / \partial U^2 = A / [U(B + U)],$$

levou ele a obter a sua lei de radiação:

$$U_\lambda = C \lambda^{-5} / [e^{(c/\lambda T)} - 1], \text{ e}$$

$$U_\nu = A \nu^3 / [e^{(B\nu/T)} - 1],$$

onde **A**, **B** e **C** são constantes. Planck obteve este resultado a tempo de preparar um comentário estendido para seguir o relatório de Kurbaum para a sociedade de Física alemã, que se encontrou em 19 de outubro de 1900. Neste “comentário”, publicado com o título “sobre um aprimoramento na lei de radiação de Wien” (nossa tradução), Planck apresentou essas equações, que posteriormente ficaram conhecidas como “lei de radiação de Planck”. Segundo a interpretação “padrão”, esta era uma **fórmula empírica**, uma vez que suas considerações básicas não possuíam justificção teórica rigorosa. No entanto, esta parecia ser uma equação correta. Rubens, que durante a noite seguinte à sessão da academia checkou novamente seus resultados experimentais, observou uma concordância completa, assim como

fizeram Lummer e Pringsheim pouco tempo depois. Para mudar o status da equação de um chute de sorte para o de uma afirmação com significado físico real, Planck achou necessário abandonar sua abordagem termodinâmica, e se virar para a concepção probabilística de Boltzmann de entropia (Jammer, 1966).

A derivação de Planck consiste de duas partes separadas: a primeira é a derivação da relação entre a densidade de energia radiativa u_ν e a energia do oscilador U . Esta é uma fórmula que Planck obteve usando exclusivamente os princípios da Eletrodinâmica Clássica. A segunda parte é um tratamento estatístico da interação entre osciladores de frequências diferentes. Foi ao combinar as duas que Planck obteve sua lei de radiação. Em 1906, no entanto, Einstein identificou que o raciocínio de Planck era inconsistente. Embora cada parte da derivação de Planck fosse internamente consistente, a combinação delas era logicamente incompatível. A razão era a seguinte: a parte eletrodinâmica (1) é baseada na teoria de Maxwell e na consideração de que a energia do oscilador é uma quantidade continuamente variável, enquanto que, na parte estatística (2), a mesma energia é tratada como uma quantidade discreta, capaz de assumir apenas valores que são múltiplos de $h\nu$ (sendo ν a frequência do oscilador e h a constante de Planck). Ao se referir a essa inconsistência, Einstein notou que: “se a energia de um ressoador pode apenas mudar de forma não contínua, a teoria usual da eletricidade não pode ser aplicada para o cálculo da energia média de tal ressoador em um campo de radiação” (Einstein, 1906, como citado em Jammer, 1966, p. 26, nossa tradução). Para Einstein, essa inconsistência não era razão para rejeitar a teoria quântica de Planck como um todo. Tendo proposto recentemente suas ideias com respeito ao quantum de luz, Einstein viu nesta inconsistência um indicador de que eram os fundamentos da teoria tradicional da radiação, baseados na teoria eletromagnética de Maxwell, que precisavam ser revisados.

Kragh (2000) resume esta história “padrão” como segue:

a teoria quântica surgiu quando se percebeu que a Física Clássica previa uma distribuição de energia para a radiação de corpo negro que discordava violentamente dos achados experimentais. Então, no fim da década de 1890, a história continua, o físico alemão Wilhelm Wien desenvolveu uma expressão que correspondia razoavelmente bem com o resultado experimental, mas que não tinha fundamentação teórica. Quando Lord Rayleigh e James Jeans analisaram, então, a radiação de corpo negro na perspectiva da Física Clássica, o espectro resultante diferiu drasticamente, tanto do experimento quanto da lei de Wien. Deparado com essa grande anomalia, Max Planck buscou por uma solução, durante o curso pelo qual foi forçado a introduzir a noção de quanta de energia. Com a hipótese do quantum, uma ligação

perfeita entre teoria e experimento foi obtida, voila! A teoria quântica nasceu. (p. 31, nossa tradução).

Segundo esta interpretação “padrão”, Planck, supostamente, introduziu no final de 1900 o conceito de um oscilador elétrico linear com energia restrita a números inteiros do quantum de energia $h\nu$. Ele teria descoberto que restringir os níveis de energia para uma distribuição descontínua era essencial para a derivação da lei de radiação de corpo negro que ele tinha acabado de introduzir. Resumidamente, essa interpretação considera que Planck adotou a hipótese da quantização como um ato de “desespero” para resolver um problema matemático.

5.2.3 Interpretação alternativa

Embora esta interpretação “padrão” seja muito difundida em textos didáticos, ela tem sido desafiada por historiadores da Ciência nas últimas décadas. Kragh aponta que “a história é um mito, mais próximo de um conto de fadas do que de uma verdade histórica. A teoria quântica não deve suas origens a qualquer falha da Física Clássica, mas aos insights profundos de Planck sobre termodinâmica” (2000, p. 31, nossa tradução). Entre os principais críticos desta interpretação “padrão” está Thomas Kuhn, um dos precursores da área da sociologia da Ciência. É de interesse para este trabalho seu livro de 1978 (*Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912*), no qual é abordado como Planck criou sua teoria sobre a radiação de corpo negro – além de seu estudo sobre o calor específico de sólidos, entre 1894 e 1912. Um resultado notável deste trabalho é reinterpretar os pensamentos de Planck e sua transformação gradual, que serão abordados (resumidamente) nesta seção.

Segundo a reinterpretação de Kuhn, que analisou cuidadosamente o caminho de Planck para a lei da radiação de corpo negro e seus desdobramentos, esse desenvolvimento começou em 1894. Planck tentou aplicar para a radiação eletromagnética uma formulação da segunda lei da termodinâmica, que ele introduziu originalmente na sua tese de doutorado¹⁶. A abordagem era muito próxima à que Boltzmann desenvolveu para gases em 1872. Planck buscava a probabilidade W das formas de distribuir a energia da cavidade do corpo-negro entre os osciladores de sua superfície. O logaritmo dessa função W seria proporcional à

¹⁶ Indicamos ao leitor interessado nos detalhes matemáticos deste episódio a leitura de Kuhn (1978).

entropia¹⁷. Ele descobriu uma fórmula combinatória adequada provavelmente em um artigo de Boltzmann de 1877 que se sabe que ele leu. Dessa forma, vale à pena detalhar parte da derivação de Boltzmann para a lei de distribuição da teoria cinética dos gases. Com isso, será possível entender com mais profundidade os detalhes conceituais dos trabalhos de Planck.

Em resumo, Boltzmann analisou os modos de distribuir a energia total E em um gás consistindo de N moléculas. Para esse propósito, ele começou dividindo a energia total em P células de tamanho ϵ , de modo que $P\epsilon = E$. Depois de dividir a energia total, ele distribuiu aleatoriamente as N moléculas do gás nessas células. Dependendo dos valores de P e N , pode haver um grande número de formas de distribuir as moléculas nessas células de energia. A grande questão é: qual a probabilidade de cada uma dessas distribuições possíveis ocorrer? A resposta é obtida por meio de um conjunto de integrais $w_1, w_2, w_3, \dots, w_P$. Fazendo o cálculo, Boltzmann chegou à atual resposta padrão:

$$W = N! / w_1! w_2! \dots w_P! .$$

O número resultante desse cálculo é proporcional à probabilidade da distribuição correspondente. A distribuição de equilíbrio é aquela de maior probabilidade, e o logaritmo da sua probabilidade é proporcional à entropia do gás naquele estado. Além disso, Boltzmann também notou que o número total de modos de alcançar todas as distribuições possíveis de N moléculas em P células é $(N + P - 1)! / (N-1)! P!$, a fórmula exata que a derivação de Planck requer. Para encontrar W , Planck tinha que ser capaz de contar o número de modos que a energia da cavidade do corpo negro podia ser distribuída entre um conjunto de osciladores. Foi pela necessidade de achar esse procedimento matemático que Planck, inspirado por Boltzmann, introduziu o que ele chamou de “elementos de energia”, a consideração de que a energia total dos osciladores de corpo negro é dividida em porções finitas de energia $\epsilon = h\nu$. Em seu artigo seminal, publicado no final de 1900 e apresentado para a sociedade alemã de físicos em 14 de dezembro, Planck apontou a energia “como sendo feita de um número completamente determinado de partes finitas iguais, e que para esse propósito ele usa a constante da natureza h igual $6,55 \times 10^{-27}$ erg seg” (Planck, 1900, como citado em Kragh, 2000, p. 33, nossa tradução). Além disso, “essa constante, quando multiplicada pela

¹⁷ Foi em 1906 que Planck enunciou pela primeira vez o que desde então ficou conhecida como a equação de Boltzmann ($S = k \log W$), que relaciona a entropia, S , à desordem molecular W (Kragh, 2000).

frequência comum dos osciladores, dá os elementos de energia ϵ , em ergues¹⁸. E pela divisão da energia total (E) por ϵ , nós conseguimos o número P de elementos de energia para serem distribuídos entre os N ressoadores”. (Planck, 1900, como citado em Kragh, 2000, p. 33, nossa tradução). A grande diferença entre o problema de Boltzmann e o problema de Planck é que o tamanho da célula ϵ era irrelevante para os cálculos de Boltzmann, enquanto que h necessitava ter um valor específico para os cálculos de Planck (Kuhn, 1984).

Dessa forma, a derivação de Planck se baseou na de Boltzmann. Mas os problemas deles não são os mesmos, e Kuhn (1978) aponta duas formas diferentes por meio das quais a modelagem de Planck poderia ser alcançada. A interpretação “padrão” considera que Planck estava procurando pelo modo mais provável de distribuir a energia E em N ressoadores, todos à mesma frequência. A lei de distribuição dele pode ser derivada dessa forma. Lorentz fez isso em 1910, e Planck adotou esta derivação em 1913. Ela se tornou padrão desde então, um fato que favoreceu a interpretação “padrão”. No entanto, apesar de esse método implicar a quantização, sua derivação não faz sentido com respeito aos problemas enfrentados por Planck entre 1900 e 1906. A segunda forma de relacionar o problema de Planck com o de Boltzmann torna a derivação compreensível dentro do contexto no qual ela foi feita, mas elimina a aparência da quantização (Kuhn, 1978).

Boltzmann considerou todas as moléculas do gás dele. Planck considerou todos os ressoadores da cavidade dele: N com frequência ν , N' com frequência ν' , N'' com frequência ν'' , e assim por diante. Para o primeiro conjunto ele atribuiu energia E , para o segundo energia E' , para o terceiro energia E'' , e assim por diante de novo. A soma de todas essas energias era fixada pelo valor da energia total E_t . Uma distribuição era uma divisão particular de E_t entre os ressoadores em cada frequência, e foi a divisão da energia entre frequências particulares que Planck variou, para maximizar a entropia do sistema como um todo. Esta interpretação da derivação de Planck se adequa bem aos textos históricos, e também modela o problema que Planck tentava responder: a distribuição de energia sobre conjuntos de ressoadores a diferentes frequências, e não sobre ressoadores a uma frequência específica. Infelizmente, o problema formulado dessa forma é muito incômodo, e Planck adotou um atalho drástico para alcançar uma solução. Esse atalho, mencionado nos primeiros artigos

¹⁸ O erg é a unidade de energia ou de trabalho no sistema de unidades centímetro-grama-segundo (CGS). 1 erg = 10^{-7} J.

dele, mas explicado apenas em suas “*lecture of the theory of thermal radiation*” de 1906¹⁹, é o que torna os primeiros artigos da derivação dele tão difíceis de entender (Kuhn, 1978).

Se uma revolução ocorreu na Física em dezembro de 1900, na época ninguém parece ter notado (Kragh, 2000). Planck não foi exceção, e a importância associada ao trabalho dele é principalmente uma reconstrução histórica. Embora a lei de radiação de Planck tenha sido rapidamente aceita, depois de inúmeros testes experimentais, sua novidade conceitual baseada na quantização da energia foi desconsiderada. Resumidamente, pode-se dizer que a introdução de h por Planck parece ter sido considerada na época como um dispositivo metodológico, sem significado físico profundo. Muito poucos físicos expressaram qualquer interesse na justificação da fórmula de Planck, e durante os primeiros anos do século XX ninguém considerou o resultado dele conflitante com os fundamentos da Física Clássica.

Quanto ao próprio Planck, ele lutou bravamente para manter a teoria dele no solo sólido da Física Clássica. Quanto à descontinuidade quântica – enfim o elemento crucial de que a energia não varia continuamente, mas em “pulos” – “ele acreditou por um longo tempo que esta era apenas uma hipótese matemática, um artefato que não se referia a trocas reais de energia entre matéria e radiação” (Kragh, 2000, p.33, nossa tradução). Do ponto de vista dele, não havia razão para suspeitar de uma quebra das leis da mecânica clássica e eletrodinâmica. Utilizando a terminologia de Kuhn (1998), é possível considerar que Planck e seus contemporâneos acreditavam estar fazendo Ciência “normal”, e não Ciência “extraordinária”. Isto é ilustrado pelo “silêncio” de Planck após a publicação de seus artigos iniciais de 1900 e 1901. Depois deles, Planck ficou até 1906 sem publicar nada sobre a radiação de corpo negro, quando publicou sua *lecture*.

5.2.4 Quando a teoria quântica “nasceu”?

Essas interpretações concorrentes discordam sobre vários aspectos relacionados a esse episódio. Na sequência são abordados dois deles: quando a teoria quântica teria surgido e qual o papel individual dos cientistas envolvidos, especialmente Planck e Einstein, na origem da compreensão da quantização. Na seção seguinte, são apresentadas crenças de fundo

¹⁹ Esta publicação é basicamente um resumo dos trabalhos que ele tinha feito antes, esclarecendo alguns pontos sem trazer ideias novas (Kuhn, 1984).

consideradas adequadas para abordar um episódio histórico como esse. Em particular, é destacado o conceito de **unidade de descoberta**, uma importante virtude explicativa para a discussão em questão, utilizada para contrastar as duas visões.

É muito difícil estabelecer uma data como “o dia do nascimento” de um desenvolvimento conceitualmente tão complicado como a teoria quântica. No entanto, isto não impediu pesquisadores de tentarem. 14 de dezembro de 1900 tem sido considerada a data de “nascimento”, uma vez que foi na reunião da Sociedade Alemã de Física, acontecida nessa data, que Planck introduziu sua constante **h** e seus termos do espectro de energia discreto de um oscilador harmônico. No entanto, esta data é questionada. Jammer (1966) destaca que já em 18 de maio de 1899, um ano e meio antes, Planck tinha lido um artigo diante da academia de Berlim no qual calculou, na base da lei de radiação de Wien e do resultado experimental obtido por Kurlbaum e Paschen, o valor numérico de uma constante que ele chamou de **b**, encontrando que $\mathbf{b} = 6,885 \times 10^{-27} \text{ cm}^2 \text{ g/seg}$. Ele também tinha reconhecido ela como uma constante natural fundamental, de modo que a introdução de **h** por Planck, embora com um nome diferente e sem referência à dimensão física de ação, precedeu consideravelmente a data de 14 de dezembro de 1900.

Neste cenário, Jammer considera o dia 19 de outubro de 1900 como o dia do nascimento da teoria quântica. Ele justifica esta escolha por que: (1) a dualidade onda-partícula pode ser considerada, na visão do autor, como uma característica essencial da teoria quântica, e que a dualidade estava contida implicitamente no artigo de Planck de 19 de outubro de 1900, como foi mostrado posteriormente por Einstein; e (2) por ter sido a fórmula de interpolação apresentada nesse dia que deu a corroboração lógica que posteriormente fez Planck se voltar para a estatística de Boltzmann e quantizar a energia do oscilador harmônico (Jammer, 1966). No entanto, esta visão também sofre suas críticas. Certamente a constante de Planck havia aparecido com o mesmo símbolo e aproximadamente o mesmo valor que utilizamos. Mas a essência da teoria quântica é a quantização de energia, e está longe de ser evidente que era isso o que Planck tinha em mente. Planck não enfatizou a natureza discreta das trocas de energia, e não estava preocupado com o comportamento detalhado dos seus osciladores. Naquela época, o que era considerado muito mais interessante neste trabalho era a impressionante precisão da nova lei de radiação, e as constantes da natureza que apareciam nela (Kragh, 2000).

Já Kuhn considera que a revolução que deu origem à “velha” teoria quântica só começou em 1906. Ele utiliza como evidência a mudança no vocabulário do próprio Planck – de “ressoador” para “oscilador”, e de “elemento de energia” para “quantum”. Essa mudança no vocabulário de Planck sinaliza o significado alterado da quantidade $h\nu$, de uma subdivisão mental do contínuo de energia, para um átomo de energia fisicamente separável. **É um equívoco, para Kuhn, continuar aplicando o termo “quantum de energia” para os artigos e palestras de Planck anteriores a 1906**, nos quais ele consistentemente utilizou “elemento de energia” – um termo com implicações teóricas e ontológicas consideravelmente diferentes. E a própria mudança em si não teve origem com Planck: Einstein e Ehrenfest tinham insistido nela em 1906, mas Planck levou dois anos para se convencer da ideia (Kuhn, 1984). O que parece tê-lo feito mudar de ideia foi a interação com o físico holandês Hendrik Lorentz, que, em abril de 1908, destacou o problema da radiação de corpo negro em uma assembleia internacional de matemáticos em Roma. É em uma carta para Lorentz sobre a palestra, escrita em outubro de 1908, que ocorre a primeira afirmação conhecida de Planck sobre o caráter discreto do espectro de energia e sua incompatibilidade com a Física Clássica (Kragh, 2000).

5.2.5 Quem é o “pai” da teoria?

O segundo aspecto relacionado à história da Ciência que gostaríamos de problematizar por meio deste episódio é: como determinar qual foi o cientista que forneceu a maior contribuição para o desenvolvimento da ideia de quantização? Ou, dito de outra forma, identificar quem é o “pai” da teoria. Esta é mais uma ideia problemática, uma vez que a Ciência é uma atividade social, e em muitos casos é necessário o trabalho conjunto de muitos cientistas para estabelecer uma ideia científica nova. No entanto, a visão dominante é que Planck foi o indivíduo que deu a contribuição que iniciou o desenvolvimento da teoria quântica, ao ser aquele que mais contribuiu, embora não tenha sido o único, para o desenvolvimento da ideia de quantização. Jammer (1966) exemplifica esta concepção. Como já foi dito, o autor considera a dualidade onda-partícula como característica chave para a ruptura entre a Física Clássica e a Física Quântica. Ele argumenta que a principal razão para a descoberta estatística de Einstein dessa dualidade foi a lei de radiação de Planck. Quando Planck tentou interpolar as expressões que levavam, respectivamente, à fórmula de Rayleigh-Jeans e à lei de Wien, a equação resultante foi, nas palavras do autor, “um amálgama dos

aspectos de onda e partícula da radiação, a primeira desse tipo a ser desenvolvida na teoria quântica. Embora, é claro, isto não tenha sido reconhecido como tal pelo seu autor” (Jammer, 1966, p. 44, nossa tradução). Jammer considera que a fórmula de interpolação de Planck, anunciada em 19 de outubro de 1900, contem “certas implicações que, uma vez reconhecidas por Einstein, afetaram decisivamente as próprias fundações da Física” (Jammer, 1966, p. 18, nossa tradução).

Mas Planck realmente introduziu a hipótese do quantum em 1900? Thomas Kuhn (1978) pensa que não. Como ele aponta, em nenhum lugar dos artigos de 1900 e 1901 Planck escreveu claramente que a energia de um oscilador pode possuir apenas energias discretas – de acordo com $\epsilon = nh\nu$, onde n é um número inteiro. Se era isso que ele queria dizer, e se ele percebeu que tinha introduzido a quantização da energia – um conceito estranho e não-clássico –, por que permaneceu em silêncio por mais de 4 anos? Além disso, em suas *lecture* de 1906, ele argumentou para uma teoria contínua, que não fazia nenhuma menção aos osciladores de energia discreta. Se ele já havia se dado conta em 1900 – como afirmou posteriormente –, o que o fez mudar de ideia seis anos depois? (Kragh, 2000). E se Max Planck não introduziu a hipótese do quanta de energia em 1900, quem fez? Lorentz e até Boltzmann foram mencionados como candidatos, mas um caso muito mais forte pode ser feito de que foi Einstein o primeiro a reconhecer a essência da teoria quântica. As contribuições memoráveis de Einstein para o desenvolvimento inicial da teoria quântica são bem conhecidas, e estão além de disputa. A mais famosa é a sua teoria do quanta de luz de 1905 (discutida na seção 5.1), mas ele também fez contribuições importantes em 1907, sobre a teoria quântica do calor específico de sólidos, e em 1909, sobre flutuações de energia (Kragh, 2000).

5.2.6 Unidades de descoberta

Serão discutidas na sequência crenças de fundo nas quais cada abordagem se baseia, e virtudes explicativas que possam ser utilizadas para comparar a visão de NdC propagada por cada uma delas. Como já foi dito, episódios de IME são sempre contextuais. Esta abordagem não é capaz de conduzir até uma explicação que possa ser considerada a melhor em absoluto. IME é sempre relacionada a um contexto e a um conjunto específico de critérios. Um historiador poderia confrontar as duas explicações com um amplo conjunto de dados (textos

originais, correspondências dos cientistas envolvidos, etc.) para tentar concluir qual delas oferece a explicação mais verossímil, mas este não é o objetivo deste texto. Por se tratar de um texto sobre o uso de história da Ciência no ensino de Física, nosso foco será refletir sobre visões de NdC. Vamos começar elegendo uma crença de fundo, que certamente não é a única possível, para cada interpretação, explorando a tensão existente entre elas.

Quando interpretações históricas que contrariem uma interpretação hegemônica são identificadas, geralmente os cientistas tendem a apresentar resistência. Os motivos podem variar, dependendo do episódio e dos indivíduos envolvidos no debate. Destaca-se um deles a seguir: o que Kuhn (1978) chama de unidades de descoberta. **Unidades de descoberta são os tijolos a partir dos quais o edifício da Ciência é gradualmente construído.** O conhecimento que futuros cientistas adquirem na escola ou na universidade é transmitido para eles com essas unidades, que podem ser empíricas ou teóricas. Quando o estudante posteriormente entra na profissão, é com o entendimento de que **o sucesso é medido pelo tamanho e número de tijolos que ele é capaz de colocar neste “edifício”**. Este é um dos motivos pelos quais estabelecer prioridade sobre uma descoberta desempenha um papel tão grande no desenvolvimento científico, ao menos desde o século XVII. Kuhn (1984) considera que o conceito de unidade de descoberta é constitutivo da vida científica como nós a conhecemos. Este conceito será adotado como crença de fundo para a interpretação “padrão”. Isto não quer dizer que seja considerado que os autores que compartilhem desta visão optem conscientemente por este posicionamento. Talvez o mais provável seja que essa questão não tenha sido considerada em muitos casos. Mas acreditamos que o conceito seja pertinente para a comparação destas duas explicações com respeito às questões apresentadas: quando a teoria nasceu? E quem é o “pai” da teoria? Preservar unidades de descoberta nos parece uma boa justificativa (embora certamente não seja a única) para o desejo de delimitar claramente **quando** e graças a **quem** uma teoria científica foi desenvolvida.

Já segundo estudos historiográficos como o de Kuhn (1978), **descobertas são processos extensos, raramente atribuíveis a um momento particular no tempo e às vezes nem mesmo a um único indivíduo.** Essa afirmação será adotada como crença de fundo para a interpretação “alternativa” apresentada anteriormente. Usualmente os cientistas têm pouca dúvida sobre quem foi responsável pelas grandes realizações da Ciência – quem trouxe a questão para um ponto a partir do qual não poderia mais ter volta. O próprio Planck é um exemplo disso: dada a lei de distribuição e a técnica dele para derivá-la, o reconhecimento da descontinuidade era inevitável. No entanto, Kuhn destaca que **a identificação dessas**

unidades de descoberta ocorre sempre anacronicamente, onde conceitos e ideias de uma época posterior são utilizados para analisar os fatos do passado, reinterpretando-os (Kuhn, 1984). Quanto às virtudes explicativas utilizadas para comparar as duas interpretações, elegeremos duas características da NdC apontadas pela visão Consensual: (1) a Ciência é um empreendimento humano praticado no contexto de uma larga cultura, e (2) destacar que o desenvolvimento científico não é regido pelo trabalho individual de gênios isolados. Discussão com os pares (muitas vezes defendendo posições antagônicas), por exemplo, é fundamental para o desabrochar de novas ideias na Ciência. Isso é bem ilustrado pela mudança de vocabulário do próprio Planck sobre quantização, como foi apontado. Jammer (1966) também reconhece isto, ao destacar que, na época, o próprio Planck não havia se dado conta de muitas das consequências de seu trabalho.

Como sintetizado por Kragh (2000), não há dúvida de que o jovem Einstein viu mais profundo do que Planck, e que Einstein sozinho reconheceu que a descontinuidade quântica era uma parte essencial da teoria de Planck da radiação de corpo negro. Se isto faz Einstein o verdadeiro descobridor da descontinuidade quântica, como afirmado pelo historiador da Física Olivier Darrigol (1992), é outra questão. Há evidência tanto a favor quanto contra esta interpretação controversa. O que importante é que o papel de Planck na descoberta da teoria quântica foi complexo, e de algum modo ambíguo. Creditar ele sozinho pela descoberta, como é feito em alguns livros didáticos, é muito simplista. Outros físicos, e Einstein em particular, foram crucialmente envolvidos na criação da teoria quântica. Dessa forma, parece mais realista ver a “descoberta” como um processo extenso, e não como um momento de Insight comunicado em um dia particular do final de 1900 (Kragh, 2000; Raicik & Peduzzi, 2015).

É possível que conceitos como o de unidade de descoberta estejam, implicitamente, influenciando a visão de NdC que é tradicionalmente proporcionada no ensino de Ciências. Um conceito no qual muito do sistema de recompensa da Ciência (e.g., prêmio Nobel), e da concepção dos cientistas sobre si, se baseia. O objetivo dessa discussão não é ser proibitivo sobre o uso da ideia de unidade de descoberta, mas é importante refletir sobre a visão de NdC para a qual ela pode contribuir. Por meio dos critérios adotados, a interpretação “padrão” (que possui méritos) deixa a desejar ao creditar uma pessoa específica e uma data particular como origem da teoria quântica. O caso de IME elaborado ao longo desta seção é sintetizada no quadro 4, a seguir.

Episódio	Quantização de Planck
Contexto científico	<ul style="list-style-type: none"> • Criação de leis para explicar o espectro de emissão da radiação de corpo negro (Lei do deslocamento de Wien e lei de radiação de Rayleigh-Jeans). • Discussões teóricas sobre termodinâmica e eletromagnetismo.
Explicação potencial 1	Interpretação “padrão” da história (Max Jammer).
Explicação potencial 2	Interpretação alternativa da história (Thomas Kuhn e Helge Kragh).
Crença de fundo da Explicação 1	<ul style="list-style-type: none"> • Unidades de descoberta;
Crença de fundo da Explicação 2	<ul style="list-style-type: none"> • Descoberta científica distribuída temporalmente e socialmente;
Virtudes explicativas	<ul style="list-style-type: none"> • A Ciência é um empreendimento humano, praticado no contexto de uma larga cultura; • O desenvolvimento científico não é regido pelo trabalho individual de gênios isolados.
NdC	<ul style="list-style-type: none"> • Papel social e coletivo da produção de conhecimento científico; • Problematizar identidade da Ciência e dos cientistas.

Quadro 4 – síntese da discussão sobre o episódio histórico da quantização da energia.

6 ESTUDO III (PARTE I): EPISÓDIOS DE INFERÊNCIA À MELHOR EXPLICAÇÃO NA FORMAÇÃO DE PROFESSORES

Este terceiro estudo busca responder à questão de pesquisa número 3: Que dificuldades estudantes de licenciatura em Física apresentam ao tentar empregar esta perspectiva para abordar episódios históricos? Por conta disso, neste e no próximo capítulo é apresentado estudo empírico envolvendo uma turma de quatro alunos de licenciatura em Física. No estudo em questão, os estudantes foram introduzidos brevemente à estrutura da IME, e em seguida foram orientados a produzir seminários sobre tópicos de Física moderna, utilizando esta estrutura para abordar questões da HFSC.

Em princípio, o objetivo desse estudo era investigar a experiência de estudantes de licenciatura ao tentar aplicar a abordagem desenvolvida no estudo I como estratégia didática para elaborar aulas de física sobre episódios da história da ciência. Os objetivos eram (1) investigar em que medida o uso da IME, enquanto recurso didático, contribui para instrumentalizar esses estudantes a prepararem aulas sobre a história da ciência, sem cair nos mitos bem documentados na literatura; e (2) se haveria contribuição para fomentar discussões sobre a epistemologia. Para isso, desejava-se implementar uma sequência didática na qual algumas aulas da disciplina fossem destinadas à apresentação e discussão da proposta. A realidade da disciplina fez com que estes objetivos precisassem ser ajustados, como é relatado na seção 6.1.4. As próximas seções apresentam os detalhes deste contexto de pesquisa, como o estudo foi delineado e os dados coletados. As análises são apresentadas na segunda parte do estudo, no capítulo 7.

6.1 Contexto do Estudo

6.1.1 A licenciatura em Física da UFRGS

O curso de licenciatura da UFRGS é oferecido nas modalidades noturno e diurno. Ele é centrado no instituto de Física (IF) da universidade, onde as disciplinas específicas de física e de ensino de física são ofertadas e o currículo é complementado com disciplinas da área de educação, fornecidas pela Faculdade de Educação (FACED) da universidade.

6.1.2 A disciplina na qual o estudo foi desenvolvido

Esta etapa da pesquisa foi realizada na terceira e última disciplina de um ciclo chamado de “Transposição Didática de Tópicos Especiais em Física Geral I, II e III”, previstas para as etapas 5, 6 e 8 deste curso (de um total de 11). Nas aulas destas disciplinas, os alunos são orientados a apresentar seminários para seus colegas e para o professor da disciplina simulando aulas de ensino médio sobre temas pré-estabelecidos. Cada seminário é seguido de uma discussão entre o professor e os estudantes sobre o seminário apresentado, com foco no domínio do conteúdo envolvido e em estratégias pedagógicas que possam ser utilizadas. O conteúdo específico abordado na disciplina escolhida é Física Moderna, contemplando temas como: noções básicas de relatividade, conceitos básicos de física quântica, física atômica, física nuclear e física de partículas. O apêndice A apresenta a sequência dos tópicos selecionados para serem abordados no semestre no qual o estudo foi realizado (2019/1).

Ao longo dos anos, professores com formação específica em ensino de Física têm se alternado com professores de formação específica em física para ministrar estas disciplinas. No semestre em que o estudo foi realizado, o professor da disciplina era um físico teórico, especialista em sistemas dinâmicos não lineares, e sem vínculo com os grupos de pesquisa em ensino de Física que existem na instituição. No semestre analisado, as aulas ocorreram uma vez por semana, no turno noturno, com duração das 18:30 h às 22:10 h. Os 32 tópicos previstos foram divididos entre os estudantes, que se revezavam na apresentação de dois seminários por semana.

É útil informar que, tradicionalmente, esta disciplina tem sido encarada pelos estudantes como uma das disciplinas mais fáceis do curso, já que não há provas escritas formais. A qualidade dos seminários apresentados varia, mas tipicamente o que costuma ser feito são aulas de acordo com um livro didático de física moderna, muitas vezes do ensino superior, simplificando a parte matemática. Há casos em que os estudantes se dedicam mais à produção do seminário, preparando experimentos, pesquisando em outras fontes – como artigos da área de ensino de física –, ou apresentando simulações computacionais. No entanto, geralmente, esta costuma ser a exceção.

6.1.3 Os sujeitos de pesquisa

Neste semestre, quatro estudantes cursaram a disciplina na qual a pesquisa foi desenvolvida. Eles serão mencionados como estudantes 1, 2, 3 e 4. Os alunos 1 e 2 estavam cursando a Licenciatura em Física como primeira graduação, enquanto os alunos 3 e 4 eram formados no Bacharelado em Física e cursavam a Licenciatura como complementação curricular. Estes últimos também eram estudantes de pós-graduação. A faixa etária dos alunos 1, 2 e 3 era de 25 a 30 anos, enquanto o aluno 4 tinha pouco mais de 50 anos. Segue abaixo um resumo de características marcantes dos seminários apresentados por cada um desses estudantes durante as aulas da disciplina, produzido com base nas observações feitas pelo pesquisador durante todo o semestre letivo.

Estudante 1

Este aluno demonstrou dificuldade em apresentar seminários que atendessem às demandas da disciplina. Foi comum seus seminários apresentarem problemas. Em parte deles, os conteúdos foram apresentados de forma mecânica, sem conexão entre as ideias. Também era apontado com frequência, durante as discussões dos seus seminários, que relações importantes eram deixadas de fora. Em um seminário sobre a equação de Schrödinger, por exemplo, a analogia da equação com a conservação da energia não foi comentada. Alguns de seus seminários foram bem avaliados durante o semestre, mas a maior parte deles foi criticada, principalmente por não explicar de forma didática os conceitos apresentados. Em outro seminário sobre o átomo de Bohr, por exemplo, ele abordou o átomo de Bohr e, em seguida, as séries de Balmer, sem conectá-los. Como é ilustrado pelos exemplos, o conteúdo previsto para os seminários costumavam ser apresentados pelo estudante, mas com frequência não eram discutidos ou explicados com a profundidade desejada. Isto foi mencionado com frequência durante a discussão de seus seminários. Também era comum que seus seminários fossem muito curtos. Em uma das aulas o estudante relatou que também estava cursando a disciplina de Estágio Supervisionado neste mesmo semestre, e que fazia observações no mesmo dia das aulas desta disciplina, pela manhã. O aluno relatou que também assistia aula durante a tarde nesse dia, e por diversas vezes foi visível o seu cansaço durante as aulas.

Estudante 2

Atuava como professora da educação básica durante o semestre analisado. Seus seminários chamaram atenção por abordar os conteúdos de forma didática. Ela se esforçava para apresentar as ideias de forma lógica e bem conectada, geralmente com sucesso. Dentro do que ela se propunha a fazer, os seminários costumavam ser elogiados pelos colegas, pelo professor da disciplina e pelo pesquisador. As críticas mais frequentes diziam respeito a alguns detalhes, como comentários que seriam pertinentes fazer, mas que eram deixados de lado. Alguns dos seus seminários (e.g., “Relação massa e energia, energia de ligação e massa invariante”, “átomo de Rutherford”) foram considerados pelos colegas, professor da disciplina e pelo pesquisador como seminários muito bons. Ela transitava bem entre o uso do quadro e apresentações de slides, deixando as informações fluidas, bem organizadas e conectadas. Em geral, seus seminários cumpriam com o conteúdo proposto, sem deixar de serem didáticos.

Estudante 3

O estudante 3 é um bacharel em Física que atuava como professor de física de Ensino Médio enquanto cursava disciplinas do curso de licenciatura. No mesmo semestre no qual o estudo foi realizado, ele começou a fazer mestrado em Ensino de Física na própria UFRGS. De modo geral, os seminários que ele apresentou foram muito bem avaliados. A exposição era clara, com bom encadeamento das ideias e boa didática. Ele também demonstrava bom domínio dos conceitos e dos procedimentos matemáticos. Além disso, em diversos seminários ele utilizou simulações computacionais para exemplificar os fenômenos considerados, fazendo bom uso dessa ferramenta. Quando houve críticas, foram sobre temas que poderiam ter sido abordados, mas foram deixados de fora, o que fez alguns de seus seminários serem um tanto breves (duração de 30 minutos ou menos). Um exemplo foi o seminário sobre a transformação de Lorentz, no qual os conceitos e equações foram apresentados rapidamente, de forma clara e correta, mas sem um maior aprofundamento ou discussão dos paradoxos que são gerados.

Estudante 4

O estudante 4 é o mais experiente deles. Também é bacharel em Física, além de ter concluído graduação em farmácia anteriormente. A qualidade de seus seminários oscilou ao longo do semestre. Ele demonstra ter muito conhecimento sobre boa parte dos conteúdos. Por outro lado, em diversos momentos sua didática foi prejudicada pela desorganização do quadro e por falta de clareza na exposição. Em alguns seminários, como o sobre espectro de raio-X, apresentou muito domínio sobre o tema, indo além do conteúdo tipicamente abordado, por conta de experiências prévias que teve com o assunto. Ele foi o único aluno que tentou abordar discussões sobre NdC em alguns de seus seminários espontaneamente. Em um de seus seminários, discutiu, superficialmente, diferentes interpretações epistemológicas possíveis sobre a dualidade onda-partícula.

6.1.4 Desvios de Percurso

O professor da disciplina foi solícito ao pedido de realizar a pesquisa nesta disciplina, desde que isto não prejudicasse o cumprimento do cronograma. Os estudantes também se demonstraram favoráveis a participar da pesquisa, assinando termo de consentimento livre e esclarecido (apêndice B). Apenas o estudante 3 se recusou a participar da pesquisa, alegando estar sobrecarregado de atividades no semestre. No entanto, ao longo do semestre este estudante mudou de ideia, concordando em participar do estudo.

Apesar de se disponibilizarem a participar da pesquisa, esses estudantes demonstraram resistência a atividades que pudessem resultar em um aumento do esforço necessário para concluir as atividades da disciplina. Quando foi proposto o uso de aulas da disciplina para desenvolver a proposta, o professor recomendou que o pesquisador apresentasse alguns dos seminários previstos, utilizando essas apresentações para apresentar a IME. A apresentação de quatro ou cinco seminários poderia contribuir para essa finalidade, mas sua produção não foi viável, devido ao pesquisador também estar envolvido com a preparação dos seminários apresentados pelos estudantes.

Alternativas foram buscadas, como propor aos estudantes a realização de encontros fora do horário da aula, mas a ideia foi recusada, alegando-se indisponibilidade de tempo. Quando foi solicitado que os estudantes respondessem a um questionário a respeito de concepções sobre a natureza da ciência, adaptado de Porra, Sales e Silva (2011) e disponível no apêndice C, a resistência dos estudantes também foi perceptível. O estudante 3 respondeu

ao questionário prontamente, mas os demais não entregaram suas respostas. Por conta disso, esta fonte de dados foi descartada.

Em outro momento, durante o debate sobre um seminário, o professor da disciplina questionou os estudantes sobre o tempo que eles dedicavam para preparar seus seminários. Em resposta, o estudante 3 mencionou que geralmente prepara seus seminários durante o dia da apresentação. Os outros estudantes também forneceram resposta semelhante, com a estudante 2 sendo a única a dizer que preparava seus seminários com antecedência. Isto ficou explícito para o caso do estudante 4, que não apresentou seu seminário previsto para a pesquisa, alegando não ter tido tempo de preparar a apresentação naquele dia devido a um imprevisto. Por conta disso, este estudante não terá seu seminário analisado neste estudo.

6.1.5 Sequência das Aulas até os Seminários Analisados

Todas as aulas da disciplina seguiram a mesma sequência: começa com apresentação de um seminário por parte de um estudante. Após a apresentação, o professor da disciplina solicita que cada um dos presentes (inclusive o pesquisador) comente suas impressões sobre o seminário apresentado, e por fim o professor faz seus próprios comentários. Em geral os alunos não faziam comentários muito elaborados sobre os seminários dos seus colegas. Todos os alunos tiveram ao menos um seminário muito elogiado ao longo do semestre. No entanto, isso foi raro para os seminários do estudante 1, comum para a estudante 2 e o estudante 3, e oscilou no caso do estudante 4. Apenas na primeira aula não houve apresentação, quando foi estabelecida a sequência das apresentações. Para apresentar a abordagem aos estudantes, optou-se por utilizar um seminário apresentado pelo pesquisador. Este seminário começou com uma breve apresentação sobre a IME, e o episódio histórico abordado foi a explicação do efeito fotoelétrico, discutido no estudo II (seção 5.1).

6.2 Metodologia do Estudo III

6.2.1 Delineamento do estudo III

Foi decidido que cada estudante teria um seminário analisado neste estudo. Os quatro seminários selecionados foram: 1) Experimento de Stern-Gerlach e o Spin do elétron; 2) Bases experimentais da relatividade e Experiência de Michelson e Morley; 3) Os postulados de Einstein; 4) Radioatividade e radiações alfa, beta e gama. O terceiro deles foi desconsiderado, como mencionado na seção anterior. Esses seminários foram filmados, com o áudio de cada apresentação sendo transcrito. A modalidade de transcrição adotada foi padrão (ou inteligente), que tem por objetivo proporcionar uma leitura fluida (Marcuschi, 2003). Nesta modalidade de transcrição, não são registradas interrupções (e.g., aham, tá legal), vícios de linguagem (e.g., tá, né, daí, tipo) e repetições de palavras (sim, sim). Também é feita a correção de concordância verbal e nominal. Esses ajustes são feitos com a intenção de facilitar a leitura, sem alterar o conteúdo. Não foram corrigidos erros conceituais, que estão acompanhados de comentários com a sua identificação. Quanto à formatação das transcrições, comentários do analista estão indicados entre parênteses duplos (()), e o símbolo /.../ indica trecho omitido, por não ter sido considerado relevante para a análise. A transcrição de cada seminário analisado encontra-se nas seções 7.1.3, 7.2.3 e 7.3.3.

Também optou-se por disponibilizar referências históricas, em português, aos estudantes, uma vez que fontes históricas de boa qualidade podem ser difíceis de encontrar. Além disso, pode ser difícil adequar certos episódios históricos à estrutura da IME, principalmente se a fonte histórica de referência utilizar uma estrutura narrativa distinta. Devido ao contato breve que esses estudantes tiveram com a abordagem, buscou-se desenvolver textos de apoio que pudessem complementar a referência histórica indicada. Além dessas referências históricas, os estudantes receberam também um texto introdutório sobre a IME (apêndice D).

6.2.2 Ferramenta de Análise de Seminários

Com base na esquematização obtida no estudo I, buscou-se desenvolver uma ferramenta para analisar os seminários dos estudantes. A ferramenta criada possui dois eixos de análise: um eixo estrutural e um eixo temático. O **eixo estrutural** diz respeito à presença dos elementos constituintes da estrutura da IME, discutidos na seção 4.2. Já o **eixo temático** corresponde à adequação com que a estrutura é preenchida, e está associada ao conjunto

adotado como referência para estas dimensões temáticas. Para este estudo, são adotadas três dimensões temáticas: histórica, conceitual e epistêmica.

A **dimensão histórica** considera as informações históricas que foram incluídas (ou informações relevantes que tenham sido ignoradas), além da qualidade/adequação com que essas informações foram empregadas. Deve ser feita a ressalva de que são muitos e diversos os eventos históricos que podem ser incluídos na abordagem de qualquer episódio da história da ciência. Alguns desses eventos históricos serão considerados mais ou menos relevantes, dependendo do enfoque adotado. Por exemplo, detalhes biográficos dos cientistas envolvidos podem ser considerados muito relevantes para uma abordagem voltada a estudar a contribuição feita por aqueles indivíduos. No entanto, também podem ser considerados menos relevantes para uma perspectiva focada na evolução de conceitos, sem destaque para as particularidades dos cientistas envolvidos. Por conta disso, a análise deste estudo será guiada por dois princípios: valorização de informações históricas que favoreçam a adesão do episódio histórico à estrutura da IME (i.e., apresentação de explicações científicas concorrentes, e as evidências utilizadas para defender ou criticá-las) e correspondência das informações apresentadas no seminário com as referências históricas disponibilizadas para sua elaboração. Quanto à forma como a história da ciência é abordada, as noções sobre o uso de história da ciência discutidas na seção 2.3 serão empregadas como referência temática para esta dimensão.

A **dimensão conceitual** foca na adequação científica dos conhecimentos empregados. Ela está intrinsecamente ligada à dimensão histórica, uma vez que a análise conceitual deve considerar o conhecimento científico específico daquele contexto histórico. Deve ser respeitado o desenrolar histórico das teorias, conceitos e interpretações científicas (i. e., sua diacronia). Também é necessária atenção ao risco de interpretações anacrônicas, oriundas do conhecimento atual deste domínio, ou do conhecimento da explicação vencedora da disputa. As fontes históricas utilizadas para o estudo de cada episódio histórico serão adotadas como principal referência temática para esta dimensão.

A **dimensão epistêmica** diz respeito à abordagem de discussões epistêmicas relevantes para o ensino de história e filosofia da ciência. Com este respeito, a visão consensual sobre a natureza da ciência (apresentada na seção 2.2.1) será empregada como referência temática, no intuito de servir como guia para a identificação do tipo de discussão considerada relevante para esta dimensão. Com respeito a esta dimensão, no entanto, deve ser

feita a ressalva de que os estudantes que participaram do estudo não possuíam formação prévia sobre este tema. Por conta disso e da complexidade dessas questões, não era esperado que esta dimensão fosse amplamente contemplada pelos seus seminários. Por outro lado, esta dimensão é considerada muito importante para ser excluída da análise. Assim, a análise que será feita com respeito a esta dimensão não terá o objetivo de criticar o que foi (ou não) feito pelos estudantes, estando voltada a ilustrar discussões possíveis.

7 ESTUDO III (PARTE II): OS SEMINÁRIOS ANALISADOS

7.1 Seminário I: Experimento de Stern-Gerlach e o Spin do elétron

7.1.1 Materiais disponibilizados ao estudante

A fonte histórica fornecida ao estudante como referência principal para a produção deste seminário foi o artigo de Gomes e Pietrocola (2011) sobre o experimento de Stern-Gerlach. Este artigo fornece um relato do contexto histórico no qual o experimento foi realizado. No entanto, sua estrutura narrativa difere da estrutura da IME. Por conta disso, também foi disponibilizado ao estudante um texto de apoio breve com os principais fatos relatados pelo artigo. Este texto de apoio corresponde ao apêndice E. Nesse texto de apoio, as informações do artigo foram complementadas com dados históricos adicionais e com a sugestão de uma estrutura para a apresentação do estudante. Esta estrutura continha um resumo do episódio histórico e indicava que fosse abordada a interpretação do resultado experimental na época de sua realização – Stern e Gerlach acreditaram estar medindo o momento angular do átomo e ter confirmado sua quantização. Sugeriu-se ao estudante que desenvolvesse um caso breve de IME, comparando as explicações do resultado experimental fornecidas pelo modelo atômico de Bohr e pela física clássica.

7.1.2 Resumo do contexto histórico do episódio

O experimento de Stern-Gerlach foi elaborado pelo físico Otto Stern e desenvolvido em parceria com Walther Gerlach entre 1921 e 1922. A principal motivação para a realização do experimento foi investigar a quantização do momento angular no modelo atômico de Bohr. Esta hipótese havia sido utilizada por Sommerfeld em 1916 para “atualizar” o modelo que Niels Borh havia elaborado em 1913. Sommerfeld acrescentou a possibilidade de as órbitas dos elétrons em torno do núcleo serem elípticas e existir mais de um plano orbital para o elétron se mover ao redor do núcleo – devido a mais de uma orientação possível para o momento angular do átomo. Ele chegou a introduzir um número quântico (m), relacionado à quantização do momento angular, que é diferente do número quântico utilizado atualmente. No entanto, essas ideias careciam de evidências empíricas e muitos físicos acreditavam que

não se tratassem de propriedades observáveis, mas apenas de abstrações matemáticas úteis para resolver problemas. Além disso, o modelo de Bohr também era desafiado pelo efeito Zeeman anômalo, conhecido desde 1886 e que não havia sido satisfatoriamente explicado por esta teoria nem por suas rivais (como a teoria de Lorentz-Lamour) (Gomes & Pietrocola, 2011).

Sem entrar nos detalhes do episódio histórico, que será abordado a partir da próxima seção, vale destacar que o modelo atômico de Bohr, utilizado como referência para a realização do experimento, atribuía um momento angular não-nulo aos átomos no estado fundamental (o que hoje sabe-se que não é verdade). Com base nisso, Stern supôs que ao fazer um feixe de átomos no estado fundamental atravessar uma região de campo magnético variável, a interação entre o momento angular dos átomos com este campo magnético produziria uma força capaz de desviar a trajetória desses átomos, o que poderia ser observado (Friedrich & Herschbach, 1998). Na próxima seção é apresentada a transcrição do seminário apresentado pelo estudante sobre este episódio histórico, seguida da sua análise.

7.1.3 Transcrição do seminário

Participantes: Estudante 1; Pesquisador; Professor da disciplina (Professor).

Tempo de gravação: 35 minutos e 50 segundos.

00:43

((A apresentação começa utilizando apresentação de slides))

1 **Estudante 1:** O meu seminário é sobre o Spin do elétron. O título do seminário estar escrito
 2 dessa forma não foi uma coincidência, eu escrevi de propósito. Eu escrevi: “O experimento de
 3 Stern-Gerlach e o Spin do elétron”. E mais para frente vocês vão entender por quê. Antes de
 4 começar a falar do Spin do elétron, eu queria chamar atenção para o contexto histórico que
 5 existia. Em 1913 a gente tem o modelo atômico de Niels Bohr, que foi considerado um
 6 modelo semi-atômico ((ele quis dizer semi-clássico, o que estava escrito no slide)). E aí temos
 7 algumas características do modelo, que eu coloquei aqui nos slides: a introdução da regra de
 8 quantização, que foi uma regra *ad hoc* introduzida nesse contexto; e o modelo planetário para
 9 o elétron, a ideia de que o átomo simula o sistema planetário, com o seu núcleo simulando a
 10 posição do sol. A gente teria os elétrons orbitando esse átomo ((ele se refere ao núcleo)). E
 11 esse átomo tem órbitas estacionárias bem definidas, nas quais o momento angular dessas
 12 órbitas é um múltiplo da constante de Planck. $L = n\hbar$, onde n é um número inteiro. A partir
 13 desse modelo de Bohr, lançou-se o desafio de tentar descrever corretamente as estruturas finas
 14 do átomo de hidrogênio ((na verdade o problema da estrutura fina já existia, por conta do
 15 efeito Zeeman anômalo. O problema não surgiu a partir desse modelo, como a fala do
 16 estudante sugere)). O que são essas estruturas finas? Como a gente viu alguns seminários
 17 antes, a gente tinha bem definido quais eram as linhas espectroscópicas do átomo de

18 hidrogênio. O que acontece? Quando a gente pega essas linhas e “dá um zoom”, a gente
19 percebe que tem várias linhas bem próximas. E até então o modelo de Bohr não conseguia
20 explicar essas linhas muito próximas. Eram geralmente duas ou mais linhas, que de longe
21 pareciam uma coisa só, mas que quando a gente enxerga bem próximo são várias linhas, bem
22 próximas umas das outras.

23 Então, em 1916, Sommerfeld incluiu os efeitos relativísticos no modelo atômico de Bohr. Ele
24 considera que os elétrons poderiam se mover em órbitas elípticas, e não apenas em um plano.
25 Ou seja, a gente tinha o modelo de Bohr, que eu falei que era como um modelo planetário, no
26 qual os átomos ((elétrons)) estavam em órbitas circulares, todas no mesmo plano. E agora eles
27 poderiam assumir diferentes planos orbitais em torno do núcleo, e as órbitas poderiam ser
28 elípticas.

29 Então, o que aconteceu? Para sustentar a sua teoria, ele introduziu um terceiro número
30 quântico, que é chamado de número quântico azimutal, ou m ((azimutal é uma denominação
31 do número quântico secundário. O terceiro número quântico é chamado de magnético)), que é
32 diferente do n_l , número quântico de momento linear. Esse número quântico estava relacionado
33 à quantização da direção de L ((momento angular)) no espaço. Então, existiam $2m$ valores
34 para os planos das órbitas dos elétrons, lembrando que m era um número inteiro. Incluindo as
35 posições horizontal e vertical ((ele não faz a importante ressalva, que estava no texto de
36 referência, de que o número quântico magnético considerado naquela época não é o mesmo
37 número quântico que utilizamos hoje)).

38 Então, com a introdução desse novo número quântico, além das órbitas serem quantizadas em
39 relação ao tamanho e à forma, elas poderiam também ser quantizadas em relação à sua
40 orientação. E aqui a gente tem uma comparação entre o modelo de Bohr e o modelo de
41 Sommerfeld ((apresenta imagem presente no artigo fornecido como referência)). Enquanto no
42 modelo de Bohr a gente tem órbitas circulares, com momento apontando sempre numa mesma
43 direção – perpendicular ao plano das órbitas; agora a gente tem várias órbitas e diferentes
44 planos, e o momento linear agora aponta para diferentes posições. E com a atribuição desse
45 novo número quântico, esses momentos poderiam ser quantizados em relação à sua posição
46 no espaço. E aí que entra o experimento de Stern-Gerlach.

47 O experimento de Stern-Gerlach foi bem motivado pelo resultado do efeito Zeeman. O efeito
48 Zeeman descreveu o comportamento de um feixe de elétrons num campo magnético não
49 uniforme. E eles propõem esse experimento, que eu vou mostrar depois, da quantização
50 espacial do átomo. Essa aqui é a foto dos eletroímãs originais que eles usaram. Que, se eu
51 não me engano, está em algum museu nos Estados Unidos. E aí, o que ele fez? Ele utilizou
52 um forno para evaporar átomos de prata, cujo feixe era colimado até entrar na região de
53 campo magnético produzido pelo eletroímã. A gente deve focar que esse campo magnético
54 produzido não era um campo magnético uniforme. Ele é um campo magnético não uniforme,
55 perpendicular à direção de propagação do feixe. Aqui eu tenho uma simulação computacional,
56 que simula esse efeito do experimento de Stern-Gerlach. A representação não é perfeita. Por
57 exemplo, isso aqui não é um forno, e isso aqui também não parece ter a forma que eu mostrei
58 dos imãs. Mas ele mostra mais ou menos como é que funciona esse efeito²⁰. Então eu consigo
59 disparar partículas aqui. E o que acontece? Quando essa partícula atravessa esse campo
60 magnético, parte das partículas saem pela parte de cima, enquanto outras vêm para baixo e
61 colidem nessa placa. Mas se vocês perceberem, 50% das partículas saem pelo lado de cima, e
62 50 % por baixo ((volta para a apresentação)).

63 E aí, o que aconteceu? Quando o Stern propôs esse experimento, ele foi visto com muitos
64 olhos pela comunidade científica da época. Porque eles não viam sentido no que eles estavam

²⁰ A simulação pode ser encontrada em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/stern-gerlach

65 fazendo. E tem até um depoimento do Max Born sobre esse experimento do Stern. Ele
 66 escreveu assim: “eu sempre pensava que a quantização espacial era um tipo de expressão
 67 simbólica para alguma coisa que você não entende. Mas tomar isso, como fez Stern, isso era
 68 ideia própria dele. Eu tentei persuadir Stern de que isso não fazia sentido, mas ele disse-me
 69 que valia à pena tentar”. Então a comunidade científica da época ...

70 **Professor:** que ano é isso? De que ano é esse experimento?

71 **Estudante 1:** É de 1921.

72 **Pesquisador:** É. E começo de 1922. São quatro artigos, dois de 1921 e dois de 1922.

73 **Professor:** Interessante que o Born já está ativo aí. Porque ele aparece na interpretação da
 74 função de onda depois²¹. /.../

75 **Estudante 1:** Enfim. E a comunidade científica da época, ela não foi bem receptiva com esse
 76 experimento do Stern. E aí, como o Stern acreditava na sua teoria, o Stern esperava que esse
 77 feixe de átomos de prata se dividisse em duas componentes ao atravessar o campo magnético
 78 externo, como a gente viu mais cedo. E foi o que aconteceu. Aqui a gente tem essa imagem de
 79 um cartão postal que o Stern enviou para o Bohr.

80 **Pesquisador:** acho que foi o Gerlach que mandou.

81 **Estudante 1:** Tá. Foi o Gerlach que mandou para o Bohr, mostrando para o Bohr que o
 82 experimento tinha dado certo. Tem aqui a tradução do que está escrito: “Postal enviado de
 83 Walter Gerlach a Niels Bohr, em 8 de fevereiro de 1922, que mostra foto onde aparece a prata
 84 depositada na placa de vidro após uma revelação fotográfica”. Aqui a gente tem a imagem
 85 produzida pelo feixe quando não tem campo magnético, e a gente tem ao lado a imagem
 86 produzida pelo feixe de partículas de prata quando tem campo magnético. /.../

87 ((lendo)) Gerlach diz: “anexo está a prova experimental da quantização direcional. Nós
 88 felicitamos você pela confirmação de sua teoria”. E isso era o que se acreditava até então. E aí
 89 a gente tem a reação da comunidade científica quando eles publicaram os resultados dos
 90 experimentos. E esse aqui foi um depoimento de Sommerfeld em 1922: “através de seu
 91 arranjo experimental, Stern e Gerlach demonstraram *ad oculos* não apenas a quantização
 92 espacial dos átomos num campo magnético, como também provaram a origem quântica da
 93 eletricidade e sua conexão com a estrutura atômica”. Tem um outro depoimento do Einstein,
 94 /.../ que cita “a realização mais interessante até o momento é o experimento de Stern e
 95 Gerlach. O alinhamento dos átomos, sem colisão entre si via trocas radiativas, não é
 96 compreensível com base nos métodos teóricos correntes. Levaria mais de cem anos para os
 97 átomos se alinharem. Eu fiz um pequeno cálculo sobre isso com Paul Ehrenfest. Rubens
 98 considera que o resultado experimental está totalmente correto”. Bohr também comentou
 99 sobre esse experimento. Só que aparentemente Bohr não entendeu muito bem como foi feito
 100 isso. Ele coloca: “eu ficaria muito grato se você pudesse explicar em poucas linhas qual a
 101 interpretação vocês deram aos seus dados experimentais de que os átomos se orientam apenas
 102 paralelos ou opostos, mas nunca normais aos campos, que possam fornecer razões teóricas
 103 para sua afirmação”. E com esses resultados, Stern e Gerlach decidem rejeitar a teoria atômica
 104 ((clássica)), sem saber também se estavam confirmando ali a teoria quântica. Já que eles nem
 105 suspeitavam da existência do Spin do elétron. Geralmente quando a gente estuda o Spin do
 106 elétron, a gente tem esse experimento bem definido como o experimento que determinou o
 107 Spin do elétron. A gente tem uma coisa bem determinista. Por isso que eu coloquei lá no
 108 título da apresentação “o experimento de Stern-Gerlach e o Spin do elétron”, porque até então
 109 não se tinha noção do que era o Spin do elétron. Não se sabia. E aí posteriormente eles vão
 110 associar o Spin do elétron a esse experimento. Mas isso eu vou falar lá na frente. Só que o que
 111 aconteceu? Qual foi a incompatibilidade? Por que ele não mediu, no caso, o momento angular

²¹ Nesse período, Stern era assistente de Max Born no instituto de Física Teórica da universidade de Frankfurt (Mehra & Rechenberg, 1982).

112 que era da teoria do Sommerfeld? Como eu falei anteriormente, ele utilizou um forno que
 113 emitia átomos de prata. Esses átomos de prata possuem 47 elétrons. Só que 46 desses elétrons
 114 formam uma camada fechada, e o último elétron ocupa o nível $5s^1$. Agora eu já estou
 115 utilizando a notação do Linus Paulin, que a gente viu na última aula.

116 **Professor:** Isso já era conhecido?

117 ((alguns segundos de silêncio))

118 **Pesquisador:** Mais ou menos. Estava sendo descoberto. Naquela época existiam três números
 119 quânticos, e o m não era exatamente igual ao m que a gente tem hoje. Porque a relação de que
 120 tem que ter $2m+1$ estados era diferente para eles. Então eles conheciam algumas coisas, mas
 121 não conheciam tudo do jeito que a gente conhece hoje. Eles estavam meio que tateando as
 122 coisas. Mas eles sabiam que só tinha um elétron na camada de valência do átomo de prata.

123 **Professor:** Tá, mas o efeito Zeeman já é entendido?

124 **Estudante 1:** O efeito Zeeman já era entendido. O efeito Zeeman, se eu não me engano, é de
 125 1800 e ... ((fica em silêncio)).

126 **Pesquisador:** O efeito Zeeman é de 1896. Eu posso interromper ou eu deixo para falar
 127 depois?

128 **Professor:** sim, claro.

129 **Estudante 1:** pode.

130 **Pesquisador:** O efeito Zeeman é de 1896. Só que tem o efeito Zeeman normal e o efeito
 131 Zeeman anômalo. O efeito Zeeman basicamente é: a gente pega um átomo no estado excitado
 132 e olha o espectro de emissão dele. E a gente vai ver as franjas da espectroscopia. O que vai
 133 acontecer se a gente colocar um campo magnético externo no átomo e analisar o espectro de
 134 emissão? O efeito que se observa, vou explicar com o vocabulário atual: para o átomo que
 135 tem Spin resultante nulo, o espectro vai se dividir em certo número de linhas. Então, por
 136 exemplo, eu tenho uma linha aqui, e na presença de um campo magnético ela vai se quebrar
 137 em duas. Tem uma série de detalhes técnicos, vai depender da orientação do campo e do
 138 número de linhas. /.../ Sem Spin vai surgir certo número de linhas. Se o átomo tiver um Spin
 139 resultante não nulo, vai surgir outro número de linhas, em vocabulário contemporâneo. Uma
 140 teoria clássica consegue explicar o caso do Spin nulo. Que é o efeito Zeeman normal. Mas no
 141 caso que tinha Spin resultante não nulo, eles não conseguiam prever o número de linhas que
 142 surgia. Por isso era um efeito anômalo. E o modelo atômico de Bohr não conseguia explicar
 143 isso. Então o que acontecia? Eles colocavam um campo magnético externo para observar o
 144 espectro de emissão, e surgia um problema. Aí o Stern vai ter uma ideia: e se fizer um átomo
 145 passar por um campo magnético? E por que o campo magnético tem que ser variável? Que é
 146 algo que eu acho que o Estudante 1 poderia ter detalhado um pouco mais.

147 **Professor:** É.

148 **Pesquisador:** É porque quando a gente tem a variação de um campo magnético sobre uma
 149 partícula carregada em movimento, a gente vai ter uma força ...

150 **Professor:** ... isso a gente ainda está esperando que ele conte. Isso ele tem que contar ainda.

151 **Pesquisador:** Tá. Então eu não vou adiantar isso. Você vai falar sobre isso?

152 **Professor:** Mas eu acho que tem uma outra coisa ali que é inesperada. Que é o fato, que eu
 153 acho que foi o Bohr que notou, que é o fato de não ter uma orientação espacial zero.

154 **Pesquisador:** não só isso. Na verdade, tinha: a previsão clássica era um espectro contínuo de
 155 colisão lá. Então deveria ser um borrão, uma mancha. E não só duas manchinhas. E, pela
 156 teoria do Bohr, eles estavam pensando em momento magnético. O momento orbital do
 157 elétron, que interagia com o campo magnético e ia fazer os desvios. E poderia ter um
 158 momento orbital que não interagia, e que por isso passava reto. Eu estou adiantando muita
 159 coisa do que você ia falar Estudante 1? Ou tu não ia falar sobre isso?

160 **Estudante 1:** pode falar. Depois se precisar eu repito.

161 **Pesquisador:** Tá. Era basicamente isso.

162 **Professor:** Então agora o estudante 1 continua.
 163 **Estudante 1:** /.../ A prata possuía 47 elétrons, dos quais 46 formam uma camada fechada e o
 164 último elétron ocupa o nível $5s^1$. Como se achava que esse número quântico azimutal estava
 165 relacionado com o elétron de valência, e não de fato ao momento magnético ((faz uma pausa
 166 longa)), me perdi agora. ... Em notações atuais tá no $5s^1$. O que isso significa? O subnível s
 167 possui o momento orbital do elétron de valência zero. Ou seja. O elétron no orbital s não
 168 possui momento angular. Daí o que acontece? O Spin só surgiu quatro anos depois. Ele foi
 169 proposto por esses dois, Goudsmit e Uhlenbeck. E foi uma proposta de que o Spin pode ser
 170 considerado como o momento magnético intrínseco das partículas, e até hoje não há nenhum
 171 análogo clássico. E o primeiro trabalho que relacionou o Spin do elétron ao experimento de
 172 Stern-Gerlach só apareceu em 1927. Porque, quando foi proposto o Spin, não se remeteram ao
 173 experimento do Stern-Gerlach. Essa ligação só foi aparecer depois em 1927 ((termina a
 174 apresentação de slides)).
 25:45.

Depois disso o estudante abriu um livro de física moderna e começou a escrever no quadro equações contemporâneas para o Spin. A explicação é confusa, com o estudante colocando informações no quadro sem explicar seu significado. O professor pede para que ele explique o fenômeno físico que provoca o desvio dos átomos, o que o estudante não consegue fazer. Então o seminário foi encerrado, passando-se à sua discussão. Esta última parte foi transcrita, mas não será apresentada aqui, por não ter sido considerada necessária para a análise subsequente.

7.1.4 Análise

7. 1.4.1 Contexto histórico inicial – antes do experimento

Esta análise começa pela dimensão histórica. Deste ponto de vista, o seminário apresentou severos problemas, principalmente por informações importantes que foram omitidas ou insuficientemente abordadas. O principal exemplo é o efeito Zeeman. A única menção do estudante ao efeito é de que: “O experimento de Stern-Gerlach foi bem motivado pelo resultado do efeito Zeeman. O efeito Zeeman descreveu o comportamento de um feixe de elétrons num campo magnético não uniforme” (linha 47). E, posteriormente, ao ser perguntado pelo professor sobre este efeito, sua resposta é vaga: "O efeito Zeeman já era entendido. O efeito Zeeman se eu não me engano é de 1800 e ..." (linha 124). Como já foi dito (seção 7.1.2), pode-se utilizar o problema da estrutura fina da matéria, por meio do efeito Zeeman (normal e anômalo) e do comportamento dos átomos na presença de campos

magnéticos externos, como justificativa e ponto de partida para os trabalhos de Stern e Gerlach.

No entanto, o estudante não explicita do que este efeito se trata, assim como não aponta que representava uma anomalia para o átomo de Bohr. Com a ausência dessas informações, ou de substitutas equivalentes, não é apresentada uma justificativa para a realização deste experimento. O estudante aponta apenas que a estrutura fina da matéria constituía um problema para o modelo de Bohr. Por conta disso, dizer que “a partir desse modelo de Bohr, lançou-se o desafio de tentar descrever corretamente as estruturas finas do átomo de hidrogênio” (linha 12) fornece uma percepção superficial de como este problema influenciou características conceituais fundamentais para este episódio histórico. Por conta desses fatores, considera-se que o contexto histórico não foi satisfatoriamente abordado durante este seminário. Para uma abordagem pautada pela IME, é muito importante fornecer “os porquês” que motivaram as coisas a serem como são, o que não foi feito aqui.

7.1.4.2 Contexto histórico durante a realização do experimento

Já quando está falando do experimento de Stern-Gerlach, ele apenas descreve o experimento. Não é explicado, por exemplo, porque o campo magnético entre os ímãs precisa ser variável, ou qual a origem da força que provoca o desvio dos feixes. Ele também demonstra pouca compreensão dessas ideias, como ocorre ao ser questionado pelo professor da disciplina. Além disso, o estudante não problematiza o resultado do experimento, apenas o descreve, o que levou o pesquisador a fazer um longo comentário, conectando as ideias. Para a análise da dimensão conceitual deste episódio histórico, destacam-se três pontos que serão abordados nas seções seguintes: (1) o conflito entre a previsão clássica e a previsão quântica para o resultado do experimento; (2) o golpe de sorte de utilizar átomos de prata; e (3) a relação entre as teorias da época e a interpretação atual.

7.1.4.3 Conflito entre a previsão clássica e a previsão quântica para o resultado do experimento

Antes de executar seu experimento, Stern previa que a quantização espacial produziria uma divisão do feixe de átomos em duas componentes. Isto ocorreria por dois motivos. O

primeiro é que, naquela época, eram considerados três números quânticos: n , agora chamado de número quântico principal, havia sido empregado por Bohr para determinar suas órbitas circulares ($n = 1, 2, 3, \dots$). Os outros dois números quânticos haviam sido incorporados ao modelo atômico em 1916 por Sommerfeld e Debye (independentemente). O primeiro deles é k , chamado de número quântico azimutal, assumindo os valores $k = 1, 2, \dots, n$. Junto com n , o valor de k estabelecia o **tamanho** e a **forma** da órbita elíptica (que se torna circular para $k = n$). E, por fim, o número quântico m , que variaria de $-k$ a $+k$ em passos inteiros (com $m = 0$ excluído) (Friedrich & Herschbach, 1998). Este número quântico especificava a orientação do plano orbital no espaço, e, conseqüentemente, os valores possíveis de momento angular. Essa limitação a orientações discretas, correspondendo a valores inteiros de m , é o que ficou conhecido como quantização espacial. Para o caso mais simples, o átomo de hidrogênio, teríamos que $n = k = 1$, e $m = -1$ e $+1$. Empregando este modelo como crença de fundo, Stern previu que em um experimento como o que viria a realizar, a quantização espacial seria capaz de dividir um feixe desses átomos em duas componentes distintas ($m = -1$ e $m = +1$). Já para qualquer modelo clássico, no entanto, o momento angular orbital deveria se distribuir de maneira contínua, de modo que passar pelo experimento alargaria o feixe, mas sem provocar uma divisão clara. Estas eram as duas explicações principais para o resultado esperado para o experimento. No entanto, o cenário da época era mais complexo, porque muitos dos que aceitavam a ideia de quantização utilizavam-na como uma noção epistêmica, útil para fazer cálculos, mas não necessariamente aceitavam a sua existência ontológica. Esta citação de Peter Debye ilustra bem esse ponto: "mas certamente você não acredita que a orientação [espacial] dos átomos seja algo fisicamente real; isto é [apenas] uma prescrição para o cálculo, uma tabela de tempos²² para os elétrons" (Friedrich & Herschbach, 2003, p. 56, nossa tradução).

7.1.4.4 O erro que parece acerto

Para entender a percepção de Stern e Gerlach de que seu experimento se tratava de uma confirmação da teoria de Bohr, vale mencionar algumas coincidências. Hoje, sabe-se que o número quântico azimutal m pode possuir $2k + 1$ valores, em vez dos $2k$ previstos na época. Por conta disso, a aparente concordância entre o espalhamento observado e a antiga teoria

²² *Timetable*, no original.

quântica se deve a uma coincidência improvável. Para o átomo de prata, o momento angular orbital (J) do elétron de valência é zero (e não uma unidade, como presumido pelo modelo atômico de Bohr na época). Mas o momento de Spin (desconhecido na época) possui duas componentes (com $m_s = +/- 1/2$), o mesmo número de componentes esperado por eles ($m = +/- 1$). Além disso, o módulo do momento magnético produzido pelo Spin possui exatamente o mesmo tamanho que uma unidade do momento orbital produziria (um magnéton de Bohr), devido a um fator dois que surge devido a um efeito relativístico (desconhecido até 1926). Havia então um impressionante cancelamento de erros.

Para completar, a escolha da prata foi involuntariamente afortunada. O módulo do momento angular de um átomo de prata é meio-inteiro (em termo de múltiplos de \hbar). Se fosse escolhido um átomo de momento angular inteiro, uma das componentes espaciais quantizadas teria um valor zero de projeção de número quântico ($m_j = 0$), como aponta o quadro 5, abaixo (Jorio & Frossard, 2019). Esta componente poderia não ser defletida, ocupando um espaço entre as componentes defletidas no anteparo. Neste caso, o experimento original de Stern-Gerlach não seria capaz de detectar o espalhamento de feixes, resultado que teria parecido consistente com a mecânica clássica.

J	m_j
0	0
$1/2$	$-1/2, 1/2$
1	$-1, 0, +1$
$3/2$	$-3/2, -1/2, 1/2, 3/2$

Quadro 5 – valores de momento angular atômico (J) e os respectivos valores possíveis das suas componentes (m_j), em unidades de \hbar .

É interessante notar que este fato foi mencionado pela referência fornecida ao estudante, embora sem todos esses detalhes. A questão foi parcialmente mencionada pelo estudante, ao comentar que o orbital de valência do átomo de prata é $5s^1$ (linha 114). Neste trecho, ele menciona informações que estão presentes no artigo fornecido como referência histórica. No entanto, as frases seguintes do artigo, sobre a grande coincidência que levou ao resultado correto a partir das premissas erradas, não é mencionada.

“A prata possui 47 elétrons, dos quais 46 formam uma camada fechada e o último elétron ocupa o nível $5s^1$ (em notação espectroscópica). Isto significa que o momento angular orbital do elétron de valência é zero e não uma unidade como presumido pelo modelo de Bohr. O momento magnético medido por Stern e Gerlach era, na verdade, o *momento angular de spin do elétron*. Assim eles acreditavam ter confirmado a teoria de Bohr-Sommerfeld, [...] mas na verdade eles trataram do *único caso em que a teoria (da época) e os resultados experimentais coincidem!*” (Gomes & Pietrocola, 2011, p. 2604-05, destaque no original).

Essa questão possui implicações interessantes para a dimensão epistêmica deste episódio histórico. O experimento mais utilizado para exemplificar o efeito do Spin do elétron (Gomes & Pietrocola, 2011) chegou, na verdade, ao resultado esperado por meio de sorte e equívocos teóricos. Isto permite problematizar uma série de questões epistêmicas, como o papel da experimentação na ciência, a falibilidade das teorias científicas, e o tortuoso caminho que envolve a produção do conhecimento científico. Mas quando estas questões são ignoradas, como ocorre neste seminário, o experimento passa a ser empregado para corroborar a teoria científica a ser ensinada, desempenhando o papel pedagógico de oferecer plausibilidade ao conteúdo.

Conhecer as particularidades e limitações da teoria da época é um pré-requisito para que a abordagem dessas questões seja feita, o que leva a uma dificuldade adicional apresentada pelo estudante ao ministrar este seminário: transição confusa entre a física da época e a física de hoje. Neste seminário, o estudante não faz distinção entre as noções físicas atuais e daquela época. Um exemplo claro é o uso do número quântico magnético (m_l) (linha 29), que ele não explicita ser diferente do significado atribuído atualmente a este número quântico, como indicado em comentário do pesquisador na linha 118. Neste seminário também não foi discutida a diferença entre o momento angular orbital (que acreditava-se estar medindo na época²³) e o momento angular de Spin (o que se entende atualmente que estava sendo medido). É feito apenas um comentário rápido quanto a isso (linha 167).

A título de ilustração, são listadas a seguir três discussões que poderiam ter sido abordadas no âmbito deste episódio histórico. (1) O experimento se propunha a ser um

²³ Só posteriormente o experimento será explicado por meio do conceito de Spin. A ideia deste conceito como o momento angular devido ao giro do elétron em torno de seu próprio eixo foi proposta por Uhlenbeck e Goudsmit em 1925, embora o termo tenha sido cunhado por Pauli ao tentar (sem sucesso) compatibilizar o magnetismo do elétron com a relatividade especial (Mehra & Rechenberg, 1982). Desde então o conceito foi modificado, até chegar na concepção atual de um momento angular intrínseco, empregado pela primeira vez para explicar o experimento de Stern-Gerlach em 1927, por Frasen (Friedrich & Herschbach, 1998). O conceito foi incorporado definitivamente à teoria quântica a partir de 1928, quando Dirac integrou a mecânica quântica com a teoria da relatividade restrita.

“experimento crucial” com respeito à avaliação da quantização do momento angular, prevista pelo modelo atômico de Bohr-Sommerfeld, e seu resultado foi interpretado dessa forma por seus realizadores. Assim, o episódio se demonstra frutífero para a problematização do papel da experimentação na atividade científica, partindo da coincidência que levou a um resultado “correto” a partir de concepções teóricas equivocadas. (2) Uma segunda questão é a construção do conhecimento científico ao longo do tempo, por meio do trabalho de cientistas diversos. Como ilustrado anteriormente, o conceito de Spin foi muito modificado até chegar a sua versão atual. O que vai contra a visão de que o Spin se originou a partir do experimento, ou que o experimento comprovou um conceito que já havia sido definido previamente. (3) E em uma vertente mais voltada à sociologia da ciência, poderiam ser abordadas contingências do trabalho científico, como os problemas experimentais enfrentados, ou a dificuldade de obter financiamento naquele contexto – Alemanha pós-primeira guerra mundial (Friedrich & Herschbach, 2003).

7.1. 5 Comentários sobre o seminário

No que diz respeito à estrutura da IME, identificam-se lacunas que não foram preenchidas. A principal é a falta de uma explicação alternativa, ao não mencionar a previsão clássica para o experimento, o que acarreta em não fazer sentido discutir virtudes explicativas ou a escolha entre explicações alternativas. Outra limitação, do ponto de vista histórico, foi que neste seminário não se distinguiu a interpretação que era dada na época aos conceitos utilizados e a interpretação utilizada atualmente, o que tornou a compreensão do episódio histórico um tanto superficial.

Para entender o que pode ter contribuído para os problemas identificados, vale destacar que o estudante não preparou esta apresentação com antecedência. Após ser questionado sobre a preparação da apresentação, dois dias antes de sua realização, o estudante respondeu que ainda não havia lido a referência histórica que havia sido disponibilizada, e que começaria a preparar a apresentação no dia seguinte (sua véspera). Em nosso entender, o curto tempo dedicado à preparação deste seminário e os problemas identificados nele indicam que a abordagem é complexa, e que demanda tempo para que haja chance de ser bem executada. O quadro 6, a seguir, ilustra as principais considerações desta análise.

Dimensão	Resumo
Histórica	<ul style="list-style-type: none"> • Contextualização superficial; • O átomo de Bohr e as modificações feitas por Sommerfeld são abordadas; • O efeito Zeeman e sua relevância para o episódio histórico foram desconsiderados;
Conceitual	<ul style="list-style-type: none"> • Conceitos abordados superficialmente; • Transição confusa entre a Física da época e a atual; • Abordagem insatisfatória do conceito de Spin;
Estrutural	<ul style="list-style-type: none"> • Ausência de explicações alternativas e dos elementos que envolvem a avaliação das explicações;
Epistêmica	<p>(o que poderia ter sido abordado)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Problematizar o papel da experimentação na atividade científica; • Construção do conhecimento científico ao longo do tempo; • Contingências do trabalho científico;

Quadro 6 – síntese da análise do seminário I (Experimento de Stern-Gerlach e o Spin do elétron)

7.2 Seminário II: Teorias Sobre o Éter e os Experimentos de Michelson e Morley

7.2.1 Materiais disponibilizados

Para este seminário, a fonte histórica indicada como referência principal foi um texto do historiador da Ciência Roberto de Andrade Martins, intitulado “O surgimento da teoria da Relatividade Restrita” (Martins, 2015). Este é um texto bastante completo e detalhado. A estrutura narrativa desta referência é muito próxima à estrutura da IME, apresentando as explicações desenvolvidas por Stokes e por Fresnel para explicar a natureza do éter durante o

século XIX. No entanto, sua extensão torna necessário que parte das informações seja filtrada e/ou resumida para esta atividade. Dessa forma, além da referência histórica foi disponibilizado à estudante um texto de apoio (apêndice F), com instruções sobre os trechos mais relevantes para o seminário (e outros que poderiam ser desconsiderados). Também foi proposta uma estrutura para o seminário, segundo a qual duas explicações sobre o éter são apresentadas, seguidas de uma série de evidências (teóricas e experimentais) sobre o tema, descrição dos experimentos de Michelson e Morley, e interpretação dos resultados.

7.2.2 Resumo breve do episódio histórico

No final do século XVIII, a concepção corpuscular dominava as discussões sobre a natureza da luz. Porém, no início do século XIX surgem evidências importantes em favor da hipótese ondulatória da luz, obtidas principalmente por Thomas Young e Augustin Fresnel. Em 1819 a academia de Ciência da França, dominada pela teoria corpuscular de Newton, propôs um desafio aos defensores da teoria ondulatória, lançando um concurso de monografias sobre a difração, vencido por Fresnel (Silva, 2007). Neste ano, Fresnel propôs que a luz consistia de uma onda cujo meio de propagação é o **éter**. Esse éter permearia todo o espaço e **estaria em repouso, sem interagir com o movimento da Terra**. Também era considerado haver uma diferença de densidade de éter em materiais transparentes, o que fazia a velocidade da luz se modificar nesses meios. Fresnel empregou sua teoria para explicar experimentos famosos da época realizados por Arago e Boscovich, além de fazer previsões experimentais que foram verificadas pouco tempo depois. No entanto, a teoria de Fresnel era muito complexa matematicamente. Isto fez com que a seguinte simplificação tenha sido empregada em vários pontos: considerar apenas termos nos quais a razão entre a velocidade de translação da Terra e a velocidade da luz (v/c) estava elevada à primeira potência – ou seja, propondo uma teoria de primeira ordem em v/c . Em 1839, Babinet realizou um experimento de primeira ordem, na busca de identificar o movimento da Terra com relação ao éter, obtendo resultado nulo. A partir daí, tem início uma série de investigações sobre o movimento da Terra com relação ao éter.

Em 1845, Stokes propõe uma nova teoria para o éter, muito mais simples do ponto de vista matemático que a de Fresnel. Ela **entende o éter como um líquido viscoso, que adere à superfície dos corpos e é quase totalmente arrastado pela Terra, ficando em repouso em**

relação a ela em regiões próximas à sua superfície. Esta abordagem explicava de forma direta e simples os resultados de Boscovich, Arago e Babinet. Segundo ela, apesar da Terra se mover através do éter, e a luz se propagar pelo éter, os fenômenos da ótica geométrica (reflexão, refração e propagação retilínea) não permitiriam detectar esse movimento.

Em 1851, um famoso experimento foi realizado por Fizeau, buscando detectar diferenças na velocidade da luz ao se mover a favor ou contra o fluxo da água que escoava por um sistema de tubos. A teoria de Fresnel previa uma diferença entre a velocidade dos feixes, que foi observada. Por conta disso, este experimento foi utilizado como uma forte confirmação da teoria de Fresnel naquele contexto. Já a teoria de Stokes não previa este efeito, e passou a ser deixada de lado por grande parte dos físicos da época. Dessa forma, em meados do século XIX a luz era considerada uma onda de éter, e acreditava-se que o éter se comportava de acordo com a teoria de Fresnel.

A teoria também foi corroborada por diversos experimentos realizados nos anos seguintes (e.g., Respighi (1861), Hoek (1868) e Mascart (1874)). Além disso, no início da década de 1870, foram publicados três trabalhos teóricos por Velthuis, Potier e Mascart, estabelecendo de forma conclusiva que se a teoria de Fresnel estava correta, nenhum experimento ótico terrestre envolvendo aberrações, reflexão e refração seria influenciado pelo movimento da Terra através do éter, devido ao cancelamento dos diversos termos de primeira ordem.

No entanto, diversos outros efeitos ainda não haviam sido satisfatoriamente abordados por esta teoria (e.g., polarização e difração), fazendo com que os resultados de experimentos realizados (ou propostos) por cientistas como Fizeau (1854), Babinet (1862) e Ångström (1864) fossem inconclusivos devido à falta de consenso sobre a forma correta de avaliá-los. Dessa forma, a situação era complexa no início da década de 1870. Por um lado, a teoria de Fresnel para o éter e seu arrastamento parecia bem confirmada, e essa teoria excluía a possibilidade de detectar o movimento da Terra através do éter por experimentos envolvendo apenas refração, reflexão e aberração luminosa. Por outro lado, não era absurdo imaginar que outros fenômenos luminosos pudessem trazer evidência do movimento da Terra através do éter – e, aparentemente, Fizeau e Ångström haviam detectado fenômenos desse tipo.

É neste cenário que Maxwell escreveu um famoso artigo sobre o éter em 1878. Lá ele discutiu, entre outras coisas, alguns dos experimentos que haviam sido realizados para tentar detectar o movimento da Terra em relação ao éter. Supondo que o éter esteja parado em todo

o universo e que a Terra se desloque através dele, como Fresnel propôs, teríamos algo semelhante a um “vento de éter” passando pela Terra. Como a luz é uma onda de éter, sua velocidade seria diretamente influenciada por este vento – como acontece com o som. Esta diferença de velocidade seria detectável comparando-se o tempo que a luz gasta para percorrer a mesma distância em direções diferentes, dependendo de seu movimento com relação a este “vento”. No entanto, esta diferença estaria relacionada à segunda ordem de v/c , o que fazia o efeito ser muito pequeno e quase impossível de ser medido.

No ano seguinte essa carta foi publicada e o assunto chegou até Michelson. Ele havia realizado, em 1851, as medidas mais precisas da velocidade da luz até então. Michelson pensou que o único modo de resolver o problema proposto por Maxwell seria utilizando métodos interferométricos – com os quais ele não estava suficientemente familiarizado. Dessa forma, ele viajou para a Europa no início de 1880, ficando em Paris e depois em Berlim – onde trabalhou alguns meses no laboratório de Helmholtz. Em 1881 foi construído, na Alemanha, o famoso interferômetro de Michelson. O intuito do aparelho era comparar o tempo de ida e volta para a luz percorrer duas direções perpendiculares. O resultado do experimento indicava uma diferença de velocidades, mas, depois que alguns erros teóricos foram corrigidos, concluiu-se que o experimento, que levou dois anos para ser desenvolvido, não possuía a precisão necessária para fornecer conclusões confiáveis.

Michelson perdeu o interesse pela questão até que, em 1884, lordes Kelvin e Rayleigh o convenceram a repetir o experimento com uma precisão maior. Antes, ele reproduziu o experimento de 1851 de Fizeau, que nunca havia sido repetido, voltando a obter resultados compatíveis com a teoria de Fresnel. Então, em 1887, Michelson e Morley montaram um interferômetro dez vezes mais sensível que o anterior. Eles realizaram uma série de medidas durante quatro dias, esperando identificar a variação de velocidades prevista pela teoria de Fresnel. No entanto, nenhuma diferença de velocidades foi identificada. Concluiu-se que o efeito era nulo, e que não era possível identificar o movimento da Terra com relação ao éter previsto pela teoria de Fresnel. Isto gerou um cenário no qual o resultado do experimento de Fizeau concordava com a teoria de Fresnel para o arrastamento do éter por corpos transparentes; enquanto que o resultado nulo do interferômetro contrariava esta teoria. Já a teoria de Stokes explicava o resultado nulo do experimento com o interferômetro, mas não previa o arrastamento parcial do éter pelos corpos transparentes. Seria preciso elaborar uma nova teoria do éter, ou descobrir algum modo (não muito evidente) de conciliar alguma dessas teorias com os resultados obtidos.

Uma solução potencial para o empasse foi proposta em 1892 por Fitzgerald e Lorentz, independentemente um do outro. Ambos concluíram ser possível manter a teoria de Fresnel, supondo-se que o movimento do interferômetro através do éter causasse uma **contração** de seu comprimento. Se o braço que se move paralelamente ao vento de éter sofresse uma contração, passando do comprimento L para $L' = L(1 - v^2/2c^2)$, os tempos de ida e volta da luz nos dois braços do interferômetro passariam a ser iguais (considerando-se termos até a segunda ordem de v/c). Na verdade, infinitas combinações de mudanças de comprimento dos dois braços poderiam explicar o efeito nulo, desde que a **razão** entre o comprimento longitudinal e transversal sofresse uma variação de $(1 - v^2/2c^2)$. No entanto, não havia, na época, uma explicação **física** para imaginar que o movimento dos corpos através do éter deveria mudar suas dimensões.

Michelson ainda tentou testar a teoria de Stokes, utilizando um “interferômetro vertical” (1897)²⁴, sem obter sucesso. Sua conclusão foi haver duas possibilidades: o éter ser arrastado pela Terra, de acordo com a teoria de Stokes, mas o arrastamento se estender até enormes distâncias da superfície da Terra; ou o éter não ser arrastado, de acordo com a teoria de Fresnel, mas os corpos se contraírem como sugerido por Lorentz e Fitzgerald.

Por conta disso, a situação era confusa por volta de 1900. As duas teorias mais importantes do éter – de Fresnel e de Stokes – explicavam parte dos resultados experimentais, mas ambas tinham problemas. A teoria de Fresnel não era capaz de explicar apenas o resultado do experimento de Michelson-Morley de 1887. Porém, ela era compatível com o resultado se a contração dos objetos fosse considerada. Essa foi a direção em que alguns pesquisadores importantes seguiram, como Poincaré e Lorentz. Já a teoria de Stokes explicava facilmente o resultado de Michelson-Morley, mas não era capaz de explicar efeitos como o observado por Fizeau em 1851.

7.2.3 Transcrição do seminário

²⁴ Michelson desenvolveu um interferômetro vertical para testar a teoria do Stokes. Supondo que existisse um limite de altura sob a superfície da Terra até o qual o éter seria arrastado. O interferômetro, de 17 metros de altura, foi levado para o topo de uma montanha em Cleveland, a 300 metros de altura, obtendo um resultado teoricamente aceitável, mas não havia precisão suficiente para garantir que o efeito era proporcionado pela variação no vento do éter ou pela diferença de temperatura, que poderia causar o mesmo efeito observado (Martins, 2015).

Participantes: Estudante 2; Pesquisador; e Professor da disciplina (Professor).

Tempo de gravação: 29 minutos e 24 segundos.

00:35

((A apresentação foi feita por meio de apresentação de slides))

1 **Estudante 2:** Eu vou falar sobre o interferômetro de Michelson-Morley. Mas antes, vamos
 2 entender o que se conhecia até então por ondas. /.../ ((comenta sobre ondas produzidas em
 3 diferentes meios, como água, cordas, molas e no ar.)) E então a pergunta é: se todas as outras
 4 ondas se propagam em um meio, e a luz é uma onda, qual é o meio no qual a luz se propaga?
 5 Aí entra o contexto histórico sobre o éter luminífero. O que é esse éter luminífero? A luz está
 6 vindo, por exemplo, do Sol aqui para a Terra, e ela está viajando no espaço. E ela é uma onda
 7 que tem que se propagar em algum meio. Então que meio é esse? É o éter. É algo que está
 8 ocupando todo o espaço, e que permite a luz se propagar. Então, vamos tentar entender um
 9 pouco mais o contexto, se eu conseguir passar esse contexto que tem muitos nomes e datas.
 10 Começando em 1809, a gente vai ter o Arago tentando medir a velocidade da luz, que até
 11 então não tinha sido medida com exatidão, sem obter um resultado. Aí, mais ou menos em
 12 1818, ele pede para o Fresnel uma explicação para o seu experimento. E em 1819 o Fresnel
 13 vai propor a existência desse éter luminífero. E o que é essa proposição? Ele vai dizer
 14 ((lendo)): Fresnel supôs que o éter preenche todos os espaços aparentemente vazios do
 15 universo. Alguém olha para cima, não vê nada, mas o espaço está cheio de éter. E nessas
 16 regiões, o éter está em repouso em relação a nós. É importante levar isso em conta. Quando a
 17 gente vai falar em velocidades, é sempre em relação a um referencial. No referencial do éter,
 18 o universo estaria parado. Nas regiões sem matéria, a luz se propagaria na forma de ondas
 19 nesse éter parado. Então ela se propaga no éter. Ele também considerava que existia uma
 20 diferença de densidade de éter em materiais transparentes, o que fazia a sua velocidade se
 21 modificar nesses meios. /.../ Tem o éter! O Universo está cheio de éter. A luz se propaga por
 22 ele, e quando passa por meios transparentes sua velocidade se modifica. Isso em 1819. Aí em
 23 1839 /.../ Babinet faz uma comparação, através de um método interferométrico, das
 24 velocidades da luz dentro de um bloco de vidro, nos casos em que a luz se move no sentido do
 25 movimento da Terra e no sentido oposto. Então é isso que ele vai fazer: pegar um
 26 interferômetro e medir a velocidade da luz no sentido de movimento da Terra e no sentido
 27 oposto, e ver o que tem de diferença. E ele também obteve resultado nulo. Não obteve um
 28 resultado assim: “ah eu vi uma diferença. Então se estiver a favor do sentido de movimento da
 29 Terra eu tenho uma velocidade, e se estiver no sentido oposto eu tenho outra”. Ele não teve
 30 essa diferença. E em 1845 entra o Stokes. Ele propõe uma nova teoria do éter. /.../ O Fresnel
 31 propôs a teoria de que o éter está parado no Universo, e agora o Stokes propõe uma nova
 32 teoria do éter. E qual vai ser essa nova teoria? Ela entende o éter como um líquido viscoso.
 33 Então o éter deixa de ser algo que está parado, e passa a ser um líquido viscoso que adere à
 34 superfície dos corpos, sendo quase totalmente arrastado pela Terra. Então agora ele é um
 35 líquido /.../ ele agarra e vai ser arrastado pela Terra. Ele fica em repouso com relação à Terra
 36 em regiões próximas à superfície. Essa abordagem explicava de forma direta e simples os
 37 resultados /.../ do Arago e do Babinet. Então, embora a Terra se mova através do éter/.../ e o
 38 éter seja o meio de transmissão da luz, os fenômenos de ótica geométrica, como reflexão e
 39 refração retilínea, não permitiriam detectar esse movimento. Usando a ótica geométrica, eu

40 não consigo perceber essa diferença das velocidades, ou identificar o movimento da Terra em
41 relação ao éter ((essa é uma conclusão da teoria de Fresnel, e não de Stokes)). Então eu estou
42 tentando entender o que é esse meio de propagação que a luz tem pra chegar, por exemplo, do
43 Sol até a Terra. Supondo que tem um éter no espaço, e como ele se comporta. É isso que a
44 gente está tentando entender. Aí tem essas tentativas de medir a velocidade da Terra em
45 relação ao éter. Vai ter várias experiências que tentam identificar a velocidade da Terra em
46 relação a esse éter. Eu coloquei aqui no slide. /.../ Em 1859, Fizeau propõe outro experimento,
47 envolvendo a polarização da luz, mas não se chega a consenso sobre o significado dos
48 resultados. Depois, Babinet, em 1862, propõe um experimento que utiliza difração, e também
49 não obteve um resultado. Em 1864 o Ångstrom /.../ realiza um experimento semelhante ao do
50 Babinet, mas os resultados também não são conclusivos, por conta da falta de consenso sobre
51 a forma correta de avaliar o experimento teoricamente e por falta de precisão suficiente. É
52 uma diferença que, se fosse detectada, seria muito pequena. E com os experimentos que eles
53 tinham até então, eles não conseguiam identificar essa diferença sutil de velocidade. Então o
54 que acontece? Quando entra na década de 1870, está muito complicado de entender, se
55 construiu uma situação bem complexa. A teoria de Fresnel para o éter e seu arrastamento
56 parecia bem confirmada. Até agora ninguém estava conseguindo desmentir o que ele tinha
57 falado. Então, existia aquela teoria de que o éter é arrastado e ninguém estava conseguindo
58 mostrar o contrário ((na verdade, é a teoria de Stokes que considera que o éter é arrastado pela
59 Terra)). E essa teoria excluía a possibilidade de detectar o movimento da Terra através do éter
60 por experimentos envolvendo apenas refração, reflexão e aberração da luz. Então eu
61 conseguiria, a partir do Fresnel, explicar algumas coisas, mas eu não conseguia confirmar
62 com experimentos de refração, reflexão ou aberração. Eu não tinha esse resultado. Então,
63 aparentemente, a teoria estava ok. Tem o éter, a luz consegue se propagar, tem o meio, tá aí.
64 A Terra está se movendo em redor dele. Mas quando fazia esses experimentos com refração,
65 reflexão e aberração, a gente não conseguia medir isso. Não tinha como detectar isso. Mas até
66 então, é o que eles estavam tentando entender. Aí, em 1879, o Maxwell – que é o que trouxe a
67 ideia da onda eletromagnética, e que aí vai conseguir mostrar o que é essa onda luminosa –
68 escreve um artigo sobre o éter. Ele supôs que o éter está parado em todo o universo, e a Terra
69 se move através dele. Haveria então um vento de éter, que seria identificável na Terra. /.../ E
70 com isso, teríamos uma diferença de velocidade conforme o vetor velocidade alterasse. Então
71 qual é a ideia? A Terra está andando. A gente sabe que velocidade é um vetor. Conforme a
72 Terra está orbitando, ela vai estar com um vetor indicando qual é a velocidade dela. Se esse
73 vento está passando, e ele não muda de direção, dependendo da direção do movimento da
74 Terra, haveriam velocidades diferentes sendo somadas. A velocidade da Terra estaria a favor
75 desse vento, ou contra ele. Estando na mesma direção do vento de éter, se somaria a
76 velocidade da Terra. Aqui C é a velocidade da luz, e V é a velocidade da Terra, que é 30 km/s
77 em relação ao Sol. /.../ Se eu estou a favor desse vento de éter, eu somo a velocidade da luz
78 com a velocidade da Terra. E se a gente tiver contra o vento, a gente vai ter a diferença, a
79 velocidade da luz menos a velocidade que a Terra está girando. É isso que estava tentando-se
80 achar, que o Maxwell traz.

81 Tem a parte histórica do Michelson, antes de entrar no experimento deles dois. Ele vai tentar
82 fazer um interferômetro sozinho em 1881. Fica por dois anos na Alemanha, tentando construir
83 o interferômetro, que vai ser depois melhor aprimorado. E ele não encontra essa diferença de

84 velocidade com o interferômetro. Aí ele larga mão, fala: “cansei, não vou mais fazer”. Aí, em
 85 1884 vai ter o Lorde Kelvin mais o Rayleigh. E eles motivam: “vai lá, faz de novo o
 86 interferômetro. Eu acho que é uma boa ideia fazer o interferômetro, só faz mais preciso”. Eles
 87 estavam tentando aprimorar pra tentar medir essas sutilezas. /.../ Por que é pequena essa
 88 diferença? A velocidade da luz já se conhecia na época, 3×10^8 m/s. E a da Terra é só 30 km/s.
 89 Ou seja, é uma diferença de velocidades muito pequena para medir. /.../ Não conseguiam ter
 90 um experimento que conseguisse ver isso. Então, em 1884, o Michelson é motivado e entra o
 91 Morley, vai ser o interferômetro de Michelson e Morley em 1887. O interferômetro é este
 92 aqui ((apresenta no slide esquema simplificado do interferômetro, típico de livros didáticos)).
 93 /.../ o que é o experimento? Eu tenho uma fonte de luz coerente. Você emite luz com essa
 94 fonte, a luz bate nesse espelho, que é semitransparente, localizado a 45° , e em outros dois
 95 espelhos equidistantes desse espelho central. Porque o primeiro espelho é semitransparente?
 96 Um espelho normal reflete 100% da luz. Mas esse aqui deixa passar metade, e a outra metade
 97 ele reflete. Então quando bate a luz, metade ele deixa passar, que é o que vai bater no espelho
 98 dois, e a outra metade ele reflete para o espelho 1. O feixe se divide em dois, bate nesses
 99 espelhos 100% refletores, voltam e vão bater no anteparo. E quando bate no anteparo, a gente
 100 consegue ver os padrões de interferência que vão se formar. Agora eu vou mostrar um vídeo,
 101 que eu achei melhor explicado. Eu acho que é melhor mostrar do que só falar, para entender o
 102 que acontece com o interferômetro. /.../ ((apresenta um vídeo de 4 minutos, discutido na seção
 103 7.2.4.3))²⁵.

104 **Estudante 2:** Então, eu acho que o vídeo foi autoexplicativo. O que acontece e como foi o
 105 experimento. Como eles foram motivados, e não acharam o padrão de interferência. E ele
 106 falou: “de novo não deu certo, a gente está fazendo alguma coisa errada”. O que deu início a
 107 algumas coisas. Esse experimento é conhecido como um experimento falho na física. Ele
 108 falhou, porque eles não conseguiram medir aquilo que deveria estar acontecendo
 109 teoricamente. Mas esse experimento falho teve algumas consequências. Primeiro: em 1905,
 110 Einstein sugere que não existe esse éter que preenche todo o universo. Ele apontou
 111 inconsistências na relatividade de Galileu. A luz viaja com uma velocidade constante, e há
 112 dilatação do espaço-tempo. /.../ E iniciam os estudos da relatividade. E toda a relatividade vai
 113 partir de que a luz não precisa de um meio, vai partir disso que a gente já sabe hoje em dia,
 114 que a luz é uma onda eletromagnética, e é a única onda que não precisa de um meio para se
 115 propagar no vácuo.

29:12

7.2.4 Análise do seminário

Antes de começar a análise e discussão deste seminário, vale comentar sobre opções de escopo. Se a apresentação for pensada como uma aula voltada para a educação básica, o que é solicitado pelo contexto do qual este seminário é retirado, esta pode ser considerada uma aula exitosa. Visto que uma apresentação detalhada, sobre um episódio histórico complexo como este, pode, e geralmente irá, envolver uma grande quantidade de informação

²⁵ Vídeo disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=UKaoTOoDzpU>

(e.g., pessoas envolvidas, suas contribuições), o que pode dificultar sua compreensão. Dessa forma, deve ser destacado que abordagens simplificadas podem ser mais adequadas que estudos aprofundados, principalmente como primeiro contato com o tema. Dessa forma, as questões apontadas na sequência não buscam desqualificar o esforço considerável que esta estudante teve para simplificar um episódio histórico complexo, mas sim com o objetivo de apontar uma alternativa, que atenda melhor aos interesses de uma abordagem alinhada com a proposta deste trabalho.

7.2.4.1 Contexto histórico anterior à proposta das teorias

Começando pela dimensão histórica, os problemas que motivaram as teorias do éter foram bem apresentados: a concepção ondulatória da luz e a, aparente, existência de um meio de propagação para essa onda. As demais questões históricas serão abordadas segundo as dimensões conceitual e estrutural, devido a seu conteúdo. Começando pela primeira, ocorre algo interessante quando as explicações concorrentes são apresentadas. A teoria de Fresnel é bem contemplada, porém de forma resumida. E nesta simplificação da teoria, não foi comentada a sua complexidade matemática. Isto faz com que sejam ignoradas duas consequências importantes da aproximação matemática, que considerava apenas termos de primeira ordem em v/c . A primeira é a conclusão, obtida posteriormente, de que experimentos envolvendo efeitos de **primeira ordem**, utilizando reflexão, refração e propagação retilínea da luz, não seriam capazes de detectar o movimento da Terra em relação ao éter. E a segunda é que o interferômetro de Michelson e Morley representava a primeira oportunidade de investigar, com a precisão necessária, o resultado dos efeitos de **segunda ordem** previstos por esta teoria. Essas são questões relevantes para entender porque esse experimento era considerado tão decisivo, e posteriormente se tornou tão importante.

Com respeito à dimensão estrutural, a estudante apresentou as duas explicações concorrentes. Como o texto de referência fornecido já apresentava duas explicações e destacava seu confronto, seria interessante observar, neste episódio, como essa disputa seria conduzida pela estudante. Além disso, muitos experimentos haviam sido citados na referência histórica, o que demanda que algum tipo de recorte seja feito. De modo geral, pode-se ver que a estudante fez recortes condizentes com a seguinte sequência de eventos: começa abordando a necessidade de um meio de propagação para ondas mecânicas, e a dificuldade de medir a

velocidade da luz. Em seguida, apresenta a teoria de Fresnel para o éter, e a explicação de Stokes, listando uma série de experimentos feitos nas décadas seguintes, todos inconclusivos. Então, cita a hipótese do vento de éter proposta por Maxwell, chegando ao experimento de Michelson-Morley, seu resultado inesperado, e o subsequente abandono da hipótese do éter. No entanto, é interessante notar o que foi deixado de fora desta apresentação. A primeira ausência importante é o **experimento realizado por Fizeau em 1851**, um dos mais relevantes (se não o mais relevante) deste período. O resultado deste experimento, descrito na seção 7.2.2, foi considerado uma forte evidência em defesa da teoria de Fresnel, e não era explicado pela teoria de Stokes. Além do experimento de Fizeau, também não foi mencionado, no seminário, os **avanços teóricos realizados durante a década de 1870**, que respaldavam a teoria de Fresnel. Esta é uma opção interessante, uma vez que foram omitidos justamente os principais fatos que davam respaldo teórico e experimental para a teoria de Fresnel. Esta opção será discutida na seção 7.2.5.

7.2.4.2 Avaliação do Experimento de 1887

Devido aos fatos mencionados na seção anterior, o resultado nulo do experimento significava um problema para a hipótese de Fresnel na época, enquanto que era explicado facilmente pela hipótese de Stokes. Por outro lado, alguns resultados experimentais que a teoria de Fresnel explicava bem não eram satisfatoriamente abordados pela explicação de Stokes, como o experimento de Fizeau. Como as evidências que davam respaldo à teoria de Fresnel foram excluídas do seminário, o cenário complexo da época, com duas explicações que possuíam êxitos e problemas, foi substituído por um cenário no qual o experimento simplesmente refutava a teoria de Fresnel.

Esta interpretação das escolhas de escopo feitas no seminário é reforçada por outra discussão importante que também foi ignorada: a interpretação do resultado do interferômetro, levantada por Lorentz e Fitzgerald, independentemente. A existência, hipotética, de uma contração do braço do interferômetro que se move na mesma direção do “vento de éter” levaria a teoria de Fresnel a prever o mesmo efeito nulo observado. Na época, os cientistas encaravam esta contração como uma hipótese teórica, que explicava matematicamente um resultado experimental importante, e resolvia o conflito entre o resultado experimental e a hipótese de Fresnel. No entanto, não havia uma explicação **física**

para esta contração. O raciocínio utilizado era de que se o experimento estiver correto, a hipótese possibilita que a teoria de Fresnel seja conciliada com este resultado – enquanto que esse já era o resultado esperado para a teoria de Stokes. Esta preferência de cientistas, como Lorentz, pela teoria de Fresnel sobre a teoria de Stokes, mesmo na presença de uma forte evidência experimental contrária à primeira e de acordo com a segunda, aponta que nesta avaliação entre explicações o resultado de experimentos anteriores, como o de Fizeau, e os desenvolvimentos teóricos realizados ao longo das últimas décadas eram tão valiosos (se não mais) do que o resultado do interferômetro.

Estas escolhas possuem consequências importantes para a dimensão epistêmica do seminário. Nesta análise, não serão feitas suposições sobre a intenção da estudante ao fazer essas escolhas. Será observado apenas que foram ignoradas evidências indicativas do caminho tortuoso e complexo percorrido pela Ciência. Omitir os fatos que davam respaldo para a teoria de Fresnel simplifica e distorce a compreensão do contexto histórico em questão, criando, artificialmente, um vácuo teórico a ser preenchido posteriormente pela teoria da relatividade.

7.2.4.3 O papel pedagógico deste episódio histórico

Com base no que foi apresentado, identificam-se três informações históricas relevantes que deixaram de ser abordadas: as diferenças entre as previsões das teorias de Fresnel de primeira e segunda ordem; o experimento de Fizeau; e a explicação de Lorentz-Fitzgerald para o resultado do experimento. O estudo deste episódio é oportuno também para refletir sobre o lugar deste episódio na história da Física e, principalmente, como ele tem sido utilizado no ensino de ciências. Este experimento adquiriu relevância histórica como um dos responsáveis por apresentar o problema que levou à noção de contração do espaço; e por ter elevado a precisão experimental a um nível inédito (Martins, 2015). Como a hipótese que motivou o experimento foi abandonada, ele passou a ser apresentado em introduções sobre a teoria da relatividade, usado anacronicamente como o experimento que refutou a hipótese do éter, motivando o surgimento da teoria da relatividade. Nesse sentido, costuma-se afirmar que foi por conta do resultado nulo do experimento que o éter foi abandonado, ignorando, por um lado, a interpretação que Lorentz e Fitzgerald criaram para “salvar” a teoria de Fresnel, e, por outro lado, que quando Einstein propôs a teoria da relatividade, o experimento que ele citou

não foi o interferômetro de Michelson-Morley, mas sim o experimento de Fizeau (Kragh, 1992).

Este movimento se torna mais evidente ao se analisar o vídeo reproduzido pela estudante. Trata-se de um vídeo curto, retirado de um documentário onde o célebre divulgador científico Neil DeGrasse Tyson e o Dr. Bill Fickinger²⁶ explicam o que era entendido na época como éter, descrevem o experimento de Michelson-Morley e comentam sua repercussão. Após apresentar o resultado do experimento, a narração do vídeo diz:

"O mundo científico não sabia o que fazer. Cientistas famosos na Europa, como Lorde Rayleigh, Lorde Kelvin e Lorde Thomson, estavam dizendo: "ei, vamos lá, estamos fazendo algo de errado aqui". O éter tem que existir. E tudo foi resolvido, depois de muitos anos, com Einstein. A teoria da relatividade especial de Einstein propôs que a velocidade da luz é sempre a mesma, independentemente da velocidade da fonte da luz. O resultado do experimento de Michelson e Morley se encaixa perfeitamente com a visão de universo de Einstein, e isto serviu como um ponto crítico para a física moderna. O experimento de Michelson e Morley foi uma experiência tecnológica avançada que transformou a ciência. Não somente a física, mas a ciência" (Handley, 2012, nossa tradução de transcrição do áudio).

Este trecho reproduz a "história" simplificada presente em boa parte dos livros didáticos. Ela aponta o resultado do interferômetro como um momento de ruptura com a física clássica, incapaz de explicá-lo, e resolvido pela "revolucionária" teoria da relatividade. O que nos parece condizente com o recorte adotado pela estudante.

7.2.5 Comentários sobre o seminário

Por último, analisamos a inclusão dos elementos da estrutura da IME neste seminário. A estudante contextualizou historicamente o episódio, e seguiu a ordem cronológica dos fatos. O confronto entre explicações concorrentes também é mencionado, embora não receba o destaque que seria esperado de uma perspectiva centrada nesta questão. É interessante comparar a estrutura do seminário apresentado com o resumo do episódio histórico fornecido à estudante como material suplementar. A estrutura do material complementar já direcionava o seminário para um caso de IME. No entanto, de acordo com o que foi abordado na seção anterior e com os três tópicos omitidos do seminário, é possível identificar um movimento da

²⁶ Professor emérito de Física na Case Western Reserve University, onde foi feito o famoso experimento de Michelson-Morley, na cidade de Cleveland, Estados Unidos.

estudante na direção de afastar a estrutura do seminário apresentado da estrutura da IME, aproximando-o da seqüência simplificada encontrada em livros didáticos.

Essas observações não significam que se esperasse a abordagem de todas estas questões. Lembra-se que a estudante em questão não possuía formação prévia sobre o tema, e não foi instruída suficientemente para abordar questões complexas como essas. Mas esses pontos chamam atenção. Além disso, vale notar que em abordagens históricas é comum ser difícil acessar fontes históricas de qualidade. No entanto, considerando a boa qualidade da referência histórica disponibilizado para a elaboração do seminário em questão, nota-se que o acesso a boas fontes históricas não é suficiente sem um adequado treinamento prévio sobre seu uso e sobre o tipo de questões que são relevantes para a história e a filosofia da ciência. O quadro 7, a seguir, sintetiza as principais questões discutidas na análise deste seminário.

Dimensão	Resumo
Histórica	<ul style="list-style-type: none"> • Concepção ondulatória da luz; • Proposta de um meio de propagação para a luz; • Não menciona o experimento de Fizeau; • Omite avanços teóricos que respaldavam a teoria de Fresnel;
Conceitual	<ul style="list-style-type: none"> • Não aborda as características das aproximações de primeira e de segunda ordem da teoria de Fresnel; • Não aborda a interpretação de Lorentz-Fitzgerald para o resultado do experimento;
Estrutural	<ul style="list-style-type: none"> • Contempla as duas explicações concorrentes; • A complexa avaliação das explicações foi substituída por cenário no qual o experimento refutava a teoria de Fresnel.
Epistêmica	<ul style="list-style-type: none"> • A estrutura do episódio histórico foi modificada pela estudante, aproximando-a da pseudo-história comum em livros didáticos;

Quadro 7 – síntese da análise do seminário II (Teorias Sobre o Éter e os Experimentos de Michelson e Morley).

7.3 Seminário III: Radioatividade

7.3.1 Referências fornecidas

O texto disponibilizado como referência para a produção deste seminário foi o artigo de (Cordeiro & Peduzzi, 2011). Este texto apresenta um estudo histórico do período de desenvolvimento da radioatividade de 1899 a 1913, e tem o objetivo de servir como referencial para discussões relativas à Natureza da Ciência e a aspectos do trabalho científico. Este texto aponta eventos históricos relevantes, relacionando o estudo da radioatividade e o surgimento do modelo atômico de Rutherford. Diferente do seminário anterior, a referência utilizada para abordar este episódio histórico não adota o conflito entre explicações concorrentes como ponto central. No entanto, são apresentadas hipóteses concorrentes, propostas pelo casal Curie, sobre a natureza da radioatividade durante os primeiros anos de investigação sobre este tema. Dessa forma, também foi disponibilizado ao estudante um texto complementar (apêndice G), com resumo deste artigo e a proposta de uma estrutura para o seminário, focada nessa discussão.

7.3.2 Resumo breve do episódio histórico

7.3.2.1 Contexto histórico

A descoberta da radioatividade costuma ser atribuída a Becquerel em 1896, embora o termo tenha sido cunhado posteriormente pelos Curie (Cordeiro & Peduzzi, 2011). Em 1898, madame Curie apresenta à Academia Francesa de Ciências suas primeiras constatações acerca do fenômeno. Utilizando a propriedade da radiação do urânio de ionizar o ar em sua vizinhança, ela relata que, além do urânio e de seus compostos, também o tório emitia o mesmo tipo de radiação. Essa investigação levou à descoberta dos elementos químicos polônio e rádio.

Em 1899, Rutherford, então no Canadá, conduziu diversos experimentos com o urânio. Os experimentos consistiam em medir a radiação que ultrapassava diversas camadas finas de metal. Isto o levou à seguinte conclusão: estão presentes na radiação do urânio ao menos dois tipos distintos de radiação. Uma que é muito rapidamente absorvida, denominada de radiação alfa, e outra, de caráter mais penetrante, que foi chamada de radiação beta (Cordeiro & Peduzzi, 2011). Um terceiro tipo de radiação, muito penetrante e que não era desviada por campos elétricos (a radiação gama), seria identificado em 1900, por Paul Ulrich Villard (Martins, 1990).

7.3.2.2 *A ideia de desintegração nuclear*

Em 1899, Giesel identificou que a deflexão de raios beta na presença de um campo magnético ocorria na mesma direção que a deflexão de raios catódicos, sugerindo uma carga negativa para a radiação beta. Também chamou a atenção dos cientistas que a radiação pouco penetrante, que Rutherford classificou como alfa, era responsável pela maior parte da ionização observada na vizinhança de uma substância radioativa, e que a maior parte da energia irradiada era na forma de raios alfa (Cordeiro & Peduzzi, 2011). Conforme se conseguia enriquecer cada vez mais o rádio, mais os cientistas aceitavam a hipótese de que, além de ter natureza atômica, a partícula alfa seria um átomo de algum elemento leve. A inclinação ao átomo de hélio encontrou apoio nos experimentos químicos de Ramsay e Soddy, em 1903. Eles fizeram análises espectrais dos produtos radiados pelo rádio, identificando que, depois de algum tempo, o espectro do hélio aparecia com linhas muito bem definidas.

Antes disso, o casal Curie propôs em 1899 duas hipóteses sobre a energia gerada nos processos radioativos. A primeira delas supunha que as substâncias radioativas, por serem compostas por átomos pesados, retiravam radiações do meio e as reemitiam - uma hipótese de cunho gravitacional. A segunda hipótese seria de que as substâncias radioativas estivessem emitindo as radiações - levando a crer que aqueles átomos estavam em transformação constantemente. Dmitri Mendeleiev estava entre os que discordavam da segunda ideia, por considerar que os átomos eram imutáveis.

Entre 1902 e 1903 Rutherford e Soddy passaram a trabalhar sobre a segunda hipótese, pesquisando compostos de rádio, urânio e, especialmente, tório²⁷. Foi identificado um comportamento anômalo na série de desintegração do tório, com a radioatividade do tório se mantendo constante²⁸. A explicação dada para este efeito foi que a radioatividade constante possuída pelo tório estaria em um valor de equilíbrio. A taxa de aumento da radioatividade – devido à produção de material novo – é balanceada pela taxa de decaimento do tório formado.

Foi a partir da confirmação desse efeito que se adotou a hipótese da desintegração atômica. Uma série de experimentos foi realizada com emanações do tório, concluindo-se que a radioatividade é um fenômeno atômico acompanhado por mudanças químicas nas quais novos tipos de matéria são produzidos. Esses resultados apresentavam a primeira evidência de mudanças químicas a nível subatômico, dando respaldo à teoria da desintegração dos elementos. Foi aí que as mudanças radioativas, que ocorrem no núcleo dos átomos, foram separadas das mudanças químicas que ocorrem na eletrosfera.

7.3.2.3 Natureza das partículas alfa, radioatividade e tabela periódica

A compreensão definitiva da natureza da partícula alfa veio em 1909, quando Rutherford e Royds publicaram um artigo com resultados de um experimento realizado em 1908. O experimento isolava as partículas geradas por emissões alfa e analisava seu espectro. Este foi um resultado convincente de que a partícula alfa consiste de um átomo de hélio sem elétrons.

Quando a partícula alfa foi identificada como um átomo de hélio duplamente ionizado e a partícula beta como um elétron, a valência e a massa dos átomos passaram a ser utilizadas para localizar os produtos radioativos na tabela periódica. Cientistas, como Von Hevesy, tentaram identificar a relação entre a valência dos elementos antes e depois das emissões radioativas. Fajans foi o primeiro a posicionar, em termos de valências e massas, as substâncias primárias, seus produtos intermediários e os produtos finais na tabela periódica. Então, a emissão de partículas alfa e beta foi explicada; com a expulsão de um raio alfa, o

²⁷ Foi durante este período que Rutherford e Soddy enunciaram o conceito de meia-vida e constataram que as partículas alfa possuem carga positiva.

²⁸ O texto se refere aqui ao “equilíbrio secular da radioatividade”: em alguns processos radioativos, à medida que um elemento se desintegra, formando outro, esse segundo elemento também se desintegra à mesma velocidade. Isto causa um equilíbrio na quantidade desse isótopo por um longo tempo.

produto resultante é mais leve e eletroquimicamente positivo; enquanto no caso da expulsão do raio beta, o produto é mais eletroquimicamente negativo.

7.3.3 Transcrição do seminário

Participantes: Estudante 3; Pesquisador; e Professor da disciplina (Professor).

Tempo de gravação: 54 minutos e 19 segundos.

00:10

((A apresentação foi feita por meio do quadro branco))

1 **Estudante 3:** ((escreve Radioatividade no quadro)) Até então, a gente não tocou nesse
 2 assunto. O que é esse fenômeno da radioatividade? Basicamente, existem alguns materiais
 3 que as propriedades, principalmente do ar, se modificam perto deles. Por exemplo, a presença
 4 súbita de carga elétrica no ar, o ar ficar ionizado. Ou detectar a presença de radiação, ou de
 5 calor, em torno desses elementos. Existem alguns elementos que estão associados a uma
 6 liberação de energia. E esses elementos ficaram conhecidos como elementos radioativos. Eu
 7 tenho aqui a minha colinha ((consulta anotações)), porque são várias datas e vários nomes que
 8 eu aprendi recentemente. Eu vou citar um pequeno contexto histórico aqui antes. A história da
 9 descoberta da radioatividade. Basicamente, o primeiro fenômeno associado com a
 10 radioatividade foi relatado em 1896 por Becquerel ((escreve no quadro enquanto fala)). Ele
 11 foi o primeiro que descreveu o fenômeno da radioatividade. /.../ Então, em 1898 a madame
 12 Curie faz alguns estudos, e ela descobre dois elementos radioativos, o polônio e o rádio. Em
 13 1899, o senhor Rutherford, que a gente já viu, conduziu experimentos com outro elemento
 14 radioativo, o urânio. E, basicamente, o que ele fez foi pegar o urânio e identificar que esse
 15 elemento químico está emitindo dois tipos de radiação. Ele detectou que esse elemento
 16 químico conseguia produzir uma radiação que tinha um baixo poder de penetração nos
 17 materiais. Isso aqui era uma chapa fina de metal ((faz desenho no quadro)) que tem certa
 18 espessura. Então, um tipo de radiação passava pela chapa e outro tipo de radiação era
 19 absorvido facilmente. Ele classificou essas radiações como dois tipos diferentes. Essa aqui,
 20 que passa pela chapa, é uma radiação mais penetrante, e ele chamou de radiação beta. E essa
 21 outra radiação, mais rapidamente absorvida, ele chamou de radiação alfa. /.../ E com o passar
 22 do tempo, e o progresso desses estudos, as pessoas começaram a perceber que esses
 23 fenômenos radioativos poderiam estar associados com a desintegração nuclear desses
 24 elementos. Então eu gostaria de chamar atenção para algumas evidências que suportam essa
 25 hipótese. A primeira delas foi feita em 1899, pelo Giesel /.../. Ele identifica que a radiação
 26 beta, a penetrante, sofre um desvio em um campo magnética, idêntico ao desvio dos raios
 27 catódicos. Esse Giesel faz esse experimento ((desenha esquema no quadro enquanto fala)): ele
 28 pega a radiação beta que sai do núcleo de um elemento radioativo. Nessa região tem um
 29 campo magnético B, entrando no quadro. Quando os raios catódicos atravessam essa região
 30 com velocidade para cá ((sentido horizontal para a esquerda)), os raios catódicos sofrem uma
 31 deflexão nessa direção ((para baixo)). E a radiação beta sofre uma deflexão junto com esses
 32 raios catódicos. Então essa seria uma evidência de que a radiação beta era, na verdade,
 33 elétrons. Ele também conclui que a radiação alfa é a maior responsável pela energia envolvida
 34 na radiação. E, em 1903, teve outro experimento interessante, feito por Basay e Soddi. Eles
 35 fazem o seguinte: eles confinam a radiação alfa em uma câmara. Eles trabalham com o
 36 elemento rádio, descoberto pela madame Curie, que se sabe que é radioativo. /.../ E, através de

37 análises espectroscópicas, eles conseguem ver que a assinatura espectroscópica da radiação
38 alfa, que fica confinada aqui dentro, é a mesma assinatura do hélio. /.../ Então, olha só: a
39 desconfiança é que a radiação beta é muito parecida com, ou pode ser, um elétron, e a
40 radiação alfa é muito parecida, ou pode ser, um átomo de hélio. Então, a essa altura, existiam,
41 basicamente, duas hipóteses, formuladas pelo casal Curie, para explicar essas características.
42 A primeira delas seria a hipótese de que esses elementos radioativos absorvem parte da
43 radiação em torno deles, reemitindo-a na forma de radiação beta e alfa. Eles têm meio que
44 uma interpretação gravitacional. Como se, de alguma forma, os elementos radioativos
45 conseguissem absorver certos tipos de radiação e expulsar essa energia na forma de radiação.
46 Essa era a primeira hipótese. /.../ Isso tinha um cunho gravitacional. Sabia-se que esses
47 átomos radioativos eram muito pesados. Então, tu podia imaginar que, de alguma forma, ele
48 atraía as coisas, nesse sentido gravitacional, e, conseqüentemente, ele acumula energia, dando
49 um *outburst*, que seria a radiação. E a segunda hipótese, que foi a vencedora depois, é que os
50 átomos radioativos emitem a radiação, isto é, se transformam constantemente. Então a
51 radiação parte do átomo e ele se transforma. A gente vai ver as leis sob as quais isso ocorre.

52 **Professor:** isso parece muito absurdo.

53 **Pesquisador:** o quê? A segunda?

54 **Professor:** É. Essa segunda parece muito absurda. Na verdade, significa que os átomos foram
55 criados em algum momento como eles são, ficaram assim, e, de repente, resolveram decair.

56 **Pesquisador:** nessa época estava surgindo o modelo de Dalton, o modelo de Thomson. Mas
57 quando a ideia de átomo surgiu, que é uma ideia antiga dos gregos, qual era a etimologia do
58 termo?

59 **Professor:** indivisível.

60 **Pesquisador:** indivisível. Então, não era intuitivo que o átomo se quebrasse em pedaços
61 menores. Tu vai falar do Mendeleiev?

62 **Estudante 3:** quem?

63 **Pesquisador:** o cara que propôs a tabela periódica.

64 **Estudante 3:** não.

65 **Pesquisador:** Ele propôs a tabela periódica. E ele achava absurdo que átomos se quebrassem,
66 por definição. Muita gente foi resistente a essa segunda ideia e, para eles, a origem da
67 radioatividade não poderia ser a desintegração dos átomos. Tinha que ser outra coisa, por
68 definição.

69 **Estudante 3:** É. Porque se espontaneamente está surgindo hélio aqui, e o hélio tem o seu
70 próprio número atômico, teve que vir de algum lugar.

71 **Pesquisador:** o átomo não poderia se transformar no outro, eles seriam indivisíveis. /.../

72 **Estudante 3:** ((escreve as duas hipóteses no quadro)). Então a hipótese vencedora foi essa
73 aqui ((a segunda)). Teve um experimento, entre 1902 e 1903, em que Rutherford e Soddy
74 usam o elemento químico tório. Por que o tório? Porque quando o tório decai em radiação
75 alfa, o subproduto resultante do decaimento do tório decai a uma mesma taxa. Então, vamos
76 supor que tenha uma determinada quantidade de material radioativo. Sabia-se que quanto
77 mais o tempo passava, menos radiação ela emitia. Só que o tório durava longos períodos de
78 tempo emitindo uma mesma quantidade de radiação. Por quê? Porque o subproduto do tório,
79 ou seja, o elemento no qual ele se transforma depois que decai, decai com a mesma taxa do
80 tório. Então, é como se ele não tivesse decaído em primeiro lugar. A taxa de decaimento se
81 mantinha constante. Isso deu um grande suporte à ideia da desintegração do núcleo. /.../ Então
82 todas essas evidências deram suporte justamente para essa ideia. Então vamos supor que, no
83 início, a gente tenha um elemento radioativo A. Com o passar do tempo, esse elemento
84 químico A se transforma em outro elemento químico B, que pode ser ou não radioativo. /.../

19:34

Depois disso, o estudante começou uma aula tradicional sobre a radioatividade. Apresentou as duas leis de Soddy e as reações químicas envolvidas na emissão de partículas alfa e beta. Em seguida, resolveu um exemplo numérico e comentou sobre aplicações da radioatividade e a radiação gama. O seminário terminou com abordagem dos conceitos de meia-vida e vida média, comentário sobre a datação por carbono 14 e solução de exercício numérico, calculando a idade de uma amostra por esta técnica. A transcrição deste trecho foi omitida desta seção, por fugir do foco da presente pesquisa.

7.3.4 análise do seminário

Devido à organização do texto utilizado como referência histórica, os eventos abordados não são imediatamente transladáveis à estrutura da IME, como dito na seção 7.3.1. No entanto, entende-se que o material fornecido ao estudante fornecia subsídios suficientes para a produção de um episódio breve de IME. Portanto, será a partir deste quadro que o presente seminário será analisado, como desenvolvido nos próximos parágrafos. Esta análise também é complementada com algumas informações históricas.

7.3.4.1 contexto histórico

Na dimensão histórica deste seminário são analisados os eventos relacionados ao surgimento do conceito de radioatividade. Na apresentação do estudante, o conceito é introduzido como algo desconhecido, que vai gradualmente adquirindo as características conhecidas atualmente (e.g., existirem diferentes tipos de radiação, seu poder de penetração, carga elétrica e relação com a desintegração nuclear). Quando a história deste contexto é analisada com maior detalhe, identifica-se que a radioatividade começou, na realidade, a ser estudada como uma variação dos raios-x, seguindo um caminho tortuoso até que essas características fossem conhecidas. Aquilo que atualmente é chamado de "radioatividade" é um fenômeno no qual certos tipos de núcleos atômicos se desintegram espontaneamente, se transformando em núcleos diferentes e emitindo radiações penetrantes de alta energia (Martins, 2003). Não foi isso, no entanto, que Becquerel descobriu em 1896 ao perceber que certos compostos do urânio emitiam radiações penetrantes. No final do século XIX, não se pensava que os átomos tinham um núcleo (Martins, 1990). Segundo Martins (2003),

Becquerel não imaginou que estava diante de algum tipo de fenômeno de transformação atômica, e também não percebeu que havia diferentes tipos de radiações²⁹. Além disso, durante os primeiros anos de investigação do fenômeno que chamamos de "radioatividade", ainda não havia uma teoria propriamente dita sobre esse fenômeno. Durante essa fase pré-teórica, o trabalho de investigação científica era guiado por analogias e conjecturas (Martins, 2003).

Isto chama a atenção, mais uma vez, para o risco de interpretar o passado anacronicamente, atribuindo características do conhecimento científico atual a situações do passado, anteriores ao seu desenvolvimento. Esta é uma reflexão relevante para a análise do contexto histórico deste seminário. Nele, é apresentada uma série de experimentos que contribuíram para construir o conhecimento subsequente sobre radioatividade. No entanto, apenas evidências favoráveis à concepção atual de radioatividade foram apresentadas, o que simplifica o complexo cenário no qual este domínio conceitual surgiu. Por outro lado, em qualquer abordagem histórica algum tipo de recorte se faz necessário. Dessa forma, o ponto passa a ser se o recorte adotado é adequado para atingir os objetivos almejados nesta atividade. Assim, nesta análise, o recorte histórico apresentado será considerado adequado, dada a sua concordância com o texto utilizado como referência histórica e as demandas da atividade em questão, desde que os limites que acabaram de ser apontados sejam reconhecidos.

No início deste desenvolvimento conceitual, as explicações propostas não constituíam teorias bem fundamentadas teoricamente, ou respaldadas empiricamente. Estavam mais para um caráter especulativo e tentativo³⁰. Faltava muita coisa ser compreendida. As radiações emitidas eram iguais aos raios-x? De onde vinha a energia liberada por esses materiais? Por que alguns elementos são radioativos e outros não? Nada disso havia sido esclarecido. E também não havia suspeita de que a radioatividade acarretasse em transformações de um elemento químico em outro. O nome "radioatividade" existia, introduzido pelos Curie em

²⁹ O texto de Martins (1990) aponta como o contexto entre o fim de 1895 e 1898 era confuso e complexo. Becquerel reproduziu experimentos feitos por outros cientistas, interpretando equivocadamente diversos efeitos. O que justifica, na opinião deste autor, que seja um equívoco atribuir a Becquerel a "descoberta" da radioatividade.

³⁰ Para a radioatividade ser completamente entendida, o desenvolvimento da mecânica quântica era necessário. Só em 1928 o tipo de radioatividade chamado de decaimento alfa foi explicado teoricamente, tratando-se de um caso de efeito túnel (Fröman, 1996).

1899, mas não se conhecia ainda o complexo fenômeno que recebe esta denominação atualmente (Martins, 1990).

7.3.4.2 Sobre explicações concorrentes

Quanto às hipóteses que buscaram explicar o fenômeno da radioatividade, as duas explicações discutidas pela referência histórica, e pelo texto de apoio fornecido ao estudante, foram incluídas na apresentação do seminário. No entanto, as crenças de fundo nas quais cada uma das explicações se baseou foram abordadas parcialmente. Comentou-se que os átomos radioativos eram átomos pesados, o que respaldava a hipótese gravitacional. No entanto, o principal argumento contra a hipótese da desintegração nuclear era a crença de que os átomos eram indivisíveis, o que foi ignorado pelo estudante (informação comentada pelo pesquisador).

Como o embate entre explicações concorrentes foi brevemente abordado na referência histórica fornecida ao estudante, e por consequência no seminário apresentado por ele, aqui são destacadas algumas características desse episódio a fim de complementar sua dimensão conceitual. Dois dos investigadores franceses que se dedicaram ao estudo de descargas elétricas produzidas pelos raios-x foram Jean Perrin e Georges Sagnac. Perrin notou que quando os raios-x atravessam o ar entre as duas placas metálicas de um capacitor, esse ar é ionizado, passando a conduzir eletricidade. Além disso, o efeito se torna maior se os raios-x atingirem as placas metálicas (Martins, 2003). Quando Sagnac estudou os metais atingidos pelos raios-x, notou que ocorria emissão de **raios secundários**, que eram mais fortemente absorvidos pela matéria do que os raios-x incidentes. Esses raios secundários (os raios S) produziam forte ionização do ar. Uma espessura de poucos milímetros de ar já produzia uma absorção significativa desses raios secundários, enquanto os raios-x podiam percorrer vários metros no ar (Martins, 2003). Ao comparar a incidência de raios-x sobre o ar, água, alumínio, cobre, zinco e Chumbo, Sagnac notou que os raios secundários eram cada vez menos penetrantes. Os raios secundários produzidos pelo zinco e pelo chumbo, em particular, eram menos penetrantes do que os raio-x emitidos por qualquer fonte conhecida na época. Como será apontado, essas investigações de Sagnac tiveram forte influência sobre os Curie (Martins, 2003).

Em janeiro de 1898, o químico alemão Gerhard Carl Schmidt percebeu que a radiação emitida pelo urânio ionizava o ar e que todos os seus compostos, qualquer que fosse o estado físico ou químico em que se encontrassem, emitiam essas radiações (Martins, 2003). Schmidt procurou por outras substâncias, além do urânio, cuja radiação pudesse ionizar o ar. Ele foi o primeiro a relatar que o tório também emite radiações capazes de ionizar o ar, penetrar através de papel opaco e sensibilizar placas fotográficas (Martins, 2003).

Foi na tentativa de explicar a emissão de radiação pelo urânio e pelo Tório que Marie Curie formulou sua hipótese gravitacional. Em 1898, Curie chama a atenção para o fato de que o urânio e o tório são os elementos de maior peso atômico entre os que eram conhecidos. Diante da enorme duração da radiação, parecia absurdo, na época, que toda a energia emitida (que parecia infinita) tivesse origem no próprio material. Curie supôs que a fonte seria externa, ou seja, que todo o espaço estaria permeado por uma radiação muito penetrante e difícil de ser detectada, que seria absorvida pelos elementos mais pesados e reemitida sob a forma de uma radiação secundária, mais facilmente observável (Martins, 1990).

Essa hipótese da emissão secundária tinha pequena fundamentação teórica, e não havia qualquer evidência de sua existência. No entanto, ela conduziu naturalmente à ideia de que apenas alguns elementos, de alto peso atômico, fossem ativos como o urânio. Essas duas hipóteses, embora sem fundamentação experimental, reforçavam-se mutuamente, e conduziram o pensamento de Marie Curie, sendo responsáveis em grande parte pelo sucesso de suas investigações iniciais (Martins, 2003).

Isto mudou em 1899, quando Marie Curie publicou uma revisão dos trabalhos sobre o assunto. Neste trabalho, ela propôs a hipótese da natureza atômica da radiação que guiaria suas pesquisas posteriores (Martins, 1990). Marie identificou que o poder de ionização da radiação de amostras distintas dependia apenas da quantidade de átomos de certos elementos que ela possuía. Um composto de urânio pode ser um pó escuro, enquanto outro é um cristal amarelo transparente, mas a radiação que eles emitiam era definida apenas pela quantidade de urânio contida em cada amostra. Marie chegou à conclusão de que a habilidade de radiar não depende do arranjo de átomos em uma molécula; ela deveria estar ligada ao interior do átomo (Fröman, 1996). Esta foi uma constatação revolucionária, o que Fröman (1996) considera a contribuição conceitual mais importante que Marie deu para a física.

Quando se analisa o desenvolvimento do trabalho inicial de Marie Curie, a partir de seus cadernos de laboratório e do contexto da época, verifica-se que seu trabalho experimental

não foi guiado por uma busca empírica de novos elementos radioativos, mas sim por um conjunto de hipóteses e uma forte influência dos estudos de Sagnac sobre a radiação secundária emitida pelos metais atingidos por raios-x (Martins, 2003). A hipótese da natureza atômica da radioatividade foi essencial nas investigações do casal Curie e continuou fértil nas pesquisas de Rutherford, Soddy e Ramsay (Cordeiro & Peduzzi, 2011). Rutherford e Soddy apresentaram a teoria das transformações radioativas em cinco artigos publicados entre novembro de 1902 e maio de 1903 (Martins, 1990). Foram esses trabalhos que estabeleceram as linhas gerais da visão moderna sobre radioatividade, com outros aspectos sendo compreendidos nos anos seguintes.

7.3.4.3 Avaliação das explicações

Ao considerar como o processo que levou à escolha da explicação vencedora foi abordado no seminário, parece, em princípio, que esta questão foi ignorada, com o estudante apontando rapidamente a explicação vencedora (linha 72). No entanto, em um trecho anterior foram apresentadas evidências que teriam convencido os cientistas da adequação da hipótese da desintegração nuclear:

E com o passar do tempo, e o progresso desses estudos, as pessoas começaram a perceber que esses fenômenos radioativos poderiam estar associados com a desintegração nuclear desses elementos. Então eu gostaria de chamar atenção para algumas evidências que suportam essa hipótese. (linha 21).

As três evidências que foram mencionadas são: 1) Giesel identificar a curvatura na trajetória da radiação beta ao percorrer um campo magnético, em 1899; 2) a maior parte da energia da radiação ser devida à radiação alfa; e 3) a análise espectral da partícula alfa, realizada por Basay e Soddy em 1903. Estas poderiam ter sido apresentadas como evidências para a escolha entre as explicações concorrentes, mas as informações foram mencionadas muito antes das duas explicações terem sido apresentadas. Além disso, algumas dessas evidências surgiram após os Curie terem abandonado a hipótese gravitacional, em 1899.

Estas evidências constituem virtudes explicativas em defesa da hipótese de desintegração, embora não tenham sido explicitamente apresentadas dessa forma. Já as crenças de fundo nas quais ambas as explicações se baseavam não foram abordadas. Isto compromete a dimensão estrutural do seminário. Além disso, a forma como as informações

foram apresentadas, com as características conceituais sendo introduzidas a partir de resultados experimentais, favorece uma interpretação empirista-indutivista do fazer científico.

7.3.4.4 Dimensão epistêmica

Muitas questões diferentes podem ser abordadas a partir de um mesmo episódio histórico. Martins (1990), por exemplo, foca a abordagem deste episódio na contribuição de Becquerel, considerado o “descobridor” da radioatividade, do que o autor discorda. Já Cordeiro e Peduzzi (2011) focam nas contribuições de Rutherford e seus colaboradores, no período que os autores chamam de “desenvolvimento da radioatividade”. Por fim, Fröman (1996) foca na trajetória individual do casal Curie, com destaque para a trajetória de Marie, uma mulher estrangeira ingressando na academia francesa de ciência na virada do século XX.

O artigo fornecido como referência para a produção deste seminário apontava questões epistemológicas que podem ser abordadas a partir deste episódio histórico, que os autores chamaram de: a recusa a um método científico único; a recusa da indução a partir de "dados puros" e a investigação do pensamento divergente; a busca pela coerência global; e a compreensão do caráter social do trabalho científico (Cordeiro & Peduzzi, 2011). Considerando que estes sejam exemplos suficientes de temas que poderiam ser abordados na dimensão epistêmica de um seminário sobre este episódio histórico, essas questões não serão aprofundadas aqui.

7.3.5 Comentários sobre o seminário

Este foi um seminário longo, e com um volume considerável de informação. No entanto, o estudante demonstrou domínio e capacidade didática para abordar todas as questões às quais se propôs, sendo elogiado por todos os presentes. O confronto entre explicações não representava uma questão central para a referência histórica disponibilizada ao estudante, o que também não ocorreu no seminário apresentado. Essa questão será abordada na seção seguinte. O quadro 8, a seguir, resume as questões discutidas nesta análise até aqui.

Dimensão	Resumo
Histórica	<ul style="list-style-type: none"> • O contexto histórico apresentado foi resumido e simplificado, porém condizente com a referência histórica utilizada.
Conceitual	<ul style="list-style-type: none"> • Ausência de detalhes interessantes, que não foram mencionados na referência adotada; • Os conceitos abordados foram adequadamente empregados;
Estrutural	<ul style="list-style-type: none"> • Duas explicações foram incluídas na apresentação do seminário. • As crenças de fundo nas quais cada uma das explicações se baseava foram abordadas parcialmente.
Epistêmica	<ul style="list-style-type: none"> • Informações foram apresentadas de modo que favorece uma interpretação empirista-indutivista do fazer científico.

Quadro 8 – síntese da análise do seminário III (radioatividade).

7.4 Conclusões do estudo III

A análise desses três seminários permitiu identificar dificuldades manifestas por estes estudantes na execução da abordagem proposta: (1) Dominar teorias científicas de um período histórico que diferem das teorias atualmente utilizadas. Isto vale para as teorias “derrotadas”, que são muitas vezes desconhecidas e ignoradas pelo ensino de Física; e também para as teorias vencedoras, uma vez que se faz necessário distinguir entre o conhecimento daquele contexto histórico e como este conhecimento é compreendido atualmente. (2) abordar a complexidade dos embates científicos, quando estudados em profundidade. Resumos históricos geralmente apresentam uma única evidência como justificativa para uma transformação no conhecimento científico – geralmente na forma de um “experimento crucial” ou do surgimento de uma teoria revolucionária. Abordar episódios históricos com a profundidade almejada por esta perspectiva, no entanto, pode se tornar uma tarefa

consideravelmente complexa. (3) Além disso, os estudantes demonstraram dificuldade em identificar as discussões epistemicamente relevantes dos episódios históricos considerados, o que pode ser atribuído, em grande parte, a não terem recebido instrução prévia sobre história, filosofia e sociologia da ciência.

Adicionalmente, a atividade demanda tempo e dedicação para ser bem executada. Aplicar a lógica da IME implica uma mudança de estrutura narrativa. Em vez da sequência indutiva de uma série de experimentos que conduz a um resultado cada vez mais complexo/geral, ou de desenvolvimentos teóricos revolucionários realizados por um indivíduo genial, a IME adota um olhar mais amplo e, conseqüentemente, mais complexo do desenvolvimento científico. Quanto a isto, deve-se reconhecer que os estudantes que participaram do estudo não receberam um treinamento adequado para dominar a estratégia, o que é agravado pelas limitações discutidas na seção 6.1.4.

Por fim, este estudo possui uma característica peculiar. Nos seminários analisados, os estudantes necessitam atender a duas demandas distintas: abordar os episódios históricos, por um lado, e cobrir o conteúdo “tradicional” previsto para o seminário em questão, por outro. Demandas como essas entrarão, com frequência, em conflito. Um exemplo é o seminário do estudante 3. Este seminário pode ser dividido em duas partes, com a segunda parte correspondendo ao trecho comentado no fim da seção 7.3.3, cuja transcrição foi omitida. Neste caso, nota-se que cada um desses trechos estava voltado a atender a uma dessas tarefas. Além disso, os seminários I e III apontam como o confronto de explicações pode se tornar uma questão periférica em seminários desse tipo, sobretudo nos casos em que a referência histórica adotada não destaque, com centralidade, os embates explicativos nos quais esta perspectiva se concentra. Estas são alguns dos desafios com que professores e pesquisadores interessados na proposta terão que lidar em alguma medida.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste trabalho, buscou-se desenvolver e implementar uma proposta para abordar episódios da história da Ciência por meio da integração entre (a) discussões sobre a natureza do conhecimento científico realizadas pela IME e (b) noções sobre NdC defendidas pela visão consensual no ensino de Ciências. No Estudo I foi desenvolvida uma estrutura para a abordagem a partir da articulação destas duas perspectivas, sintetizada no quadro 1.

Durante a implementação da proposta optou-se pelo uso de episódios históricos sobre conteúdos de Física Moderna. O Estudo II buscou evidenciar características básicas do emprego desta perspectiva. Este estudo ilustra a necessidade, ao abordar episódios históricos, de que a apresentação dos argumentos em defesa de cada lado envolvido não seja enviesada. Para que um embate epistêmico autêntico seja apresentado, as duas (ou mais) explicações concorrentes precisam se basear em argumentos plausíveis. Tentou-se destacar isso na abordagem do primeiro episódio histórico deste estudo, o efeito fotoelétrico. Nesse caso, não se focou em descrever os detalhes das explicações alternativas à explicação de Einstein, mas considera-se que, ao destacar a resistência enfrentada pela explicação de Einstein, e pela explicação de Lenard ter sido considerada a melhor explicação por um tempo, conseguiu-se – dentro de todo o recorte e simplificação que implica em uma abordagem didática – preservar a existência de um confronto genuíno entre as explicações envolvidas. Com este estudo, buscou-se também problematizar os critérios que os cientistas do período histórico em questão utilizaram para avaliar as explicações disponíveis, além de combater mitos que são tipicamente utilizados no ensino de Ciências para caracterizar a atividade científica. Com esse respeito, utilizou-se, no episódio sobre a quantização da energia, o conceito de “unidades de descoberta” para problematizar interpretações sobre a origem da teoria quântica.

Já no Estudo III foram analisadas aulas produzidas por três estudantes de licenciatura em Física, instruídos a abordar episódios históricos segundo esta perspectiva. Este estudo permitiu identificar dificuldades associadas a colocar esta proposta em prática, principalmente no caso de usuários com pouca experiência com discussões da história, filosofia e sociologia da ciência. As principais dificuldades encontradas foram: dominar as teorias científicas do período histórico específico; abordar a complexidade dos embates científicos, quando estudados em profundidade; e identificar discussões epistemicamente relevantes sobre os episódios históricos considerados.

Entre as possíveis contribuições desta pesquisa destacam-se: integrar conhecimentos da história, filosofia e ensino de Ciências de modo que, espera-se, possa ser utilizado na formação de professores e, possivelmente, na educação básica. Um possível mérito deste trabalho é a capacidade de integrar múltiplas discussões valorizadas pela literatura especializada em ensino de Ciências. Vale ressaltar, como abordado na seção 1.4, que é ingênuo esperar que uma abordagem como esta seja suficiente para superar toda a dificuldade encontrada por aqueles que tentam ir além da quase-história presente nos livros didáticos. Fatores que dificultam esta prática incluem: a falta de materiais didáticos adequados para abordar HFSC; necessidade de um quadro instrucional que dê suporte para a HFSC; e um ensino tradicional voltado a cobrir grandes quantidades de conteúdo, atender a avaliações externas e resistente a propostas de reformulação do ensino. O problema é complexo, envolve questões políticas e precisa ser atacado por muitas frentes. A proposta e implementação de quadros instrucionais, como o apresentado neste trabalho, é apenas uma dessas demandas.

Como a abordagem apresentada neste trabalho consiste, basicamente, em explorar o confronto (historicamente situado) entre pontos de vista distintos, ela se aproxima, em alguma medida, do que tem sido feito no ensino de Ciências em trabalhos sobre argumentação científica. Um exemplo são os trabalhos que adaptam o modelo argumentativo de Toulmin (e.g., Nascimento & Vieira, 2008; Sadler & Donnelly, 2006) para o ensino de Ciências. O foco principal de trabalhos sobre argumentação, como os citados, está em conectar hipóteses produzidas com as evidências disponíveis, por meio de justificativas racionais. Um mérito de nossa abordagem baseada na IME é discutir, também, os critérios utilizados para avaliar as hipóteses propostas. Nesta perspectiva, deve-se sempre levar em consideração a existência de diferentes crenças de fundo utilizadas para avaliar um mesmo conjunto de explicações.

Expandindo o âmbito de discussão além do domínio científico, pode-se pensar sobre a discordância sobre um tema controverso qualquer (e.g., legalização do aborto, porte de armas de fogo, etc). Debates desse tipo também podem ser analisados a partir do olhar da IME. Em situações como essas, os defensores de ambos os lados consideram possuir a melhor explicação sobre a decisão que deve ser tomada. Um mérito de abordar questões desse tipo, segundo esta perspectiva, é fazer com que os alunos, ao se depararem com opiniões/posições divergentes sobre um mesmo tema, tornem-se capazes de entender uma questão complexa a partir de múltiplas perspectivas, inclusive se colocando no lugar dos defensores de posições contrárias às suas. Isto possibilita entender que, com respeito a muitas questões complexas, não existe uma única escolha certa, mas sim uma pluralidade de opções, a partir de diferentes

perspectivas. Este é um foco de trabalhos sobre argumentação, e acreditamos que também possa ser abordado por trabalhos baseados na IME, embora não tenha sido o foco deste trabalho. Este estudo também não se aprofundou em explorar o ponto de vista dos estudantes, como suas percepções e motivações sobre o uso da abordagem. O que também pode ser foco de estudos realizados no futuro.

Gostaríamos de reiterar que a história da Ciência precisa, inevitavelmente, ser incorporada de modo pragmático e adaptado para o contexto educacional. Completude é um ideal que não pode ser alcançado nem mesmo pela história da Ciência profissional. Além disso, as lições aprendidas a partir de estudos históricos podem ser contraproducentes para alguns objetivos almejados pela educação em Ciências. No entanto, embora o dilema seja genuíno, não há razão para isto impedir um ensino de Física historicamente orientado (Kragh, 1992).

Perspectivas históricas que questionem a “visão padrão” da Ciência vêm recebendo destaque, mas ainda há muito trabalho a ser feito até que estas discussões se tornem habituais na educação básica. Deve-se ressaltar, porém, que estas discussões não são propostas para desautorizar a Ciência, nem concluir que se trata de uma atividade arbitrária que os cientistas conduzem como acharem melhor. O objetivo não é incentivar a visão relativística de que a Ciência adota uma quase-metodologia de que vale qualquer coisa (Kragh, 1992). Características centrais de uma discussão abordada segundo a IME vão de encontro a isto: nunca é possível apontar a melhor explicação absoluta. Ao se inferir a melhor explicação, este ato é fundamentalmente influenciado pelas crenças de fundo consideradas. Mas existem boas razões para que a Ciência utilize um conjunto particular de crenças de fundo em detrimento de outras, e acreditamos ser fundamental que aspectos como estes sejam abordados explicitamente no ensino de Ciências.

REFERÊNCIAS

- Abd-El-Khalick, F. (2012). Examining the Sources for our Understandings about Science: Enduring confluences and critical issues in research on nature of science in science education. *International Journal of Science Education*, 34(3), 353–374. <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.629013>
- Abd-El-Khalick, F. (2013). Teaching With and About Nature of Science, and Science Teacher Knowledge Domains. *Science and Education*, 22(9), 2087–2107. <https://doi.org/10.1007/s11191-012-9520-2>
- Abd-El-Khalick, F., Bell, R. L., & Lederman, N. G. (1998). The nature of science and instructional practice: Making the unnatural natural. *Science Education*, 82(4), 417–436. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:The+Nature+of+Science+and+Instructional+Practice:+Making+the+Unnatural+Natural#0>
- Abd-El-Khalick, F., Boujaoude, S., Duschl, R., Lederman, N. G., Mamlok-Naaman, R., Hofstein, A., Niaz, M., Treagust, D., & Tuan, H. L. (2004). Inquiry in science education: International perspectives. *Science Education*, 88(3), 397–419. <https://doi.org/10.1002/sce.10118>
- Abd-El-khalick, F., & Lederman, N. G. (2000). Improving science teachers' conceptions of nature of science: A critical review of the literature. *International Journal of Science Education*, 22(7), 665–701. <https://doi.org/10.1080/09500690050044044>
- Abd-El-Khalick, F., & Akerson, V. (2009). The influence of metacognitive training on preservice elementary teachers' conceptions of nature of science. *International Journal of Science Education*, 31(16), 2161–2184. <https://doi.org/10.1080/09500690802563324>
- Abd-El-Khalick, Fouad, & Lederman, N. G. (2000). The influence of history of science courses on students' views of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(10), 1057–1095. [https://doi.org/10.1002/1098-2736\(200012\)37:10<1057::AID-TEA3>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/1098-2736(200012)37:10<1057::AID-TEA3>3.0.CO;2-C)
- Acevedo, J. A., Vázquez, A., Paixão, M. F., Acevedo, P., Oliva, J. M., & Manassero, M. A. (2005). Mitos da didática das ciências acerca dos motivos para incluir a natureza da ciência no ensino das ciências. *Ciência & Educação (Bauru)*, 11(1), 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1516-73132005000100001>
- Achinstein, P. (2001). *The book of evidence*. Oxford University Press.
- Akindehin, F. (1988). Effect of an instructional package on preservice science teachers' understanding of the nature of science and acquisition of science-related attitudes. *Science Education*, 72(1), 73–82. <https://doi.org/10.1002/sce.3730720107>
- Allchin, D. (1992). Phlogiston after oxygen. *Ambix*, 39(3), 110–116. <https://doi.org/10.1179/amb.1992.39.3.110>
- Allchin, D. (1997). Rekindling phlogiston: from classroom case study to interdisciplinary relationships. *Science and Education*, 6, 473–509.
- Allchin, D. (2004). Pseudohistory and Pseudoscience. *Science & Education*, 13(3), 179–195.

<https://doi.org/10.1023/b:sced.0000025563.35883.e9>

- Allchin, D. (2011). Evaluating knowledge of the nature of (whole) science. *Science Education*, 95(3), 518–542. <https://doi.org/10.1002/sce.20432>
- Alters, B. J. (1997). Whose Nature of Science? *Journal of Research in Science Teaching*, 34(1), 39–55. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(199701\)34:1<39::AID-TEA4>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199701)34:1<39::AID-TEA4>3.0.CO;2-P)
- American Association for the Advancement of Science. (1990). *Science for all americans*. Oxford University Press.
- Anderson, R. D. (2002). Reforming science teaching: What research says about inquiry. *Journal of Science Teacher Education*, 13(1), 1–12. <https://doi.org/10.1023/A:1015171124982>
- Anderson, R. D. (2007). Inquiry as an organizing theme for science curricula. In Sandra K. Abell, K. Appleton, & D. L. Hanuscin (Eds.), *Handbook of research on science education* (pp. 807–830). Taylor & Francis group.
- Bagdonas, A. (2020). Propostas para a educação científica com base em estudos de história da física na primeira metade do século XX em uma abordagem transnacional. *Em Construção*, 7, 113–123. <https://doi.org/10.12957/emconstrucao.2020.47774>
- Bagdonas, A., Zanetic, J., & Gurgel, I. (2014). Controvérsias sobre a natureza da ciência como enfoque curricular para o ensino da física: o ensino de história da cosmologia por meio de um jogo didático. *Revista Brasileira de História Da Ciência*, 7(2), 242–260.
- Barros, M. A., & Carvalho, A. M. P. de. (1998). A História da Ciência iluminando o ensino de visão. *Ciência & Educação (Bauru)*, 5(1), 83–94. <https://doi.org/10.1590/s1516-73131998000100008>
- Bell, R. L., Blair, L. M., Crawford, B. A., & Lederman, N. G. (2003). Just do it? Impact of a science apprenticeship program on high school students' understandings of the nature of science and scientific inquiry. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(5), 487–509. <https://doi.org/10.1002/tea.10086>
- Bell, R. L., Lederman, N. G., & Abd-El-Khalick, F. (1998). Implicit versus explicit nature of science instruction: An explicit response to Palmquist and Finley. *Journal of Research in Science Teaching*, 35(9), 1057–1061. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1098-2736\(199811\)35:9<1057::aid-tea6>3.3.co;2-1](https://doi.org/10.1002/(sici)1098-2736(199811)35:9<1057::aid-tea6>3.3.co;2-1)
- Bevilacqua, F., & Giannetto, E. (1996). The history of physics and European physics education. *Science and Education*, 5(3), 235–246. <https://doi.org/10.1007/BF00414314>
- Binnie, A. (2001). Using the History of Electricity and Magnetism to enhance teaching. *Science and Education*, 10, 379–389.
- Boaro, D. A., & Massoni, N. T. (2018). O Uso De Elementos Da História E Filosofia Da Ciência (Hfc) Em Aulas De Física Em Uma Disciplina De Estágio Supervisionado: Alguns Resultados De Pesquisa. *Investigações Em Ensino de Ciências*, 23(3), 110. <https://doi.org/10.22600/1518-8795.ienci2018v23n3p110>
- Boas, A. V., Silva, M. R. da, Passos, M. M., & Arruda, S. D. M. (2013). História da ciência e

natureza da ciência: debates e consensos. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 30(2), 287–322. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2013v30n2p287>

BRASIL. Ministério da Educação. (2018). *Base Nacional Comum Curricular*.

BRASIL. (2000). *Parâmetros Curriculares Nacionais - PCN: Ensino Médio: Ciências Humanas e suas Tecnologias*.

Brewer, W. F., & Chinn, C. A. (1994). The theory-ladenness of data: An experimental demonstration. In A. Ram & K. Eiselt (Eds.), *Proceedings of the Sixteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 61–65). Erlbaum.

Brewer, W. F., Chinn, C. A., & Samarapungavan, A. (2000). Explanation in scientists and children. In F. C. Keil & R. A. Wilson (Eds.), *Explanation and cognition*. MIT Press.

Brickhouse, N., & Bodner, G. M. (1992). The beginning science teacher: Classroom narratives of convictions and constraints. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(5), 471–485. <https://doi.org/10.1002/tea.3660290504>

Brickhouse, N. W. (1989). The teaching of the philosophy of science in secondary classrooms: Case studies of teachers' personal theories. *International Journal of Science Education*, 11(4), 437–449. <https://doi.org/10.1080/0950069890110408>

Briscoe, C. (1991). The dynamic interactions among beliefs, role metaphors, and teaching practices: A case study of teacher change. *Science Education*, 75(2), 185–199. <https://doi.org/10.1002/sce.3730750204>

Brito, A. D. J., Neves, L. D., & Martins, A. F. P. (2004). A História da Ciência e da Matemática na formação de professores. In *Fundamentos do ensino-aprendizagem das ciências naturais e da matemática: o novo ensino médio* (pp. 284–296). Sulina.

Cetina, K. K. (1999). *Epistemic Cultures: How the Sciences Make Knowledge*. Harvard University Press.

Chalmers, A. F. (1993). *O que é Ciência a final?* Editora Brasiliense.

Chambliss, M. J., Christenson, L. A., & Parker, C. (2003). Fourth Graders Composing Scientific Explanations About the Effects of Pollutants: Writing to Understand. *Written Communication*, 20(4), 426–454. <https://doi.org/10.1177/0741088303260504>

Chinn, C. A., & Brewer, W. F. (1993). The Role of Anomalous Data in Knowledge Acquisition: A Theoretical Framework and Implications for Science Instruction. In *Review of Educational Research* (Vol. 63, Issue 1). <https://doi.org/10.3102/00346543063001001>

Clough, M. P. (2011). The Story Behind the Science: Bringing Science and Scientists to Life in Post-Secondary Science Education. *Science and Education*, 20(7), 701–717. <https://doi.org/10.1007/s11191-010-9310-7>

Conant, J. B. (1957). The Overthrow of the Phlogiston Theory: The Chemical Revolution of 1775-1789. In J. B. Conant (Ed.), *Harvard Case Histories in Experimental Science* (Vol. 2). Harvard University Press.

Cordeiro, M. D., & Peduzzi, L. O. Q. (2011). Aspectos da natureza da ciência e do trabalho

- científico no período inicial de desenvolvimento da radioatividade. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 33(3), 3601–3611.
- Cuban, L., Kirkpatrick, H., & Peck, C. (2001). High Access and Low Use of Technologies in High School Classrooms : Explaining an Apparent Paradox. *American Educational Research Journal*, 38(4), 813–834.
- Damasio, F., & Peduzzi, L. O. Q. (2015). O Pior Inimigo Da Ciência: Procurando Esclarecer Questões Polêmicas Da Epistemologia De Paul Feyerabend Na Formação De Professores. *Investigações Em Ensino de Ciências*, 20(1), 97. <https://doi.org/10.22600/1518-8795.ienci2016v20n1p97>
- Darrigol, O. (1992). *From c-Numbers to q-Numbers: the classical analogy in the history of quantum theory*. University of California Press. <https://doi.org/10.1525/9780520328280>
- Dascal, M. (1979). Conversational Relevance. In A. Margalit (Ed.), *Meaning and Use* (pp. 153–174). Reidel.
- Day, T., & Kincaid, H. (1994). Putting Inference to the Best Explanation in Its Place. *Synthese*, 98(2), 271–295. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF01063944>
- Dijk, E. M. (2011). Portraying real science in science communication. *Science Education*, 95(6), 1086–1100. <https://doi.org/10.1002/sce.20458>
- Dobbs, B. J. T. (1975). *The foundations of Newton's alchemy*. Cambridge University Press.
- Dogan, N., & Abd-El-Khalick, F. (2008). Turkish grade 10 students' and science teachers' conceptions of nature of science: A national study. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(10), 1083–1112. <https://doi.org/10.1002/tea.20243>
- Douven, I. (2017). Abduction. In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/sum2017/entries/abduction/>
- Driver, R., Learch, J., Millar, R., & Scott, P. (1996). *Young People's Images of Science*. Open University Press. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/31/3/023>
- Duarte, M. da C. (2004). A história da Ciência na prática de professores portugueses: implicações para a formação de professores de Ciências. *Ciência & Educação*, 10(3), 317–331.
- Duhem, P. M. M. (1991). *The aim and structure of physical theory* (Vol. 13). Princeton University Press.
- Duncan, R. G., Freidenreich, H. B., Chinn, C. A., & Bausch, A. (2010). Promoting Middle School Students' Understandings of Molecular Genetics. *Research in Science Education*, 41(2), 147–167. <https://doi.org/10.1007/s11165-009-9150-0>
- Duschl, R. A., & Grandy, R. (2013). Two Views About Explicitly Teaching Nature of Science. *Science and Education*, 22(9), 2109–2139. <https://doi.org/10.1007/s11191-012-9539-4>
- Duschl, R. A., & Wright, E. (1989). A case study of high school teachers' decision making models for planning and teaching science. *Journal of Research in Science Teaching*,

26(6), 467–501. <https://doi.org/10.1002/tea.3660260602>

- Eflin, J. T., Glennan, S., & Reisch, G. (1999). The nature of science: A perspective from the philosophy of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 36(1), 107–116. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1098-2736\(199901\)36:1<107::aid-tea7>3.0.co;2-3](https://doi.org/10.1002/(sici)1098-2736(199901)36:1<107::aid-tea7>3.0.co;2-3)
- Eijck, M. van, Hsu, P. L., & Roth, W. M. (2009). Translations of scientific practice to “Students’ images of science.” *Science Education*, 93(4), 611–634. <https://doi.org/10.1002/sce.20322>
- El-Hani, C. N. (2007). Notas sobre o ensino de História e Filosofia da Ciência na educação científica de nível superior. *A Pesquisa Em Ensino de Ciências No Brasil*, 1, 293–315.
- Feyerabend, P. (1977). *Contra o Método*. Livraria Francisco Alves.
- Forato, T. C. M., Martins, R. de A., & Pietrocola, M. (2012). History and Nature of Science in High School: Building Up Parameters to Guide Educational Materials and Strategies. *Science and Education*, 21(5), 657–682. <https://doi.org/10.1007/s11191-011-9419-3>
- Friedrich, B., & Herschbach, D. (1998). Space Quantization : Otto Stern’s Lucky Star. *Daedalus*, 127(1), 165–191.
- Friedrich, B., & Herschbach, D. (2003). Stern and Gerlach: How a Bad Cigar Helped Reorient Atomic Physics. *Physics Today*, 56(12), 53–59. <https://doi.org/10.1063/1.1650229>
- Fröman, N. (1996). *Marie and Pierre Curie and the discovery of polonium and radium*. The British Journal of Radiology. <https://doi.org/10.1259/0007-1285-23-271-409>
- Galili, I. (2012). Promotion of Cultural Content Knowledge Through the Use of the History and Philosophy of Science. *Science and Education*, 21(9), 1283–1316. <https://doi.org/10.1007/s11191-011-9376-x>
- Galili, I., & Hazan, A. (2001). Experts’ views on using history and philosophy of science in the practice of physics instruction. *Science and Education*, 10(4), 345–367. <https://doi.org/10.1023/A:1011209131446>
- Gallagher, J. J. (1991). Prospective and practicing secondary school science teachers’ knowledge and beliefs about the philosophy of science. *Science Education*, 75(1), 121–133. <https://doi.org/10.1002/sce.3730750111>
- Gauch, H. G. J. (2012). *Scientific method in brief*. Cambridge University Press.
- Gauld, C. (1992). The Historical anecdote as a “caricature”: a case study. *Research in Science Education*, 22, 149–156.
- Giere, R. N. (1990). *Explaining science: A cognitive approach*. University of Chicago Press.
- Gingras, Y. (2001). What did mathematics do to physics? *History of Science*, 39(4), 383–416. <https://doi.org/10.1177/007327530103900401>
- Gomes, G. G., & Pietrocola, M. (2011). O experimento de Stern-Gerlach e o spin do elétron: Um exemplo de quasi-história. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 33(2). <https://doi.org/10.1590/S1806-11172011000200019>
- Guerra, A., Reis, J. C., & Braga, M. (2004). Uma abordagem histórico-filosófica para o

- eletromagnetismo no ensino médio. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 21(2), 224–248.
- Handley, D. (2012). *Undaunted: The Forgotten Giants of the Allegheny Observatory*. Kinonation.
- Hanson, N. R. (1975). Observação e interpretação. *Filosofia Da Ciência*, 3.
- Harman, G. (1986). Change in View: Principles of Reasoning. In *The Philosophical Quarterly* (Vol. 39, Issue 155). The MIT Press. <https://doi.org/10.2307/2219644>
- Harman, G. H. (1965). The Inference To the Best. *Philosophical Review*, 74(1), 88–95. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/2183532>
- Heering, P. (2000). Getting shocks: Teaching secondary school physics through history. In *Science and Education* (Vol. 9, Issue 4, pp. 363–373). <https://doi.org/10.1023/A:1008665723050>
- Henke, A., & Höttecke, D. (2015). Physics Teachers' Challenges in Using History and Philosophy of Science in Teaching. *Science and Education*, 24(4), 349–385. <https://doi.org/10.1007/s11191-014-9737-3>
- Hobbs, J. R. (2004). Abduction in Natural Language Understanding. *Handbook of Pragmatics*, 724–741.
- Hodson, D. (1993). Philosophic Stance of Secondary School Science Teachers, Curriculum Experiences, and Children's Understanding of Science: Some Preliminary Findings. *Interchange*, 24(1–2), 41–52.
- Holton, G. (1969). Einstein and the “Crucial” Experiment. *American Journal of Physics*, 37(10), 968–982. <https://doi.org/10.1119/1.1975219>
- Höttecke, D. (2000). how and What can we learn from replicating historical experiments? A case study. *Science and Education*, 9, 343–362.
- Höttecke, D., & Silva, C. C. (2011). Why Implementing History and Philosophy in School Science Education is a Challenge: An Analysis of Obstacles. *Science and Education*, 20(3), 293–316. <https://doi.org/10.1007/s11191-010-9285-4>
- Howe, E. M. (2007). Addressing nature-of-science core tenets with the history of science: An example with sickle-cell anemia & malaria. *American Biology Teacher*, 69(8), 467–472. [https://doi.org/10.1662/0002-7685\(2007\)69\[467:ANCTWT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1662/0002-7685(2007)69[467:ANCTWT]2.0.CO;2)
- Howe, E. M., & Rudge, D. W. (2005). Recapitulating the history of sickle-cell anemia research: Improving students' NOS views explicitly and reflectively. *Science and Education*, 14(3–5), 423–441. <https://doi.org/10.1007/s11191-004-1996-y>
- Irwin, A. R. (2000). Historical case studies: Teaching the nature of science in context. *Science Education*, 84(1), 5–26. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(200001\)84:1<5::AID-SCE2>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(200001)84:1<5::AID-SCE2>3.0.CO;2-0)
- Irzik, G., & Nola, R. (2011). A Family Resemblance Approach to the Nature of Science for Science Education. *Science and Education*, 20(7), 591–607. <https://doi.org/10.1007/s11191-010-9293-4>

- Jammer, M. (1966). *The conceptual development of quantum mechanics*. McGraw-Hill Book Company.
- Jardim, W. T., & Guerra, A. (2017). Experimentos Históricos E O Ensino De Física: Agregando Reflexões a Partir Da Revisão Bibliográfica Da Área E Da História Cultural Da Ciência. *Investigações Em Ensino de Ciências*, 22(3), 244–263. <https://doi.org/10.22600/1518-8795.ienci2017v22n3p244>
- Jorio, A., & Frossard, J. V. (2019). *Material de Estudos para Mecânica Quântica Programa de Pós-Graduação em Física, UFMG*.
- Junges, A. L. (2008). Inferência à melhor explicação. *Intuitio*, 1(1), 82–97.
- Junges, A. L., & Massoni, N. T. (2018). O Consenso Científico sobre Aquecimento Global Antropogênico: Considerações Históricas e Epistemológicas e Reflexões para o Ensino dessa Temática. *Revista Brasileira de Pesquisa Em Educação Em Ciências*, 18(2), 455–491. <https://doi.org/10.28976/1984-2686rbpec2018182455>
- Kang, S., Scharmann, L. C., & Noh, T. (2005). Examining students' views on the nature of science: Results from Korean 6th, 8th, and 10th graders. *Science Education*, 89(2), 314–334. <https://doi.org/10.1002/sce.20053>
- Khishfe, R., & Abd-El-Khalick, F. (2002). Influence of explicit and reflective versus implicit inquiry-oriented instruction on sixth graders' views of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(7), 551–578. <https://doi.org/10.1002/tea.10036>
- Kim, S. Y., & Irving, K. E. (2010). History of science as an instructional context: Student learning in genetics and nature of science. *Science and Education*, 19(2), 187–215. <https://doi.org/10.1007/s11191-009-9191-9>
- Kipnis, N. (1998). Theories as models in teaching physics. *Science and Education*, 7, 245–260.
- Klassen, S. (2009). The Construction and Analysis of a Science Story: A Proposed Methodology. *Science & Education*, 18(3–4), 401–423. <https://doi.org/10.1007/s11191-008-9141-y>
- Klopfer, L. E. (1969). the teaching of Science and the history of Science. *Journal of Research in Science Teaching*, 6, 87–95. <https://doi.org/10.4159/harvard.9780674283596.c10>
- Kolstø, S. D. (2000). Consensus projects: Teaching science for citizenship. *International Journal of Science Education*, 22(6), 645–664. <https://doi.org/10.1080/095006900289714>
- Kovács, L. (1996). Great experiments and old apparatus in education. *Science and Education*, 5(3), 305–308. <https://doi.org/10.1007/bf00414319>
- Kragh, H. (1992). A sense of history: History of science and the teaching of introductory quantum theory. *Science and Education*, 1(4), 349–363. <https://doi.org/10.1007/BF00430962>
- Kragh, H. (2000). Max Planck: the reluctant revolutionary. *Physics World*, 13(12), 31–36. <https://doi.org/10.1088/2058-7058/13/12/34>

- Kubli, F. (1999). Historical aspects in physics teaching: using Galileo's work in a new swiss project. *Science and Education*, 8, 1137–1150.
- Kuhn, T. (1998). *A Estrutura das Revoluções Científicas* (5^a edição). Perspectiva.
- Kuhn, T. S. (1978). *Black-Body theory and the Quantum Discontinuity [1894-1912]*. The University of Chicago Press.
- Kuhn, T. S. (1984). Revisiting Planck. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 14(2), 231–252.
- Laburú, C. E., & Carvalho, M. (2005). *Educação científica: controvérsias construtivistas e pluralismo metodológico*. EDUEL.
- Lakatos, I. (1987). *Historia de la ciencia y sus reconstrucciones racionales*. Tecnos.
- Lantz, O., & Kass, H. (1987). Chemistry teachers' functional paradigms. *Science Education*, 71(1), 117–134. <https://doi.org/10.1002/sce.3730710114>
- Lederman, N. (1992). Students' and teachers' conceptions of the nature of science: do they really influence teacher behavior? *Science Education*, 71(4), 721–734.
- Lederman, N. (2006). Nature of science: Past, present, and future. In S.K Abell & N. G. Lederman (Eds.), *Handbook of research on science education* (pp. 831–879). Lawrence Erlbaum.
- Lederman, N. G., & Abd-El-Khalick, F. (1998). Avoiding De-Natured Science: Activities that promote understanding of the Nature of Science. In W. F. McComas (Ed.), *The Nature of Science in Science Education: Rationales and Strategies* (pp. 83–126). Springer.
- Lederman, N. G., & O'Malley, M. (1990). Students' perceptions of tentativeness in science: Development, use, and sources of change. *Science Education*, 74(2), 225–239. <https://doi.org/10.1002/sce.3730740207>
- Lederman, N. G., & Zeidler, D. L. (1987). Science teachers' conceptions of the nature of science: do they really influence teaching behavior? *Science Education*, 71(5), 721–734. <https://doi.org/10.1002/sce.3730710509>
- Lin, H. S., & Chen, C. C. (2002). Promoting preservice chemistry teachers' understanding about the nature of science through history. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(9), 773–792. <https://doi.org/10.1002/tea.10045>
- Lipton, P. (2000). Inference to the best explanation. In W. H. Newton-Smith (Ed.), *A companion to the Philosophy of Science* (pp. 184–193). Blackwell. <https://doi.org/10.4324/9780203470855>
- Lipton, P. (2004). *Inference to the best explanation* (2nd ed.). Routledge.
- Longino, H. E. (1990). *Science as social knowledge: Values and objectivity in scientific inquiry* (p. 277). Princeton University Press.
- Lycan, W. G. (2002). Explanation and epistemology. In P. Moser (Ed.), *The Oxford handbook of epistemology* (pp. 408–433). Oxford University Press.
- Lynch, M. (2001). Is a science peace process necessary? *The One Culture*, 48–60.

- Marandino, M. (2003). A formação inicial de professores e os museus de Ciências. In *Formação docente em Ciências: memórias e práticas* (pp. 59–76). EdUFF.
- Marchlewicz, S. C., & Wink, D. J. (2011). Using the activity model of inquiry to enhance general chemistry students' understanding of nature of science. *Journal of Chemical Education*, 88(8), 1041–1047. <https://doi.org/10.1021/ed100363n>
- Marcuschi, L. A. (2003). *Análise da Conversação* (5th ed.). Ática. <https://doi.org/10.5151/9788580392852-07>
- Martins, A. F. P. (2007). História e Filosofia da Ciência no Ensino: Há Muitas Pedras Nesse Caminho ... *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 24(1), 112–131.
- Martins, A. F. P. (2012). História, filosofia, ensino de ciências e formação de professores: desafios, obstáculos e possibilidades. *Educação: Teoria e Prática*, 22(40), 5–25.
- Martins, A. F. P. (2019). História, Filosofia e Sociologia da Ciência: mais do que nunca! In A. F. P. Martins (Ed.), *Física, Cultura e Ensino de Ciências* (pp. 195–214). Livraria da Física.
- Martins, R. de A. (1990). Como Becquerel não descobriu a radioatividade. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 7, 27–45.
- Martins, R. de A. (2003). As primeiras investigações de Marie Curie sobre elementos radioativos. *Revista Da Sociedade Brasileira de História Da Ciência*, 1(1), 29–41.
- Martins, R. de A. (2015). *A origem histórica da relatividade especial*. Livraria da Física.
- Massoni, N. T., & Moreira, M. A. (2014). Uma análise cruzada de três estudos de caso com professores de física: a influência de concepções sobre a natureza da ciência nas práticas didáticas. *Ciência & Educação (Bauru)*, 20(3), 595–616. <https://doi.org/10.1590/1516-73132014000300006>
- Matthews, M. R. (1995). História, Filosofia e Ensino de Ciências: a tendência atual de reaproximação. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 12(3), 164–214. <https://doi.org/https://doi.org/10.5007/%25x>
- Matthews, M. R. (1998). In Defense of Modest Goals When Teaching about the Nature of Science. *Journal of Research in Science Teaching*, 35(2), 161–174. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(199802\)35:2<161::AID-TEA6>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199802)35:2<161::AID-TEA6>3.0.CO;2-Q)
- Matthews, M. R. (2012). Changing the Focus: From Nature of Science (NOS) to Features of Science (FOS). In M. Khine (Ed.), *Advances in Nature of Science Research* (pp. 3–26). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2457-0>
- McCain, K. (2015). Explanation and the Nature of Scientific Knowledge. *Science and Education*, 24(7–8), 827–854. <https://doi.org/10.1007/s11191-015-9775-5>
- McComas, W. F., Clough, M. P., & Almazroa, H. (1998). the Role and Character of the Nature of Science in Science Education. In W. F. McComas (Ed.), *The Nature of Science in Science Education Rationales and Strategies* (pp. 3–39). Springer. https://doi.org/10.1007/0-306-47215-5_1
- McDonald, C. V. (2010). The influence of explicit nature of science and argumentation

- instruction on preservice primary teachers' views of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(9), 1137–1164. <https://doi.org/10.1002/tea.20377>
- McMullin, M. (1992). *The inference that makes science*. Marquette University Press.
- McNeill, K. L., & Pimentel, D. S. (2010). Scientific discourse in three urban classrooms: The role of the teacher in engaging high school students in argumentation. *Science Education*, 94(2), 203–229. <https://doi.org/10.1002/sce.20364>
- Medeiros, A., & Medeiros, C. (2001). Questões epistemológicas nas iconicidades de representações visuais em livros didáticos de física. *Revista Brasileira de Pesquisa Em Educação Em Ciências*, 1(1), 103–117.
- Medeiros, A., & Monteiro, M. A. (2002). A invisibilidade dos pressupostos e das limitações da teoria Copernica nos livros didáticos de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 19(1), 28–52. <https://doi.org/10.5007/%x>
- Mehra, J., & Rechenberg, H. (1982). *The Historical Development of Quantum Theory. Vol. 1, parte 2*. Springer.
- Millikan, R. A. (1916). A Direct Photoelectric Determination of Planck's "h". *Physical Review*, 7(3), 355–388. <https://doi.org/10.1103/physrev.7.355>
- Millikan, R. A. (1917). *The Electron*. The University of Chicago Press.
- Millikan, R. A. (1950). *The Autobiography of Robert A. Millikan*. Prentice-Hall.
- Monk, M., & Osborne, J. (1997). Placing the history and philosophy of science on the curriculum: A model for the development of pedagogy. *Science Education*, 81(4), 405–424. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(199707\)81:4<405::AID-SCE3>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199707)81:4<405::AID-SCE3>3.0.CO;2-G)
- Monteiro, M. A., Nardi, R., & Bastos Filho, J. B. (2009). A sistemática incompreensão da teoria quântica e as dificuldades dos professores na introdução da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. *Ciência & Educação (Bauru)*, 15(3), 557–580. <https://doi.org/10.1590/s1516-73132009000300007>
- Moreira, M. A., Massoni, N. T., & Ostermann, F. (2007). “História e epistemologia da física” na licenciatura em física: Uma disciplina que busca mudar concepções dos alunos sobre a natureza da ciência. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29(1), 127–134. <https://doi.org/10.1590/s0102-47442007000100019>
- Morrison, J. A., Raab, F., & Ingram, D. (2009). Factors influencing elementary and secondary teachers' views on the nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(4), 384–403. <https://doi.org/10.1002/tea.20252>
- Moura, B. A. (2014). O que é natureza da Ciência e qual sua relação com a História e Filosofia da Ciência? *Revista Brasileira de História Da Ciência*, 7(1), 32–46.
- Moura, B. A., & Silva, C. C. (2014). Abordagem multicontextual da história da ciência: uma proposta para o ensino de conteúdos históricos na formação de professores. *Revista Brasileira de História Da Ciência*, 7(2), 336–348. http://www.law.utoronto.ca/utfl_file/count/documents/chiao/WPS_2014-06.pdf

- Nagel, E. (1961). *The Structure of science: problems in the logic of scientific explanation*. Harcourt, Brace & World. <https://doi.org/10.1201/9781351069618-2>
- Nascimento, S. S. do, & Vieira, R. D. (2008). Contribuições e limites do padrão de argumento de Toulmin aplicado em situações argumentativas de sala de aula de ciências. *Revista Brasileira de Pesquisa Em Educação Em Ciências*, 8(2), 1–20. <http://revistas.if.usp.br/rbpec/article/view/49/42>
- Nersessian, N. J. (2002). The cognitive basis of model-based reasoning in science. In P. Carruthers, S. Stich, & M. Siegal (Eds.), *The cognitive basis of science* (pp. 133–153). Cambridge University Press.
- Newton-Smith, W. H. (2000). Underdetermination of theory by data. In W. H. Newton-Smith (Ed.), *A companion to the philosophy of science* (pp. 532–536). Blackwell.
- Niaz, M. (2009). *Critical Appraisal of Physical Science as a Human Enterprise (vol. 36)*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9626-6>
- Nieswandt, M., & Bellomo, K. (2009). Written extended-response questions as classroom assessment tools for meaningful understanding of evolutionary theory. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(3), 333–356. <https://doi.org/10.1002/tea.20271>
- Nola, R., & Irzik, G. (2005). *Philosophy, Science, Education and Culture (Vol. 28)*. Springer. <https://doi.org/10.1007/1-4020-3729-5>
- Norris, S. P., Guilbert, S. M., Smith, M. L., Hakimelahi, S., & Phillips, L. M. (2005). A theoretical framework for narrative explanation in science. *Science Education*, 89(4), 535–563. <https://doi.org/10.1002/sce.20063>
- Ogborn, J. O. N. (1997). Constructivist metaphors of learning science. In *Science and Education (Vol. 6, Issues 1–2, pp. 121–133)*. <https://doi.org/10.1023/a:1008642412858>
- Oki, M. da C. M., & Moradillo, E. F. de. (2008). The teaching of History of Chemistry : improving the knowledge about the nature of science. *Ciência e Educação*, 14(1), 67–88. <https://doi.org/10.1590/S1516-73132008000100005>
- Osborne, J., Collins, S., Ratcliffe, M., Millar, R., & Duschl, R. (2003). What “ideas-about-science” should be taught in school science? A delphi study of the expert community. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(7), 692–720. <https://doi.org/10.1002/tea.10105>
- Osborne, J., & Patterson, A. (2012). Authors’ response to “For whom is argument and explanation a necessary distinction? A response to Osborne and Patterson” by Berland and McNeill. *Science Education*, 96(5), 814–817. <https://doi.org/10.1002/sce.21034>
- Ostermann, F., & Moreira, M. A. (2000). Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio.” *Investigações Em Ensino de Ciências*, 5(1), 23–48.
- Ostermann, F., & Ricci, T. F. (2005). Conceitos de Física quântica na formação de professores: relato de uma experiência didática centrada no uso de experimentos virtuais. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 22(1), 9–35.
- Paruelo, J. (2003). Historia y Epistemología de las Ciencias. *Enseñanza De Las Ciencias y*

Filosofia, 21(2), 329–335.

- Passmore, J. (1965). Explanation in everyday life, in science, and in history. In G. H. Nadel (Ed.), *Studies in the philosophy of history* (pp. 16–34). Harper Torchbooks.
- Pena, F. L. A., & Teixeira, E. S. (2017). Concepções sobre a Natureza da Ciência: a trajetória dos estudantes de uma disciplina sobre Evolução dos Conceitos de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 34(1), 152–175.
<http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
<http://fiskal.kemenkeu.go.id/ejournal>
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001>
<http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055>
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006>
<https://doi.org/10.1>
- Pereira, A. P., & Ostermann, F. (2009). Sobre o ensino de Física Moderna e contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente. *Investigações Em Ensino de Ciências*, 14(3), 393–420.
- Pérez, D. G. (1993). Contribución de la historia y de la filosofía de las ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza/aprendizaje como investigación. *Enseñanza de Las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 11(2), 197–212.
- Pérez, D. G., Montoro, I. F., Alís, J. C., Cachapuz, A., & Praia, J. (2001). para uma imagem não deformada do trabalho científico. *Ciência e Educação*, 7(2), 125–153.
- Peters, E., & Kitsantas, A. (2010). The Effect of Nature of Science Metacognitive Prompts on Science Students' Content and Nature of Science Knowledge, Metacognition, and Self-Regulatory Efficacy. *School Science and Mathematics*, 110(8), 382–396.
<https://doi.org/10.1111/j.1949-8594.2010.00050.x>
- Pietrocola, M. (1999). Construção e realidade: o realismo científico de Mário Bunge e o ensino de ciências através de modelos. *Investigações Em Ensino de Ciências*, 4(3), 213–227.
- Popper, K. R. (1962). *Conjectures and refutations*. Basic Books.
- Porra, A. C., Sales, N. L. L., & Silva, C. C. (2011). Concepções de natureza da ciência: adaptação de um instrumento para aplicação em alunos de licenciatura de universidades públicas brasileiras. *VIII Encontro Nacional de Pesquisa Em Ensino de Ciências*.
<http://www.nutes.ufrj.br/abrapec/viiienpec/resumos/R0206-1.pdf>
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211–227. <https://doi.org/10.1002/sce.3730660207>
- Praia, J., Pérez, D. G., & Vilches, A. (2007). O papel da Natureza da Ciência na educação para a cidadania. *Ciência & Educação (Bauru)*, 13(2), 141–156.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1516-73132007000200001>
- Principe, L. M. (1999). *Robert Boyle and his alchemical quest*. Princeton University Press.
- Quine, W. V. O. (1951). Two Dogmas of Empiricism. *The Philosophical Review*, 60, 20–43.
<http://mitpress.mit.edu/books/concepts%5Cnhttp://cognet.mit.edu/library/books/view?isbn=0262631938>
- Raicik, A. C., Peduzzi, L. D. Q., & Angotti, J. A. P. (2017). Da Instantia Crucis Ao

- Experimento Crucial: Diferentes Perspectivas Na Filosofia E Na Ciência. *Investigações Em Ensino de Ciências*, 22(3), 192. <https://doi.org/10.22600/1518-8795.ienci2017v22n3p192>
- Raicik, A. C., & Peduzzi, L. O. Q. (2015). Uma discussão acerca dos contextos da descoberta e da justificativa : a dinâmica entre hipótese e experimentação na ciência. *Revista Brasileira de História Da Ciência*, 8(1), 132–146.
- Reichenbach, H. (1961). Experience and prediction: an analysis of the Foundations and the Structure of Knowledge. In *The university of Chicago Press*. University of Chicago Press. <https://doi.org/10.1049/me:19960307>
- Reis, P., & Galvão, C. (2005). Controvérsias sócio-científicas e prática pedagógica de jovens professores. *Investigações Em Ensino de Ciências*, 10(2), 131–160.
- Rezende Junior, M. F., & Cruz, F. F. de S. (2009). Física moderna e contemporânea na formação de licenciandos em física: necessidades, conflitos e perspectivas. *Ciência & Educação (Bauru)*, 15(2), 305–321. <https://doi.org/10.1590/s1516-73132009000200005>
- Rodrigues, R. F., & Pereira, A. P. (2020). A Inferência à Melhor Explicação como Heurística para Abordar Episódios Históricos no Ensino de Ciências por meio de Controvérsias Explicativas. *Investigações Em Ensino de Ciências*, 25(3), 557–576.
- Rodrigues, R. F., & Pereira, A. P. de. (2018). Explicações no ensino de ciências: revisando o conceito a partir de três distinções básicas. *Ciência & Educação (Bauru)*, 24(1), 43–56. <https://doi.org/10.1590/1516-731320180010004>
- Royal Institution. (1902). 1899. *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1.
- Rubba, P. A., & Andersen, H. O. (1978). Development of an instrument to assess secondary school students understanding of the nature of scientific knowledge. *Science Education*, 62(4), 449–458. <https://doi.org/10.1002/sce.3730620404>
- Rudolph, J. L. (2000). Reconsidering the ‘nature of science’ as a curriculum component. *Journal of Curriculum Studies*, 32(3), 403–419. <https://doi.org/10.1080/002202700182628>
- Rudolph, J. L. (2003). Portraying Epistemology: School Science in Historical Context. *Science Education*, 87(1), 64–79. <https://doi.org/10.1002/sce.1055>
- Russell, C. B., & Weaver, G. C. (2011). A comparative study of traditional, inquiry-based, and research-based laboratory curricula: Impacts on understanding of the nature of science. *Chemistry Education Research and Practice*, 12(1), 57–67. <https://doi.org/10.1039/c1rp90008k>
- Sá, L. P., & Queiroz, S. L. (2011). Argumentação no ensino de Ciências: contexto brasileiro. *Ensaio Pesquisa Em Educação Em Ciências (Belo Horizonte)*, 13(2), 13–30. <https://doi.org/10.1590/1983-21172011130202>
- Sadler, T. D., Chambers, F. W., & Zeidler, D. L. (2004). Student conceptualizations of the nature of science in response to a socioscientific issue. *International Journal of Science Education*, 26(4), 387–409. <https://doi.org/10.1080/0950069032000119456>

- Sadler, T. D., & Donnelly, L. A. (2006). Socioscientific argumentation: The effects of content knowledge and morality. *International Journal of Science Education*, 28(12), 1463–1488. <https://doi.org/10.1080/09500690600708717>
- Sandoval, W. A., & Morrison, K. (2003). High school students' ideas about theories and theory change after a biological inquiry unit. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(4), 369–392. <https://doi.org/10.1002/tea.10081>
- Sasseron, L. H., & Carvalho, A. M. P. de. (2011). Uma análise de referenciais teóricos sobre a estrutura do argumento para estudos de argumentação no ensino de Ciências. *Ensaio Pesquisa Em Educação Em Ciências (Belo Horizonte)*, 13(3), 243–262. <https://doi.org/10.1590/1983-21172011130315>
- Scharmann, L. C., & Smith, M. U. (2001). Further thoughts on defining versus describing the nature of science: A response to Niaz. *Science Education*, 85(6), 691–693. <https://doi.org/10.1002/sce.1033>
- Schwartz, R. S., & Lederman, N. G. (2002). “It’s the nature of the beast”: The influence of knowledge and intentions on learning and teaching nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(3), 205–236. <https://doi.org/10.1002/tea.10021>
- Shanahan, M. C., & Nieswandt, M. (2011). Science student role: Evidence of social structural norms specific to school science. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(4), 367–395. <https://doi.org/10.1002/tea.20406>
- Silva, C. C., & Moura, B. A. (2008). A natureza da ciência por meio do estudo de episódios históricos : o caso da popularização da óptica newtoniana. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30(2), 1602-1–10.
- Silva, F. W. O. (2007). A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29(1), 149–159.
- Slezak, P. (1994). Sociology of scientific knowledge and scientific education: Part I. *Science & Education*, 3(3), 265–294. <https://doi.org/10.1007/BF00540157>
- Solbes, J., & Traver, M. (2003). Against a Negative Image of Science: History of Science and the Teaching of Physics and Chemistry Article. *CEUR Workshop Proceedings*, 12(September 2003), 703–717.
- Solomon, J., Duveen, J., Scot, L., & McCarthy, S. (1992). Teaching about the nature of science through history: Action research in the classroom. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(4), 409–421. <https://doi.org/10.1002/tea.3660290408>
- Spector, B., Strong, P., & Porta, T. (1998). Teaching the Nature of Science as an Element of Science, Technology and Society. *The Nature of Science in Science Education*, 267–276. https://doi.org/10.1007/0-306-47215-5_17
- Spiliotopoulou-Papantoniou, V., & Agelopoulos, K. (2009). Enhancement of pre-service teachers' teaching interventions with the aid of historical examples. *Science and Education*, 18(9), 1153–1175. <https://doi.org/10.1007/s11191-008-9176-0>
- Stinner, A., McMillan, B., Metz, D., Jilek, J., & Klassen, S. (2003). The Renewal of Case Studies in Science Education. *Science and Education*, 12(7), 617–643. <https://doi.org/10.1023/A:1025648616350>

- Stuewer, R. H. (1970). Non-Einsteinian Interpretations of the Photoelectric Effect. In *Minnesota Studies in the Philosophy of Science, Volume V. Historical and Philosophical Perspectives of Science* (Vol. 5, pp. 246–263).
- Sweitzer, G. L., & Anderson, R. D. (1983). *Education Practices Associated With Inquiry Strategy*. 20(5), 453–466.
- Teixeira, E. S., Greca, I. M., & Freire, O. (2012). The History and Philosophy of Science in Physics Teaching: A Research Synthesis of Didactic Interventions. *Science and Education*, 21(6), 771–796. <https://doi.org/10.1007/s11191-009-9217-3>
- Terrazzan, E. A. (1992). A interseção da Física Moderna e contemporânea no ensino de Física na escola de 2º grau. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 9(3), 209–214.
- Thagard, P. (2002). The passionate scientist: emotion in scientific cognition. In P. Carruthers, S. Stich, & M. Siegal (Eds.), *The cognitive basis of Science* (pp. 235–250). Cambridge University Press.
- Thagard, P. (2004). Causal inference in legal decision making: explanatory coherence vs. bayesian networks. *Applied Artificial Intelligence*, 18(3–4), 231–249. <https://doi.org/10.1080/08839510490279861>
- Thagard, P. (2014). Explanatory Identities and Conceptual Change. *Science and Education*, 23(7), 1531–1548. <https://doi.org/10.1007/s11191-014-9682-1>
- Thagard, P. R. (1978). The Best Explanation: Criteria for Theory Choice. *The Journal of Philosophy*, 75(2), 76–92.
- Tobin, K., & McRobbie, C. J. (1996). Cultural myths as constraints to the enacted science curriculum. *Science Education*, 80(2), 223–241. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(199604\)80:2<223::AID-SCE6>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199604)80:2<223::AID-SCE6>3.0.CO;2-I)
- Vasconcelos, J. A. (2014). História e Pós-estruturalismo. In M. Rago & R. Gimenes (Eds.), *Narrar o passado, repensar a história* (pp. 105–121). Editora Unicamp.
- Vázquez-Alonso, Á., Manassero-Mas, M. A., Acevedo-Díaz, J. A., & Acevedo-Romero, P. (2008). Consensos sobre a Natureza da Ciência: A Ciência e a Tecnologia na Sociedade. *Química Nova Na Escola*, 27, 34–50.
- Vesilind, E. M., & Jones, M. G. (1998). Gardens or Graveyards: Science Education Reform and School Culture. *Journal of Research in Science Teaching*, 35(7), 757–775. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(199809\)35:7<757::AID-TEA6>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199809)35:7<757::AID-TEA6>3.0.CO;2-K)
- Wang, H. A., & Marsh, D. D. (2002). Science instruction with a humanistic twist: Teachers' perception and practice in using the history of science in their classrooms. *Science and Education*, 11(2), 169–189. <https://doi.org/10.1023/A:1014455918130>
- Wenning, C. J. (2006). Assessing nature-of-science literacy as one component of scientific literacy. *Journal of Physics Teacher Education Online*, 3(4), 1–20.
- Whitaker, M. A. B. (1979). History and quasi-history in physics education. I. *Physics Education*, 12(2), 108–112. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/14/2/009>
- Wilkenfeld, D. A., & Lombrozo, T. (2015). Inference to the Best Explanation (IBE) Versus

Explaining for the Best Inference (EBI). *Science and Education*, 24(9–10), 1059–1077. <https://doi.org/10.1007/s11191-015-9784-4>

Yacoubian, H. A., & Boujaoude, S. (2010). The effect of reflective discussions following inquiry-based laboratory activities on students' views of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(10), 1229–1252. <https://doi.org/10.1002/tea.20380>

Apêndice A - Tópicos Abordados Pela Disciplina ao Longo do Semestre Do Estudo III

1ª parte	2ª parte
Radiação de Corpo Negro;	Poço quadrado infinito;
Efeito fotoelétrico;	Oscilador Harmônico Simples;
Raios X e o efeito Compton;	As funções de onda do átomo de Hidrogênio;
Espectros atômicos e o modelo de Rutherford;	Experimento de Stern-Gerlach e o Spin do elétron;
O modelo de Bohr para o átomo de Hidrogênio;	Bases experimentais da relatividade e Experiência de Michelson e Morley;
Espectros de Raios-X;	Os postulados de Einstein;
Experimento de Franck-Hertz;	Transformações de Lorentz e calibração dos eixos espaço-tempo;
Crítica da Teoria de Bohr e da “Velha” Mecânica Quântica;	Momento e energia relativísticos;
A hipótese de de Broglie e a medida do comprimento de Onda das Ondas de Matéria;	Relação massa/energia, energia de ligação e massa invariante;
Pacotes de Onda;	Relatividade geral, deflexão da luz em campo gravitacional e desvio gravitacional para o vermelho;
Interpretação probabilística da função de onda;	Composição do Núcleo e Propriedades do núcleo no estado fundamental;
O princípio de indeterminação;	Radioatividade e decaimentos alfa, beta e gama;
Consequências do princípio de indeterminação;	Fissão, fusão, reatores nucleares e suas aplicações;
O dualismo onda-partícula;	Partículas e anti-partículas: interações fundamentais e classificação das partículas;
O experimento de duas fendas;	Leis de Conservação e Simetrias;
Equação de Schrödinger em uma dimensão;	Modelos cosmológicos – teoria do Big Bang.

Apêndice B - Termo de Consentimento Livre e Esclarecido

Prezado(a) estudante,

Esta pesquisa busca desenvolver uma abordagem capaz de proporcionar o estudo integrado de aspectos da Natureza da Ciência e da História da Ciência na formação de professores de Física. Os objetivos do estudo são: (1) investigar em que medida a estratégia desenvolvida contribui para ampliar o conhecimento de alunos de um curso de licenciatura em Física sobre a Natureza da Ciência e a História da Ciência, e (2) quais as dificuldades que alunos encontram ao utilizar a abordagem proposta para produzir aulas de Física Moderna.

A finalidade deste trabalho é contribuir para a formação de professores de ciências, desenvolvendo uma estratégia de ensino que possa subsidiar discussões sobre o papel da História e Filosofia da Ciência no Ensino de Física e que possa, eventualmente, auxiliar na elaboração de aulas que envolvam esses temas. Tal pesquisa está sendo desenvolvida por Renato Felix Rodrigues, aluno de doutorado do programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do professor doutor Alexsandro Pereira de Pereira.

Os pesquisadores solicitam a sua colaboração para que materiais produzidos por você durante as aulas da disciplina de “Transposição Didática de Tópicos Especiais em Física Geral III” possam ser utilizados como dado empírico para esta pesquisa, especificamente: suas respostas a questionários aplicados durante a disciplina, a gravação de seminário(s) ministrado(s) por você e de entrevistas que eventualmente sejam realizadas, como também sua autorização para apresentar os resultados deste estudo em eventos da área de ensino de Física e publicar em revista científica nacional e/ou internacional. Por ocasião da publicação dos resultados, seu nome será mantido em sigilo absoluto.

Esclarecemos que sua participação no estudo é voluntária e, por tanto, não é obrigado(a) a fornecer as informações e/ou colaborar com as atividades solicitadas. Caso decida não participar do estudo, ou resolva a qualquer momento desistir do mesmo, não sofrerá nenhum tipo de penalização. Além disso, os pesquisadores estarão a sua disposição para qualquer esclarecimento que considere necessário em qualquer etapa da pesquisa.

Assinatura do pesquisador responsável

Considerando que fui informado(a) dos objetivos e da relevância do estudo proposto, de como será minha participação e dos procedimentos deste estudo, declaro o meu consentimento em participar da pesquisa, como também concordo que os dados obtidos na investigação sejam utilizados para fins científicos (divulgação em eventos e publicações). Estou ciente que receberei uma via desse documento.

Porto Alegre, 15 de Março de 2019.

Assinatura do participante

Apêndice C - Questionário Sobre Concepções de Natureza da Ciência

- 1) Atualmente podemos dizer que vivemos em uma sociedade que valoriza muito a cultura científica, afinal você já deve ter visto produtos que possuem em seu rótulo a expressão “cientificamente comprovado”. Na sua opinião, é possível definir ciência? Em caso afirmativo, qual seria a sua definição? Em caso negativo, o que impede de chegar a uma definição?
- 2) Em sua opinião é possível diferenciar ciência de religião ou de filosofia? Justifique sua resposta.
- 3) Você já deve ter lido sobre os trabalhos experimentais de Newton com os prismas, de Gregor Mendell com as ervilhas, assim como dos trabalhos teóricos de Albert Einstein sobre a teoria da relatividade. Pense nos exemplos citados e em outros que você conheça e diga se, em sua opinião, o uso de experimentos na ciência é essencial. Justifique sua resposta.
- 4) Após os cientistas terem desenvolvido uma teoria científica (por exemplo, a teoria quântica, a teoria atômica, a teoria da evolução), essa teoria pode ser modificada depois? Se você acredita que as teorias científicas permanecem inalteradas ao longo dos anos, justifique sua resposta com alguns exemplos. Se você acredita que as teorias científicas são modificadas, explique por que isso acontece.
- 5) É comum a divulgação do método científico composto das seguintes etapas: observação de fenômenos naturais, formulação de hipóteses, teste da hipótese através de experimentos, modificação da hipótese em caso de falha nos testes ou, em caso de validação desta, a elaboração de uma teoria. Em sua opinião esse é o único método de fazer ciência? Justifique a sua resposta seja ela afirmativa ou não.
- 6) Um tema muito discutido atualmente é o aquecimento global. Apesar de muitas mudanças no clima já serem sentidas por todos, ainda não existe um consenso entre os cientistas sobre as causas dessas mudanças. Um grupo defende que tais mudanças são consequências da interferência do homem na natureza e outro grupo acredita que este é um processo natural e que aconteceria independente da interferência humana. Em sua opinião, é possível que cientistas cheguem a conclusões diferentes a partir de um mesmo conjunto de informações? Justifique sua resposta com algum exemplo.
- 7) Algumas pessoas afirmam que a ciência é impregnada por valores sociais e culturais, por exemplo, a regimes políticos, a contextos sociais, a tradições religiosas. Isto é, a ciência não é imune às influências externas. Outras pessoas afirmam que a Ciência é universal e neutra, ou seja, independe das fronteiras nacionais e culturais e não é afetada por valores sociais, políticos e filosóficos. Se você acredita que a ciência reflete valores sociais e culturais, explique por que e como ocorre essa influência. Se você acredita que a ciência é universal, explique por que e como. Se possível, cite alguns exemplos para justificar sua resposta, em qualquer um dos casos.

Questões sobre o uso de História da Ciência no ensino de Física

- 1) Qual a sua opinião sobre a inclusão de História da Ciência em aulas de Física?
- 2) 2- Independentemente da sua resposta à questão anterior, como você abordaria elementos da História da Ciência em uma aula de Física?

Apêndice D - A Inferência à Melhor Explicação como Heurística para Abordar Episódios da História da Ciência

Resumo: Este texto apresenta uma proposta de abordagem teórica para o estudo de episódios da História da Ciência com finalidade pedagógica. A abordagem proposta se baseia em um tópico discutido pela Epistemologia chamado Inferência à Melhor Explicação. Vinculamos esta abordagem epistemológica a elementos defendidos pela visão consensual sobre o ensino de Natureza da Ciência. Mais especificamente, a ideia é analisar episódios da História da Ciência por meio do conflito entre explicações científicas concorrentes, destacando os fundamentos epistêmicos (ou culturais, sociais, etc.) nos quais explicações concorrentes relacionadas ao episódio sobre estudo se baseiam. Neste texto apresentamos uma introdução a alguns conceitos-chave da Inferência à Melhor explicação e nossa tentativa de adaptá-los para o emprego em contexto pedagógico. A título de ilustração, concluímos apresentando um breve episódio da História da Astronomia – existência hipotética do planeta Vulcano.

Palavras-chave: Inferência à Melhor Explicação. Natureza da Ciência. História da Ciência. Filosofia da Ciência.

INTRODUÇÃO

A Filosofia da Ciência é uma sub-área da Filosofia preocupada com os fundamentos, métodos e implicações da Ciência. Entre as principais questões abordadas por esta área estão: o que conta como Ciência? Qual a confiabilidade das teorias científicas? E qual o propósito final da Ciência? Nas últimas décadas, a área de Educação em Ciências começou a se apropriar de elementos da Filosofia da Ciência para promover uma formação cidadã mais reflexiva sobre as práticas da Ciência (e.g., MATTHEWS, 1995; ACEVEDO et al., 2005; REIS; GALVÃO, 2005; PRAIA; GIL-PÉREZ; PEÑA, 2007). Ganha destaque nesse sentido a discussão de elementos de Natureza da Ciência (NdC), que possibilita conhecer (e problematizar) os mecanismos que regulam a atividade científica. Abordar aspectos da NdC é considerada uma forma de promover alfabetização científica por meio da educação *sobre e pela* Ciência, relacionada à compreensão das práticas, dos propósitos e da História da Ciência (ACEVEDO et al., 2005; VÁSQUEZ-ALONSO et al., 2008; ABD-EL-KHALICK, 2013).

Um objetivo central dos trabalhos sobre NdC é tentar caracterizar o fazer científico. Um resultado importante obtido a esse respeito na Educação em Ciências foi o surgimento da visão de que a NdC pode ser abordada utilizando aspectos consensualmente aceitos, ensinados por meio de referências explícitas a um conjunto de princípios heurísticos que filósofos e historiadores da Ciência (e.g., HOLTON, 1969; KRAGH, 1992) utilizam para caracterizar a Ciência (e.g., ABD-EL-KHALICK, 2013). Como alternativa surgiu também a visão de que a Ciência, assim como o ensino de Ciências, deve ser abordada em termos de práticas cognitivas, epistêmicas e sociais (GIERE, 1988; NERSESSIAN, 2002) que exemplifiquem o *fazer* científico. Os autores que defendem esta segunda perspectiva consideram que o aprendizado de NdC ocorre quando estudantes se engajam nessas práticas situadas e em contextos apropriados à idade (DUSCHL; GRANDY, 2013).

Podemos destacar algumas formas pelas quais aspectos de NdC têm sido abordados na Educação Científica: através de práticas educativas que, em alguma medida, reproduzem aspectos da atividade científica (como ocorre em atividades de Ensino por Investigação); o estudo de princípios heurísticos representativos do *modus operandi* da ciência; ou abordando episódios da História da Ciência como ponto de partida para discutir as características do co-

nhecimento científico (MCCAIN, 2015), além de combinações dessas perspectivas. No que diz respeito à História e Filosofia da Ciência (HFC), esta pode ser pensada tanto como conteúdo (em si) das disciplinas científicas, como uma estratégia didática facilitadora na aprendizagem de conceitos, modelos e teorias (MARTINS, 2007). No entanto, embora abordar tópicos de HFC seja defendido (quase) unanimemente pelos pesquisadores em Educação em Ciências (e.g., MATTHEWS, 1995; EL-HANI, 2006), não vemos essa prática ser contemplada nas salas de aula (MARTINS, 2007) e nos livros didáticos (MEDEIROS; MEDEIROS, 2001). MARTINS (2007) atribui este quadro ao fato de não se tratar de algo simples de fazer. O autor aponta que há um abismo entre o valor atribuído à HFC e a sua utilização, com qualidade, como conteúdo e estratégia didática em sala de aula. Em situações práticas a HFC ainda é pensada como algo secundário, utilizado a título de “ilustração” para introduzir e motivar o ensino dos temas “regulares” (MARTINS, 2007).

O contexto atual de *fake news* e pós-verdade evidencia a necessidade de aprofundar esta questão. Assim, proporcionar clareza sobre a produção e avaliação de hipóteses ganha força enquanto demanda do ensino de Ciências. Outro ponto que merece destaque é a necessidade de sermos capazes de avaliar, racionalmente, os pontos fortes e fracos de lados opostos envolvidos em um debate. Trabalhos sobre argumentação na Educação em Ciências têm destacado esses pontos recentemente (e.g., MCNEILL; PIMENTEL, 2010; SÁ; QUEIROZ, 2011; SASSERON; CARVALHO, 2011). Já na Filosofia do Conhecimento, vêm recebendo destaque nas últimas décadas uma discussão epistêmica sobre a *Inferência à Melhor Explicação* (IME). Um de seus principais empregos é para discutir a justificação do conhecimento, ou seja, problematizar o quão confiável este conhecimento é. Estudos recentes vêm apontando a IME como uma abordagem promissora para discutir também aspectos de Natureza da Ciência na Educação em Ciências (e.g., MCCAIN, 2015; WILKENFELD; LOMBROZO, 2015).

O objetivo do presente trabalho é propor o uso da Inferência à Melhor Explicação como heurística para abordar episódios da História da Ciência no seu ensino. Na próxima seção apresentamos, resumidamente, alguns aspectos da visão consensual que estamos incorporando à nossa abordagem. Em seguida, são introduzidas algumas das características principais da IME, e então apontamos pontos de aproximação entre a visão de NdC defendida pela visão consensual e as discussões levantadas pela IME. Concluimos o trabalho com uma representação esquemática da abordagem proposta, seguida da discussão de um breve episódio histórico, a título de ilustração.

VISÃO CONSENSUAL SOBRE A NATUREZA DA CIÊNCIA

A visão Consensual reconhece que há discordâncias sobre a definição ou significado de NdC entre filósofos, historiadores e professores de Ciências (LEDERMAN; ABD-EL-KHALICK, 1998). No entanto, autores que defendem esta perspectiva entendem que estas discordâncias emergem ao se abordar especificidades de disciplinas e situações particulares. Por outro lado, eles destacam que ao abordar o tema em sentido amplo há certa universalidade em algumas características do conhecimento científico. Dessa forma, autores como Niaz (2009) e Abd-El-Khalick (2013) afirmam que, apesar da complexidade de questões multifacetadas da NdC e controvérsias entre filósofos, um certo grau de consenso foi alcançado dentro da comunidade de ensino de Ciências, de modo que a natureza da Ciência possa ser caracterizada por alguns aspectos específicos. No entender desses autores, ao trabalhar com natureza da Ciência no ensino deveríamos abordar esses aspectos consensuais, tidos como características sobre a construção do conhecimento científico que a maioria dos pesquisadores concorda acerca do tema (e.g., MCCOMAS; CLOUGH; ALMAZROA, 1998; GIL-PÉREZ et al., 2001). Entre esses aspectos estão que o conhecimento científico é: tentativo (sujeito a mudanças), empiricamente baseado (baseado e/ou derivado da observação do mundo natural) e sub-

jetivo (influenciado por fatores pessoais, vieses e orientações teóricas); envolve necessariamente a inferência humana, a imaginação e a criatividade (envolve a invenção de explicações); e é social e culturalmente situado (MOURA, 2014). Vale destacar que esta não se propõe a ser uma lista exaustiva das características do conhecimento científico, e que outros pesquisadores podem excluir alguns dos aspectos ou incluir outros (e.g., SCHARMANN; SMITH, 2001; OSBORNE et al., 2003). Nosso objetivo aqui não é o de enfatizar o (existente) confronto entre uma lista e as demais. No entanto, os pontos mencionados podem ser considerados uma boa representação do que é citado pelas principais listas deste tipo (MOURA, 2014).

Apesar de ter muitos defensores, o ensino de NdC por meio da abordagem de aspectos consensuais sofre algumas críticas. Matthews (2012), por exemplo, considera confusa a forma como aspectos epistemológicos, sociológicos, psicológicos, éticos, comerciais e filosóficos são reunidos em uma única lista de consenso. Outra crítica é que itens unificadores ignoram a heterogeneidade da Ciência (VAN DIJK, 2011), sem descrever adequadamente práticas de certos domínios científicos (RUDOLPH, 2000). Van Eijck, Hsu e Roth (2008) criticam as listas de consenso quando utilizadas como práticas instrucionais que guiam os estudantes a aprender imagens particulares da Ciência que são dissociadas do fazer científico, enquanto Irzik e Nola (2011) afirmam que a Ciência é tão rica e dinâmica que dificilmente poderíamos descrevê-la sob um conjunto estático de regras ou aspectos. Por fim, Matthews (2012) chama atenção para os riscos de privilegiar um lado do que são argumentos controversos e muito debatidos entre filósofos da Ciência, além do uso de soluções particulares para disputas de demarcação. Apesar de reconhecermos a importância de levar essas questões em consideração para abordar aspectos de NdC, optamos por adotar a visão consensual neste artigo. A visão consensual nos fornece uma abordagem respaldada pela literatura internacional (em geral) e bem definida, o que atende aos propósitos introdutórios deste trabalho.

A INFERÊNCIA À MELHOR EXPLICAÇÃO: UMA BREVE INTRODUÇÃO

Antes de apresentar as características gerais da IME, é pertinente explicitar o significado de alguns conceitos importantes. Afinal, o que é uma inferência? O que é uma explicação? O que torna uma explicação melhor do que outra?

Inferência é o ato de chegar a uma conclusão a partir de um conjunto de evidências, constituindo a base de qualquer raciocínio investigativo. Quando um detetive está investigando um crime, ele busca coletar provas (e.g., impressões digitais, amostras de DNA, gravações de câmeras de segurança, etc.) que possam ser utilizadas como evidência para *inferir* o provável culpado pelo crime. O mesmo que ocorre quando um médico, a partir do conjunto de sintomas e resultados de exames, tenta *inferir* o diagnóstico de um paciente. Cientistas também utilizam inferência ao tentar explicar um fenômeno, resultado experimental ou conclusão teórica. A inferência é o ato, comum a todos esses exemplos, de chegar a uma conclusão a partir da evidência disponível. É importante notar, no entanto, que toda inferência é tentativa e falível. O detetive pode errar sua acusação, assim como o médico pode fazer um diagnóstico equivocado. Isto torna necessário sermos capazes de avaliar a confiabilidade das inferências que fazemos.

Entendendo inferência como o ato de chegar a uma conclusão a partir da evidência disponível, focaremos a partir de agora no importante uso deste tipo de raciocínio para produzir explicações. Mas antes de relacionar as duas coisas, vamos definir *explicação* com um pouco mais de rigor. Evitando entrar nos detalhes das discussões entre filósofos sobre o tema (e.g., WEBER; VAN BOUWEL; DE VREESE, 2013; RODRIGUES; PEREIRA, 2018), de acordo com o trabalho seminal de Hempel e Oppenheim (1948) podemos considerar que toda explicação envolve dois entes: aquilo que precisa ser explicado (*explanandum*) e aquilo que

tenta explicar o que estamos tentando compreender (*explanans*). Dessa forma, uma explicação é a tentativa de apontar um *explanans* para explicar um *explanandum*. Uma das formas de fazer isso é realizando inferência.

Embora a conexão entre inferência e explicação seja muito importante para a Ciência, um componente chave do conhecimento científico está faltando. Mesmo que possamos gerar explicações a partir de um raciocínio particular, elas não vão proporcionar entendimento sobre a natureza a menos que sejam consideradas plausíveis. Não adianta sermos capazes de fazer inferências que tentem explicar aquilo que estamos tentando entender se não estabelecermos alguma forma de avaliar a qualidade da inferência que nós fazemos (MCCAIN, 2015). Esse tipo de “confiança” nas explicações é parte importante do nosso conhecimento científico, mas como alcançamos esse conhecimento? Essa questão tem sido abordada de muitas formas na epistemologia. Gostaríamos de destacar uma delas, que tem recebido destaque nas últimas décadas: a Inferência à Melhor Explicação (IME). Este termo foi introduzido no artigo pioneiro de Gilbert Harman (1965), sendo aprofundado desde então. Basicamente a discussão se propõe a identificar critérios que possamos utilizar para, racionalmente, inferir a melhor explicação para um conjunto de evidências. Mais especificamente, estamos interessados na avaliação que nos permite identificar a melhor explicação entre um conjunto de hipóteses concorrentes.

Filósofos afirmam que utilizamos IME com tanta frequência em nossas vidas que ela pode ser “tão rotineira e automática que facilmente passa despercebida” (DOUVEN, 2011, p. 3, nossa tradução). Exemplos do seu emprego abrangem desde diagnósticos médicos até a compreensão da linguagem – quando estamos interpretando o que um falante quer dizer (DASCAL, 1979). Por mais presente que a IME esteja na vida cotidiana, exemplos paradigmáticos deste tipo de inferência também são encontrados nas Ciências Naturais. As evidências que a Ciência usa são, tipicamente, as teorias aceitas naquele domínio e observações experimentais que tenham sido feitas. Vamos, então, explorar com mais detalhe a estrutura dessas inferências associadas à seleção das explicações. Lycan (2002) utiliza a seguinte representação esquemática da estrutura geral da IME:

F_1, F_2, \dots, F_n são fatos que precisam ser explicados (F_i).
 A hipótese H explica os fatos que precisam ser explicados.
 Nenhuma hipótese competidora explica os F_i tão bem quanto H faz.

Assim, H é considerada a melhor explicação.

A estrutura parece simples, mas como identificar qual é a melhor explicação dentro de um conjunto dado? Vamos começar discutindo o que pode tornar uma explicação melhor do que outra. Os critérios que influenciam a escolha entre explicações concorrentes são chamados de *virtudes explicativas*. Uma série de virtudes explicativas têm sido identificadas e apontadas em contextos científicos diversos. Adequação empírica (explicar dados empíricos relevantes), vários tipos de simplicidade, poder explicativo (o alcance do fenômeno explicado, ou quão iluminadora a explicação é), consistência com teorias atualmente aceitas (conservadorismo epistêmico), não incluir hipóteses ad-hoc, poder preditivo e o fato de levantar menos questões sem respostas que as concorrentes são apenas algumas delas.

Em geral, ao fazer inferências à melhor explicação avaliamos as várias hipóteses disponíveis em termos de suas virtudes explicativas e inferimos que a hipótese mais virtuosamente explicativa é (provavelmente) verdadeira. Assim, mesmo se várias hipóteses competidoras explicarem todos os fatos relevantes, ainda pode haver uma melhor explicação entre elas. A melhor explicação é aquela que satisfaz melhor as virtudes explicativas consideradas relevantes para aquele contexto (LIPTON, 2003). Bem, mas e agora? Será que existe alguma forma de quantificar o peso dessas virtudes explicativas para chegar a um veredito objetivo

sobre qual é a melhor explicação disponível para cada caso? É aí que está o problema. Não temos como fazer isso. E pior, quando situações variadas e em áreas científicas diversas são analisadas, percebemos que as virtudes relevantes mudam de um caso para outro. O mesmo é observado no estudo de episódios históricos. Em resumo, cada virtude explicativa individualmente não é critério necessário nem suficiente para a Inferência à Melhor Explicação.

Para entender a variação do peso dado às virtudes explicativas em diferentes contextos introduzimos a ideia de *crenças de fundo* (*background beliefs*) (LIPTON, 2003). Estas são crenças sobre o tipo de descrição que é aceita como genuinamente explicativa. Voltando ao exemplo do detetive investigando um crime: o detetive pode considerar que coletar impressões digitais, procurar pela arma do crime, etc., correspondem a evidências relevantes para resolver o caso. São essas evidências que vão levá-lo a inferir quem cometeu o crime. Mas por que ele deve considerar que coletar impressões digitais é uma boa evidência? São as crenças de fundo que respondem a esse tipo de questão. Elas vão nos informar a adequação geral dos métodos utilizados pelo detetive. Ou seja, o detetive está preocupado em juntar provas que estejam de acordo com o que ele considera relevante como evidência, mas são as crenças de fundo dele que vão fornecer as virtudes explicativas utilizadas para julgar a pertinência das explicações possíveis (DAY; KINCAID, 1994). Dessa forma, julgar uma explicação como sendo a melhor depende de dois fatores: as crenças de fundo e as virtudes explicativas consideradas (THAGARD, 2004). Como a relevância atribuída a diferentes crenças de fundo e virtudes explicativas depende do contexto em questão, *é possível que uma mesma hipótese possa fornecer uma boa explicação em um contexto, mas não seja aceita em outro* (JUNGES, 2008).

Isto fica evidenciado quando comparamos o debate entre especialistas em uma área, por um lado, e a discussão envolvendo céticos (ou leigos), por outro. Quando um conjunto de especialistas em um determinado campo debate sobre um tema de amplo conhecimento comum, várias peças de conhecimento são assumidas como pano de fundo compartilhado pelos membros do grupo. Já quando o debate envolve leigos externos ao domínio da disciplina em questão, não podemos presumir que haja extenso conhecimento de fundo compartilhado, nem que a confiabilidade das evidências seja tomada como garantida. Como os leigos podem não compartilhar das crenças de fundo que os especialistas possuem, o julgamento das *mesmas evidências* pode levar a resultados divergentes entre os dois grupos (DAY; KINCAID, 1994). Isso é bem ilustrado pela discussão sobre as causas antropogênicas do aquecimento global. Enquanto que na comunidade científica há amplo consenso sobre a influência humana no aumento da temperatura média do planeta, entre o público geral esta questão ainda é tratada como controversa (JUNGES; MASSONI, 2018). Esta discussão dá alguma noção sobre como fatores contextuais estão envolvidos e determinam a força da IME.

Agora que temos uma boa noção da natureza da IME, podemos esboçar um breve quadro de conhecimento científico. Inferir à melhor explicação nos permite avaliar (comparativamente) as hipóteses explicativas que são geradas por nossas teorias científicas, com base no conjunto de virtudes explicativas considerado. De nosso conhecimento sobre hipóteses explicativas, somos capazes de inferir que nossas teorias científicas são justificadas racionalmente (MCCAIN, 2015). No entanto, é importante notar que a IME não é um processo que nos leva a inferir a *única* explicação possível. Inferência à melhor explicação não pode nunca mostrar que uma explicação *precisa* ser verdadeira, mas (no máximo) que é mais provável de ser verdadeira que suas concorrentes em contexto no qual certas crenças de fundo são consideradas (WILKENFELD; LOMBROZO, 2015).

Outra consequência importante da IME é que a Ciência é vista como uma atividade essencialmente *competitiva*. Não podemos saber o valor científico de uma hipótese sobre um conjunto de evidências olhando simplesmente para as evidências e a hipótese em questão. Precisamos de *outras* explicações possíveis para compará-las com essa hipótese. Às vezes

uma hipótese parece muito provável, uma vez que ela dá conta do conhecimento disponível muito bem. Mas então surge uma hipótese que parece ainda mais provável e repentinamente a primeira explicação perde força. O inverso também pode acontecer. Uma hipótese pode parecer uma explicação pobre, mas se todas as teorias alternativas são ainda piores, a hipótese se torna mais plausível. O processo exato pelo qual ganhamos conhecimento e avaliamos a qualidade de explicações concorrentes é muito mais complexo do que o que temos aqui, mas este quadro nos dá uma boa noção sobre como as várias peças do quebra-cabeças se encaixam para gerar conhecimento e entendimento científico (MCCAIN, 2015).

UMA HEURÍSTICA PARA ABORDAR EPISÓDIOS DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA

Esta seção busca atender, principalmente, a dois objetivos. O primeiro deles é apresentar argumentos que justifiquem aproximar a discussão de aspectos epistêmicos via IME com características da NdC defendidas pela visão consensual. O segundo objetivo é apresentar uma esquematização que sintetize a abordagem que propomos para o estudo de episódios da História da Ciência, integrando os pontos levantados até aqui. Começaremos apontando correspondências entre os aspectos consensuais da NdC e a descrição de episódios históricos pela IME. Como dito anteriormente, a visão consensual destaca algumas características da NdC, entre elas: o conhecimento científico ser tentativo, empiricamente baseado e subjetivo; envolver a inferência humana, a imaginação e a criatividade; e ser social e culturalmente situado. Já na seção anterior apresentamos, de forma breve, as principais características da Inferência à Melhor Explicação. A IME nos oferece uma forma de descrever como o conhecimento científico é produzido e avaliado. Ela parte do princípio de que um dos principais objetivos da atividade científica é proporcionar explicações que levem à compreensão da natureza. Dessa forma, é no confronto entre explicações concorrentes que hipóteses científicas são criadas e avaliadas. Crenças de fundo e virtudes explicativas especificam os critérios utilizados para avaliar a melhor explicação em um contexto específico. Quando uma teoria particular gera hipóteses que explicam um conjunto de evidências melhor que suas rivais, podemos inferir que essas hipóteses são (ao menos provisoriamente) verdadeiras. Evidentemente esse conhecimento é tentativo, no sentido de que podemos revisar o que pensamos sobre uma teoria particular à luz de novas evidências ou de novas teorias rivais.

Dessa forma, algumas características importantes da NdC consideradas pela visão consensual são naturalmente abordadas pela IME. Exemplos incluem: o caráter provisório do conhecimento científico; a importância da competição entre teorias rivais; a complexa relação entre teorias e experimentos; e a discussão sobre os critérios utilizados pela Ciência para avaliar o conhecimento que ela produz. Os aspectos sociais e culturais da atividade científica também podem ser destacados, ao se explicitar como esses fatores influenciam as explicações produzidas e a escolha entre explicações rivais. A IME viabiliza isso quando é explicitado que os compromissos disciplinares, crenças, conhecimentos prévios, treinamentos e expectativas dos cientistas influenciam o trabalho deles. Estes fatores de fundo afetam a escolha dos cientistas por problemas para investigar e os métodos de investigação, observação e interpretação de resultados. Contrário à crença comum, a Ciência não produz observações neutras. Observações são sempre motivadas e guiadas por certas perspectivas teóricas, além de só adquirirem significado à luz de questões e problemas inseridos em um quadro teórico mais amplo (ABD-EL-KHALICK, 2013).

A vantagem que enxergamos em utilizar a IME para abordar episódios históricos é o foco em (1) identificar os compromissos disciplinares, crenças, conhecimentos prévios, expectativas, etc., que influenciaram os trabalhos dos cientistas em momento particular da História, e (2) refletir, com os estudantes, sobre a racionalidade e objetividade do conhecimento científico, focando em discussões sobre como o conhecimento científico é produzido (contexto-

to da descoberta) e como ele é justificado (contexto da justificação). Há ainda o objetivo/vantagem adicional de (3) apresentar aos estudantes não só a explicação que “venceu” as disputas científicas e se tornou conhecimento aceito, mas destacar o processo por meio do qual esses conflitos ocorrem, o porquê de a Ciência poder ser considerada uma atividade racional e as justificativas que sustentam a aceitação deste conhecimento.

Após apresentar os aspectos básicos que consideramos necessários para abordar episódios históricos no ensino de Ciências segundo a IME, chegou a hora de tentarmos esquematizar como a abordagem proposta se concretiza na prática. Entendemos que seja importante identificar seis elementos principais para uma boa caracterização da abordagem de um episódio da História da Ciência. São eles: (1) identificar o episódio histórico abordado, (2) apresentar o contexto científico da época na qual as explicações em questão foram propostas, (3) destacar as explicações potenciais envolvidas (duas ou mais explicações concorrentes), (4) apontar virtudes explicativas específicas *daquele contexto* para avaliar e justificar as explicações científicas, (5) reconhecer as crenças de fundo nas quais cada uma das explicações potenciais se baseia, e (6) identificar aspectos da NdC (e quando necessário da historiografia da Ciência também) discutidos na análise em questão. O quadro 1, a seguir, sintetiza esses tópicos.

Quadro 1. Esquematização da abordagem de episódios históricos baseada na IME.	
Episódio	Nome do episódio
Contexto científico	Teorias científicas e eventos históricos relevantes para entender o contexto no qual o episódio histórico sob estudo ocorreu.
Explicação potencial 1	Uma das explicações propostas para abordar o problema em questão.
Explicação potencial 2	Explicação concorrente para abordar o problema em questão.
Crenças de fundo de cada uma das explicações envolvidas.	<ul style="list-style-type: none"> • Quais teorias são considerada válidas para abordar este domínio de conhecimento. • Quais metodologias são consideradas confiáveis para a aquisição e interpretação de evidências. • Fatores sociais/culturais que possam influenciar a avaliação das explicações.
Virtudes explicativas	Critérios utilizados para avaliar qual a melhor entre as explicações consideradas.
NdC	Aspectos da NdC e/ou História da Ciência considerados pertinentes para discutir por meio do estudo do episódio histórico em questão.

INFERÊNCIA À MELHOR EXPLICAÇÃO E EPISÓDIOS DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA

Vamos discutir agora sobre o olhar da IME para episódios históricos. Inúmeros são os exemplos apontados pelos filósofos como ilustrações do uso da Inferência à Melhor Explicação na Ciência. Alguns deles incluem: a disputa entre o modelo heliocêntrico do sistema solar de Copérnico e o modelo geocêntrico da teoria Ptolomaica (GAUCH JR 2012); a disputa entre a teoria da combustão do oxigênio de Antoine Lavoisier e a teoria do flogístico (THAGARD, 1978); e a descoberta do elétron por J. J. Thomson para explicar o comportamento de raios catódicos (ACHINSTEIN, 2001). Episódios de IME são identificados com tanta frequência no raciocínio científico que Ernan McMullin (1992) chega a se referir a ela como “a inferência que faz a Ciência” (p. 144, nossa tradução).

Olhemos para três episódios históricos com um pouco mais de detalhe. O primeiro deles é a resistência dos cientistas do século XVII a aceitar a lei da gravitação universal proposta por Isaac Newton. A filosofia mecânica do século XVII considerava que causas não podiam

atuar a distância, exatamente o que as forças propostas por Newton faziam (DAY; KINCAID, 1994). Como a lei da gravitação universal não atendia a esta importante crença de fundo da época, a teoria enfrentou forte resistência a princípio. Só com o passar dos anos, com a capacidade preditiva da teoria superior à de suas concorrentes, esta resistência foi sendo revista e posteriormente abandonada, implicando na ampla aceitação da teoria e adoção de novas crenças de fundo para este campo do conhecimento. (GINGRAS, 2001).

O segundo caso é a recusa de Albert Einstein em aceitar a realidade física proposta pela Teoria Quântica. Einstein rejeitou a Teoria Quântica porque, entre outras coisas, ela falhava em fornecer previsões determinísticas para os fenômenos, uma virtude explicativa que Einstein considerava valiosa demais para abandonar. O subsequente desenvolvimento teórico e sucesso empírico da Física Quântica fez com que a comunidade científica fosse gradativamente abrindo mão dessa exigência. Como resultado, a física quântica não atendeu às expectativas de Einstein, que teve sua crença sobre o que seria necessário para uma explicação satisfatória eclipsada pelo sucesso explicativo da teoria (DAY; KINCAID, 1994).

E, por fim, um terceiro exemplo interessante ocorreu na astronomia do século XIX. No começo daquele século foi percebido que a órbita de Urano, um dos sete planetas conhecidos na época, diferia da órbita prevista com base na teoria da gravitação universal de Newton. Uma conclusão possível era que a teoria de Newton havia sido refutada. No entanto, dado o grande sucesso da teoria por (na época) mais de dois séculos, esta explicação não aderiu bem às crenças de fundo vigentes. Dois astrônomos, John Couch Adams e Urbain Le Verrier (independentemente um do outro, mas quase simultaneamente) sugeriram que havia um oitavo planeta, ainda desconhecido, no sistema solar (DOUVEN, 2011). De acordo com os dois cientistas, isto proporcionava uma boa explicação do desvio da órbita de Urano. Não muito tempo depois, este planeta, que agora é conhecido como Netuno, foi observado pela primeira vez.

Mas isto gerou um precedente: quando um planeta desvia do seu curso Newtoniano, a gravidade de algum outro planeta desconhecido deve ser a responsável. Mercúrio foi o próximo planeta cuja órbita foi notada por estar um pouco imprecisa³¹. O próprio Le Verrier considerou que a melhor explicação, é claro, era haver outro planeta, cuja órbita foi calculada para estar dentro da órbita de Mercúrio, ainda mais perto do Sol. Esse novo planeta foi chamado de Vulcano. A hipótese de Vulcano era uma boa explicação da derivação da órbita de mercúrio? Note que a única alternativa (prática) seria dizer que a mecânica newtoniana estava equivocada (supondo que as observações estivessem corretas), e a mecânica newtoniana estava entre as maiores realizações científicas da humanidade. Nos anos seguintes alguns astrônomos chegaram a reivindicar ter observado Vulcano, mas a maioria não conseguiu observá-lo e a hipótese definiu. Outras alternativas foram propostas, como a existência de um satélite de Mercúrio; massas até 10% maiores para o planeta Vênus; um achatamento gravitacional do Sol; e modificações na lei da gravitação universal. Mas todas elas possuíam seus problemas, e a anomalia foi ignorada até que uma explicação melhor fosse fornecida (DOUVEN, 2011). O problema foi retomado no fim da década de 1910, quando a teoria da relatividade geral de Einstein previu a órbita observada sem assumir a existência de um planeta entre Mercúrio e o Sol.

Episódios como esse ilustram, brevemente, o desenrolar complexo da História da Ciência. É na tentativa de produzir explicações que virtudes explicativas, crenças de fundo e teorias são avaliadas e eventualmente substituídas. No entanto, não existem fórmulas prontas e universais. O emprego do mesmo raciocínio a duas situações semelhantes pode levar a resultados opostos, e a ausência de uma boa explicação pode fazer uma anomalia ser “negligenciada” enquanto não houver uma teoria capaz de resolvê-la. O objetivo deste texto não é fazer uma análise detalhada desses episódios. Buscamos apenas apresentar discussões que podem

³¹ Havia uma discrepância significativa entre os valores previsto e observado para a precessão do periélio (deslocamento ao longo dos anos do ponto da órbita mais próximo do Sol) de mercúrio.

ser levantadas ao se aplicar o olhar da IME ao estudo de episódios como esses da História da Ciência.

UMA BREVE ILUSTRAÇÃO

Para concluir nossa apresentação da proposta, vamos detalhar um pouco mais como o último dos episódios da seção anterior pode ser abordado por meio da IME. Para este episódio o problema da época era explicar as observações da órbita de Mercúrio que divergiam do resultado previsto com o uso da lei da gravitação Universal. Muitas explicações foram propostas para tentar resolver este problema, mas destacamos duas delas em particular: o postulado da existência de Vulcano (explicação potencial 1) e tentativas de corrigir a lei da gravitação universal (explicação potencial 2). Uma importante crença de fundo que permeava este contexto foi a confiança na validade da lei da Gravitação Universal. Já no julgamento das explicações propostas, muitas virtudes explicativas são utilizadas simultaneamente para testar as inúmeras hipóteses propostas. Uma que podemos destacar, em defesa da hipótese de Vulcano, era a importância dada à lei da gravitação Universal naquela época, e o grande valor que era atribuído às soluções que preservavam o domínio de validade desta importante teoria (conservadorismo epistêmico).

Embora fosse uma explicação teoricamente eficaz, advogou em oposição à hipótese, no entanto, o fato de que a importante virtude explicativa de realizar medições reproduzíveis do resultado previsto não foi atendida. Mas é ingênuo considerar que experimentos são a origem do conhecimento e o único árbitro da produção de conhecimento científico. Este próprio caso será resolvido posteriormente pela teoria da relatividade a partir de uma perspectiva puramente teórica. No entanto, iremos restringir o episódio em questão apenas ao conhecimento obtido até o final do século XIX. Podemos tirar algumas conclusões valiosas para o ensino de aspectos da NdC daqui. Uma delas diz respeito ao caráter tentativo do conhecimento científico. A Ciência é, em grande medida, a busca por refinar nossas explicações com base em experiências de tentativa e erro. O episódio também possibilita fazer uma boa distinção entre observação e inferência, inclusive ao abordar a falibilidade de observações científicas (como as supostas observações de Vulcano) e o caráter tentativo das inferências realizadas. Podemos também problematizar a existência de um método científico único na Ciência, principalmente pelo fato de que o mesmo raciocínio aplicado a dois casos semelhantes (Netuno e Vulcano) levou a resultados completamente contrários. Utilizamos o Quadro 2, a seguir, para sintetizar os pontos mencionados nesta ilustração, exemplificando a aplicação da esquematização proposta para o episódio em questão.

Quadro2. Exemplo de aplicação da IME para abordar o episódio sobre Vulcano.	
Episódio	Explicando a precessão do periélio de Mercúrio
Contexto científico	Descoberta de Netuno e observação da órbita anômala de Mercúrio.
Explicação potencial 1	Deve existir um novo planeta chamado Vulcano.
Explicação potencial 2	A lei da Gravitação Universal precisa ser corrigida.
Crenças de fundo da explicação 1	<ul style="list-style-type: none"> • Validade da Lei da Gravitação Universal. • Reprodução de raciocínio bem-sucedido no caso de Netuno.
Crença de fundo da explicação 2	<ul style="list-style-type: none"> • Adequar teorias da época aos resultados experimentais obtidos.
Virtudes explicativas	<ul style="list-style-type: none"> • Resolver a discordância sem falsear a adequação da teoria aceita (alterar a lei da gravitação poderia gerar muitos problemas com respeito a outras situações às quais ela era aplicada com sucesso).

NdC	<ul style="list-style-type: none"> • Caráter tentativo do conhecimento científico. • Distinção entre inferência e observação. • Não existe um método científico universal. • O êxito científico costuma ser muito exaltado (caso de Netuno), enquanto equívocos são frequentemente ignorados (caso de Vulcano).
-----	---

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No que diz respeito a explicações, o foco do ensino de Ciências tipicamente se concentra mais em compartilhar explicações corretas – ou seja, as vencedoras das disputas históricas – do que entender o processo que levou essas explicações a serem aceitas. Se por um lado há um valor inegável em aprender explicações (consideradas) verdadeiras, por outro lado entender a construção e o confronto de explicações concorrentes na Ciência, por meio do estudo de episódios históricos, pode ser particularmente frutífero para abordar aspectos da NdC. É desejável que os estudantes entendam não só quais são as explicações que a Ciência produz, mas também o processo por meio do qual essas explicações são avaliadas e selecionadas. Tentando contribuir para esta questão, este trabalho introduz a IME e seu potencial para ser utilizada como heurística para abordar episódios da História da Ciência. Um foco central para esta abordagem é problematizar os critérios que os cientistas do período histórico em questão utilizaram para avaliar as explicações disponíveis. Como esta abordagem consiste, basicamente, em explorar o confronto (historicamente situado) entre pontos de vista distintos, ela se aproxima, em alguma medida, de aplicar ao estudo de episódios históricos o que tem sido feito na Educação em Ciências em trabalhos sobre argumentação científica. Um exemplo são os trabalhos que adaptam o modelo argumentativo de Toulmin (e.g., SADLER; DONNELLY, 2006; NASCIMENTO; VIEIRA, 2008). No entanto, o foco principal de trabalhos sobre argumentação (como os citados) está em conectar as hipóteses produzidas com as evidências disponíveis por meio de justificativas racionais. Por conta disso, um importante diferencial da IME é o foco em problematizar os critérios utilizados para avaliar as hipóteses propostas e as crenças nas quais cada posição se baseia.

Outro mérito que enxergamos no uso da IME para abordar episódios históricos é permitir discutir elementos da NdC sem adotar postura dogmática em defesa da Ciência – defesa autoritária do conhecimento científico – por um lado, nem favorecer um relativismo no qual conhecimento científico e opinião sejam igualmente válidos – considerar que a Ciência não possua qualquer autoridade – por outro. O conhecimento científico e os cientistas são falíveis, o conhecimento é considerado provisório, a Ciência não é neutra, etc. Mas, apesar de tudo isso, há boas razões para considerarmos que uma explicação é melhor que suas concorrentes dentro do domínio científico. Obviamente, explicitar essas questões não é uma exclusividade da IME, mas elas são destacadas naturalmente em um estudo pautado por esta abordagem. Para garantir isso, é necessário estar vigilante sobre nossas próprias crenças de fundo ao abordar um episódio histórico, para que a escolha dos argumentos em defesa de cada um dos lados seja a mais imparcial possível. Para que um embate epistêmico autêntico seja apresentado, cada explicação precisa ser plausível e defensável. Uma abordagem rica a partir da IME deve conter, necessariamente, o confronto entre mais de uma explicação potencial e as crenças de fundo nas quais cada um dos lados se baseiam, apresentadas de forma autêntica e independente de qual lado tenha se sagrado vencedor historicamente.

Para concluir, vale ressaltar que é ingênuo achar que apenas uma abordagem como esta seja suficiente para superar toda a dificuldade envolvida na complexa tarefa de incluir a História no ensino de Ciências. Entre os fatores que dificultam seu uso podemos citar: a falta de materiais didáticos adequados para abordar HFC; necessidade de um framework instrucional que dê suporte para a HFC; e um ensino tradicional resistente a propostas de reformulação

e voltado para cobrir grandes quantidades de conteúdo e atender a avaliações externas (HENKE; HÖTTECKE, 2015). O problema é complexo, envolve questões políticas e precisa ser atacado por muitas frentes. Dessa forma, o presente trabalho busca trazer uma contribuição específica para esta questão, com potencial para ser explorado em estudos futuros.

REFERÊNCIAS

- ABD-EL-KHALICK, F. Teaching with and about nature of science, and science teacher knowledge domains. **Science & Education**, Dordrecht, v. 22, n. 9, 2087-2107, 2013.
- ACEVEDO, J. A. et al. Mitos da didática das Ciências acerca dos motivos para incluir a natureza da Ciência no ensino das ciências. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 11, n. 1, p. 1-15, 2005.
- ACHINSTEIN, P. **The book of evidence**. Oxford University Press, 2001.
- ALLCHIN, D. Pseudohistory and pseudoscience. **Science & Education**, Dordrecht, v. 13, n. 3, p. 179-195, 2004.
- CHAMBLISS, M. J.; CHRISTENSON, L. A.; PARKER, C. Fourth graders composing scientific explanations about the effects of pollutants: Writing to understand. **Written Communication**, v. 20, n. 4, p. 426-454, 2003.
- DASCAL, M. (1979). Conversational relevance. In: MARGALIT, A. (Org.). **Meaning and use**. Dordrecht: Springer, p. 153-174, 1979.
- DAY, T.; KINCAID, H. Putting inference to the best explanation in its place. **Synthese**, v. 98, n. 2, p. 271-295, 1994.
- DOUVEN, I. Abduction. In ZALTA, E. N. (Org.), **The Stanford encyclopedia of philosophy**. Spring, 2011. Disponível em: <https://stanford.library.sydney.edu.au/entries/abduction/>. Acesso em: 02 de dezembro de 2018.
- DUSCHL, R. A.; GRANDY, R. Two views about explicitly teaching nature of science. **Science & Education**, Dordrecht, v. 22, n. 9, p. 2109-2139, 2013.
- EL-HANI, C. N. Notas sobre o ensino de história e 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: Editora Livraria da Física, p. 3-21, 2006.
- GAUCH JR, H. G. **Scientific method in brief**. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- GIERE, R. N. **Explaining science: A cognitive approach**. Chicago: University of Chicago Press, 1988.
- GIL-PÉREZ, D., et al. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.

- GINGRAS, Y. What did mathematics do to physics? **History of science**, v. 39, n. 4, p. 383-416, 2001.
- HARMAN, G. H. The inference to the best explanation. **The philosophical review**, v. 74, n. 1, p. 88-95, 1965.
- HARMAN, G. H. **Change in view: Principles of reasoning**. The MIT Press, 1986.
- HEMPEL, C. G.; OPPENHEIM, P. Studies in the Logic of Explanation. **Philosophy of science**, v. 15, n. 2, p. 135-175, 1948.
- HENKE, A.; HÖTTECKE, D. Physics teachers' challenges in using history and philosophy of science in teaching. **Science & Education**, Dordrecht, v. 24, n. 4, p. 349-385, 2015.
- HOLTON, G. Einstein, Michelson, and the "crucial" experiment. **Isis**, v. 60, n. 2, p. 133-197, 1969.
- IRZIK, G.; NOLA, R. A family resemblance approach to the nature of science for science education. **Science & Education**, Dordrecht, v. 20, n. 7-8 p. 591-607, 2011.
- JUNGES, A. L. Inferência à melhor explicação. **Intuitio**, Porto Alegre, v. 1, n. 1, p. 82-97, 2008.
- JUNGES, A. L.; MASSONI, N. T. O Consenso Científico sobre Aquecimento Global Antropogênico: Considerações Históricas e Epistemológicas e Reflexões para o Ensino dessa Temática. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 18, n. 2, p. 455-491, 2008.
- KRAGH, H. A sense of history: history of science and the teaching of introductory quantum theory. **Science & Education**, Dordrecht, v. 1, n. 4, p. 349-363, 1992.
- LEDERMAN, N. G. Nature of Science: past, present, and future. In: ABELL, S. K.; LEDERMAN, N. G. (Org.). **Handbook of research on science education**. Lawrence Erlbaum, p.831-879, 2007.
- LEDERMAN, N. G.; ABD-EL-KHALICK, F. Avoiding de-natured science: Activities that promote understandings of the nature of science. In: McCOMAS, W. F. (Org.). **The nature of science in science education**. Dordrecht: Springer, p. 83-126, 1998.
- LIPTON, P. **Inference to the best explanation**. Routledge, 2003.
- LYCAN, W. G. Explanation and epistemology. In: MOSER, P. K. (Org.). **The Oxford handbook of epistemology**. Oxford University Press, p. 408-433, 2002.
- MARTINS, A. F. P. História e Filosofia da Ciência no ensino: Há muitas pedras nesse caminho... **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 24, n. 1, p. 112-131, 2007.
- MATTHEWS, M. S. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 12, n. 3, p. 164-214, 1995.

MATTHEWS, M. R. Changing the focus: From nature of science (NOS) to features of science (FOS). In: KHINE, M. S. (Org.). **Advances in nature of science research**. Dordrecht: Springer, p. 3-26, 2012.

MCCAIN, K. Explanation and the nature of scientific knowledge. **Science & Education**, Dordrecht, v. 24, n. 7-8, 827-854, 2015.

MCCOMAS, W. F.; CLOUGH, M. P.; ALMAZROA, H. The role and character of the nature of science in science education. In: McCOMAS, W. F. (Org.). **The nature of science in science education**. Dordrecht: Springer, p. 3-39, 1998.

MCMULLIN, E. **The inference that makes science**. Milwaukee: Marquette University Press, 1992.

MCNEILL, K. L.; PIMENTEL, D. S. Scientific discourse in three urban classrooms: The role of the teacher in engaging high school students in argumentation. **Science Education**, Hoboken, v. 94, n. 2, p. 203-229, 2010.

MEDEIROS, A.; MEDEIROS, C. Questões epistemológicas nas iconicidades de representações visuais em livros didáticos de física. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, 2001.

MOURA, B. A. O que é natureza da Ciência e qual sua relação com a História e Filosofia da Ciência. **Revista Brasileira de História da Ciência**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 32-46, 2014.

NASCIMENTO, S. S.; VIEIRA, R. D. Contribuições e limites do padrão de argumento de Toulmin aplicado em situações argumentativas de sala de aula de ciências. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 8, n. 2, 2008.

NERSESSIAN, N. J. The cognitive basis of model-based reasoning in science. In: CARRUTHERS, P.; STICH, S.; SIEGAL, M. (Eds.), **The cognitive basis of science**. New York: Cambridge University Press, p. 133-153, 2002.

NIESWANDT, M.; BELLOMO, K. Written extended-response questions as classroom assessment tools for meaningful understanding of evolutionary theory. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 46, n. 3, p. 333-356, 2009.

NIAZ, M. **Critical appraisal of physical science as a human enterprise: Dynamics of scientific progress** (Vol. 36). Springer Science & Business Media, 2009.

OSBORNE, J. et al. What “ideas-about-science” should be taught in school science? A Delphi study of the expert community. **Journal of research in science teaching**, v. 40, n. 7, p. 692-720, 2003.

PRAIA, J. F.; GIL-PÉREZ, D.; PEÑA, A. V. O papel da natureza da ciência na educação para a cidadania. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 13, n. 2, p. 141-156, 2007.

REIS, P.; GALVÃO, C. Controvérsias sócio-científicas e prática pedagógica de jovens professores. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 131-160, 2005.

RODRIGUES, R. F.; PEREIRA, A. P. Explicações no ensino de ciências: revisando o conceito a partir de três distinções básicas. **Ciencia & Educação**, Bauru, v. 24, n. 1, p. 43-56, 2018.

RUDOLPH, J. L. Reconsidering the nature of science as a curriculum component. **Journal of Curriculum Studies**, v. 32, n. 3, p. 403-419, 2000.

SÁ, L. P.; QUEIROZ, S. L. Argumentação no ensino de ciências: contexto brasileiro. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v., 13, n. 2, p. 13-30, 2011.

SADLER, T. D.; CHAMBERS, F. W.; ZEIDLER, D. L. Student conceptualizations of the nature of science in response to a socioscientific issue. **International Journal of Science Education**, v. 26, n. 4, p. 387-409, 2004.

SADLER, T. D.; DONNELLY, L. A. Socioscientific argumentation: The effects of content knowledge and morality. **International Journal of Science Education**, Hoboken, v. 28, n. 1, p. 1463-1488, 2006.

SASSERON, L. H.; CARVALHO, A. M. P. Uma análise dos referenciais teóricos para estudo da argumentação no ensino de ciências. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 13, n. 3, p. 243-262, 2011.

SCHARMANN, L. C.; SMITH, M. U. Further thoughts on defining versus describing the nature of science: A response to Niaz. **Science Education**, Hoboken, v. 85, n. 6, p. 691-693, 2001.

THAGARD, P. R. The best explanation: Criteria for theory choice. **The journal of philosophy**, v. 75, n. 2, p. 76-92, 1978.

THAGARD, P. Causal inference in legal decision making: Explanatory coherence vs. Bayesian networks. **Applied Artificial Intelligence**, v. 18, n. 3-4, p. 231-249, 2004.

VAN DIJK, E. M. Portraying real science in science communication. **Science Education**, Hoboken, v. 95, n. 6, p. 1086-1100, 2011.

VAN EIJCK, M.; HSU, P. L.; ROTH, W. M. Translations of scientific practice to “students' images of science”. **Science Education**, Hoboken, v. 93, n. 4, p. 611-634, 2009.

VÁZQUEZ-ALANSO, A. et al. Consensos sobre a natureza da ciência: a ciência e a tecnologia na sociedade. **Química nova na escola**, São Paulo, v. 27, p. 34-50, 2008.

WEBER, E; VAN BOUWEL, J; DE VREESE, L. **Scientific explanation**. Dordrecht: Springer, 2013.

WILKENFELD, D. A.; LOMBROZO, T. Inference to the best explanation (IBE) versus explaining for the best inference (EBI). **Science & Education**, Dordrecht, v. 24, n. 9-10, p. 1059-1077, 2015.

Apêndice E - Texto de Apoio para o Seminário Sobre o Experimento de Stern-Gerlach

Contexto histórico (introdução)

O modelo atômico de Bohr relaciona as órbitas estáveis ao momento angular do elétron. Este modelo apresentava dificuldade em explicar a estrutura fina do espectro atômico. Sommerfeld “atualizou” o modelo de Bohr com efeitos relativísticos, o que fez com que as órbitas dos elétrons fossem quantizadas quanto à orientação espacial (em relação a um campo magnético externo, por exemplo). Isto fez Sommerfeld introduzir um número quântico (m), relacionado à quantização do momento angular (que ainda não era exatamente o mesmo m_l utilizado atualmente).

Poderia falar também sobre o efeito Zeeman (normal), que Sommerfeld e Debye explicaram (independentemente) e, principalmente, da falha das teorias de Sommerfeld e de Lorentz-Lamour em explicar o efeito Zeeman anômalo. O último problema foi uma das motivações que levou Stern a idealizar seu famoso experimento.

O experimento

Stern e Gerlach montam o experimento e realizam suas observações entre 1921 e 1922 (descrever seu funcionamento).

Interpretação do resultado

Uma discussão interessante é chamar atenção para como o resultado foi interpretado na época. Stern e Gerlach acreditavam estar medindo o momento magnético do átomo, que supunham estar relacionado ao movimento orbital do elétron. Nesse sentido, vale à pena enfatizar que o experimento foi considerado um sucesso (postal que Gerlach envia para Bohr ilustra bem isso). Dá para fazer um caso breve de Inferência à Melhor Explicação aqui, sobre porque o experimento foi considerado uma comprovação da teoria de Bohr. O resultado previsto pela teoria clássica é uma mancha contínua, enquanto que o resultado obtido indicava um comportamento discreto da grandeza estudada.

A ideia de um momento angular intrínseco do elétron só foi proposta por Uhlenbach e Goudsmit em 1925, enquanto o termo “Spin” foi cunhado por Pauli ao tentar (sem sucesso) compatibilizar o magnetismo do elétron com a relatividade Especial. O conceito de Spin só seria utilizado para explicar o experimento de Stern-Gerlach em 1927. O Spin foi incorporado definitivamente à teoria quântica a partir de 1928, quando Dirac integrou a mecânica quântica

com a teoria da relatividade restrita. Acho que depois disso poderia encerrar com uma explicação mais padrão/quantitativa do que é o Spin.

Apêndice F - Texto de Apoio para o Seminário Sobre as Teorias do Éter e o Interferômetro De Michelson-Morley

Contexto histórico

1809: Arago realiza experimento tentando medir a velocidade da luz (sem obter sucesso). Neste momento é hegemônica a visão corpuscular da luz.

Nas duas primeiras décadas do século XIX surgem evidências importantes em favor da hipótese ondulatória da luz (obtidas por T. Young e A. J. Fresnel).

Teoria de Fresnel (1819) (explicação 1)

Fresnel propõe a existência de um éter como meio de propagação da luz. Ele estaria em repouso “absoluto” (sem interagir com o movimento da Terra). Ele também considerava que havia uma diferença de densidade de éter em materiais transparentes, o que fazia a velocidade da luz se modificar nesses meios.

Arago pede para Fresnel explicar seu resultado nulo a partir de sua teoria. Fresnel publica um artigo em 1819, que lança as bases para a ótica ondulatória dos corpos em movimento. Fresnel aplicou sua teoria a experimentos famosos realizados por Arago e Boscovich, mostrando que não era possível identificar nenhum efeito do movimento da Terra através do éter utilizando esses experimentos.

Os cálculos de Fresnel são altamente complicados e, em vários pontos, ele fez uma simplificação: levou em consideração apenas termos nos quais a razão entre a velocidade da Terra e a da luz (v/c) estava elevada à primeira potência [teoria de primeira ordem em (v/c)].

Em 1839 Babinet realiza outro experimento de primeira ordem (usando um método interferométrico) e obteve resultado nulo.

Teoria de Stokes (1845) (explicação 2)

Em 1845 Stokes propõe uma nova teoria do éter, muito mais simples que a de Fresnel. Ela entende o éter como um líquido viscoso, que adere à superfície dos corpos e é quase totalmente arrastado pela Terra, ficando em repouso em relação a ela em regiões próximas à superfície. Esta abordagem explicava de forma direta e simples os resultados de Boscovich, Arago e Babinet. Embora a Terra se mova através do éter e a luz seja transmitida pelo éter, os

fenômenos da ótica geométrica (reflexão, refração e propagação retilínea) não permitiriam detectar esse movimento.

Determinando qual é a melhor explicação (IME)

Em 1850 Foucault e Fizeau fizeram as primeiras medidas terrestres da velocidade da luz, através de métodos diferentes, obtendo resultados concordantes. No mesmo ano, Foucault conseguiu medir a velocidade da luz na água e mostrar que ela era menor do que no ar, confirmando o resultado previsto pela teoria ondulatória.

Em 1851 Fizeau faz um experimento famoso para detectar diferenças de velocidade da luz quando se move a favor ou contra o fluxo da água que escoar por um sistema de tubos. A teoria de Fresnel previa um deslocamento de 0,22 franjas para este experimento. Se houvesse arrastamento total do éter pela água, o efeito seria de 0,46 franjas, e sem arrastamento o efeito seria nulo. O resultado experimental foi um deslocamento de 0,23 franjas. Dessa forma, o experimento de Fizeau proporcionou uma importante confirmação da teoria de Fresnel. Como a teoria de Stokes não previa este efeito, ela passou a ser deixada de lado por quase todos os físicos. Como resultado: em meados do século XIX a luz era considerada uma onda de éter, e acreditava-se que o éter se comportava nos corpos transparentes de acordo com a teoria de Fresnel.

Nos anos seguintes, vários experimentos foram sendo realizados em busca de explorar as propriedades do éter. Em 1861 Respighi realizou pela primeira vez o experimento proposto por Bosovich, obteve um resultado nulo e concluiu que a experiência era favorável à teoria de Fresnel. Hoek, por sua vez, realizou outros dois experimentos que deram resultados favoráveis à teoria de Fresnel. Um semelhante ao de Babinet (em 1868), e um experimento sobre a aberração terrestre com o telescópio cheio de água. Posteriormente (em 1874) Mascart realizou um grande conjunto de experimentos óticos procurando efeitos do movimento da Terra em relação ao éter (desvio da luz por um prisma, posição dos feixes de interferência em anéis de Newton, um experimento semelhante ao de Babinet, e outros). Em nenhum caso observou efeitos regulares que pudessem ser associados ao movimento da Terra (ou seja, foram todos compatíveis com a teoria de Fresnel).

Além desses resultados experimentais, no início da década de 1870 foram publicados três trabalhos teóricos, por Veltmann, Potier e Mascart, estabelecendo de forma conclusiva que: se a teoria de Fresnel estava correta, nenhum experimento ótico terrestre envolvendo aberrações,

reflexão e refração apresentaria qualquer efeito mensurável devido ao movimento da Terra através do éter, porque haveria um cancelamento dos diversos termos de primeira ordem.

Tentativas de medir a velocidade da Terra em relação ao éter antes de Michelson

A teoria de Fresnel considerava, fundamentalmente, fenômenos de refração da luz. Não poderia haver outros efeitos que não se anulassem? Segue lista de experimentos tentando identificar a velocidade da Terra com relação ao éter antes de Michelson: Fizeau propôs um experimento similar ao exemplo clássico que é utilizado em aulas de relatividade atualmente (fonte de luz colocada no centro de um trem em movimento) em 1854, mas não o realizou. Em 1859 Fizeau propõe outro experimento (com grande repercussão na época) envolvendo a polarização da luz, mas não se chega a consenso sobre o significado dos resultados. Babinet propõe em 1862 um experimento que utiliza difração. Em 1864 Ångström realiza experimento semelhante ao proposto por Babinet, mas os resultados não são conclusivos por conta da falta de consenso sobre a forma correta de avaliar o experimento teoricamente, e por falta de precisão suficiente dos experimentos.

Dessa forma, havia uma situação complexa na década de 1870. Por um lado, a teoria de Fresnel para o éter e seu arrastamento parecia bem confirmada, e essa teoria excluía a possibilidade de detectar o movimento da Terra através do éter por experimentos envolvendo apenas refração, reflexão e aberração da luz. Por outro lado, não era absurdo imaginar que outros fenômenos luminosos pudessem trazer evidência do movimento da Terra através do éter – e, aparentemente, Fizeau e Ångström haviam detectado fenômenos desse tipo.

Em 1879 Maxwell escreve um famoso artigo sobre o éter. Lá ele discutiu (entre outras coisas) alguns dos experimentos que haviam sido realizados para tentar detectar o movimento da Terra em relação ao éter, e discutiu algumas outras possibilidades. Se supormos que o éter está parado em todo o universo e a Terra se desloca através dele (como Fresnel propôs), teríamos algo semelhante a um “vento de éter” passando pela Terra. Como a luz é uma onda de éter, sua velocidade seria diretamente influenciada por este vento – como acontece com o som. Esta diferença de velocidade influenciaria o tempo que a luz gasta para percorrer a *mesma* distância em direções diferentes, dependendo de seu movimento com relação a este “vento”. E o mais importante: esta diferença estaria relacionada à segunda ordem de v/c . O problema era que este é um efeito muito pequeno, sendo quase impossível de ser medido.

Os experimentos de Michelson

No mesmo ano (1879) Maxwell morreu. No ano seguinte sua carta foi publicada e Todd discutiu o assunto com Michelson. Michelson era a pessoa que havia feito as melhores medidas da velocidade da luz até aquela época (em 1873). Para resolver o problema proposto por Maxwell, Michelson pensou que o único modo de medir uma variação tão pequena seria utilizando métodos interferométricos – com os quais ele não estava suficientemente familiarizado.

Michelson viaja para a Europa no início de 1880, ficando em Paris (com Jamin) e depois em Berlim (onde trabalhou alguns meses no laboratório de Helmholtz). Em 1881 Michelson manda construir, na Alemanha, seu famoso interferômetro. O princípio do aparelho é comparar o tempo de ida e volta para a luz percorrer duas direções perpendiculares. Os resultados do experimento foram menores que a previsão teórica, e Michelson cita a hipótese de Stokes, dando a entender que havia encontrado um experimento crucial entre as teorias de Fresnel e Stokes. Depois que alguns erros teóricos que Michelson havia cometido foram corrigidos, se concluiu que o experimento não possuía a precisão necessária para fornecer conclusões confiáveis. O experimento que levou dois anos para ser desenvolvido não permitia concluir nada. Michelson perdeu o interesse pela questão, até que em 1884 lordes Kelvin e Rayleigh o convenceram a fazer o experimento com uma precisão maior. Antes, ele reproduz o experimento de Fizeau (que nunca havia sido repetido) e volta a obter resultados compatíveis com a teoria de Fresnel.

O famoso interferômetro de Michelson e Morley

Em 1887 Michelson e Morley montaram um interferômetro muito melhor (dez vezes mais sensível) que o anterior. Substituíram aço por mármore, flutuando sobre mercúrio líquido, e fizeram os feixes irem e voltarem várias vezes, amplificando o efeito. Eles realizaram uma série de medidas durante quatro dias, sem obter o resultado previsto. Concluíram então que o efeito era nulo e que não era possível medir a velocidade da Terra com relação ao éter que a teoria de Fresnel previa.

Problema: o experimento de Fizeau confirmava a teoria de Fresnel para o arrastamento do éter por corpos transparentes; enquanto que o resultado nulo do interferômetro refutava a teoria de Fresnel. A teoria de Stokes explicava o resultado nulo do experimento com o interferômetro, mas não previa o arrastamento parcial do éter pelos corpos transparentes. Seria preciso elaborar uma nova teoria do éter, ou descobrir algum modo (não muito evidente) de conciliar uma das teorias com os resultados obtidos.

Tentativa de explicar o experimento

Em 1892 Fitzgerald e Lorentz propuseram, independentemente um do outro, uma possível solução para o impasse. Ambos consideraram que era possível manter a teoria de Fresnel, supondo que o movimento do interferômetro através do éter causasse uma *contração* do seu comprimento. Se o braço que se move paralelamente ao vento de éter sofresse uma contração, passando do comprimento L para $L' = L(1 - v^2/2c^2)$, os tempos de ida e volta da luz nos dois braços do interferômetro passariam a ser iguais (considerando-se termos até a segunda ordem de v/c). Na verdade, infinitas combinações de mudanças de comprimento dos dois braços poderiam explicar o efeito nulo, desde que a *razão* entre o comprimento longitudinal e transversal sofresse um variação de $(1 - v^2/2C^2)$.

Na época não havia nenhum motivo *físico* para imaginar que o movimento dos corpos através do éter deveria mudar suas dimensões. Tanto Fitzgerald quanto Lorentz estavam, provavelmente, se guiando simplesmente pela ideia de que *alguma coisa* poderia estar cancelando o efeito do vento de éter, e imaginaram então esse efeito de contração. Michelson tentou testar a teoria de Stokes utilizando um “interferômetro vertical” (1897), sem obter sucesso. A conclusão de Michelson foi de que havia duas possibilidades: o éter é arrastado (de acordo com a teoria de Stokes), mas o arrastamento se estende até enormes distância da superfície da Terra; ou o éter não é arrastado (de acordo com a teoria de Fresnel), mas os corpos se contraem (como sugerido por Lorentz e Fitzgerald).

O que se poderia concluir por volta de 1900?

A situação era confusa. As duas teorias mais importantes do éter – de Fresnel e de Stokes – permitiam explicar uma parte dos resultados experimentais, mas ambas tinham problemas. A teoria de Fresnel só não era capaz de explicar sozinha o experimento de Michelson-Morley de 1887, porém ela era compatível com o resultado se a contração dos objetos fosse considerada. Essa foi a direção em que alguns pesquisadores importantes, como Poincaré e Lorentz, seguiram.

Apêndice G - Texto de Apoio para o Seminário Sobre Radioatividade

Contexto histórico

A radioatividade é descoberta em 1896 por Becquerel (embora o termo tenha sido cunhado posteriormente pelos Curie). Em 1898 madame Curie apresenta à Academia Francesa de Ciências suas primeiras constatações acerca do fenômeno. Utilizando a propriedade da radiação do urânio de ionizar o ar em sua vizinhança, ela relata que, além do urânio e de seus compostos, também o tório emitia o mesmo tipo de radiação. Sua investigação levou à descoberta dos elementos polônio e rádio.

Em 1899 Rutherford (no Canadá) conduz diversos experimentos de natureza elétrica com o urânio. O experimento consistia em medir a radiação que ultrapassava diversas camadas finas de metal. Conclusão: a radiação do urânio é complexa e estão presentes ao menos dois tipos distintos de radiação - uma que é muito rapidamente absorvida, denominada de radiação alfa, e outra, de caráter mais penetrante, que foi chamada de radiação beta.

Surge a ideia de desintegração nuclear

Em 1899 Giesel identificou que a deflexão dos raios beta num campo magnético ocorria na mesma direção que a deflexão dos raios catódicos, o que sugeria uma carga negativa para a radiação beta. Também chamou a atenção dos cientistas que aquela radiação pouco penetrante que Rutherford classificou como alfa era responsável pela "maior parte da ionização observada na vizinhança de uma substância radioativa, e que a maior parte da energia irradiada era na forma de raios alfa". Conforme se conseguia enriquecer cada vez mais o rádio, mais os cientistas aceitavam a hipótese de que, além de ter natureza atômica, a partícula alfa seria um átomo de algum elemento leve. A inclinação ao átomo de hélio encontrou apoio nos experimentos químicos de Ramsay e Soddy (em 1903). Eles fizeram análises espectrais dos produtos radiados pelo rádio e identificaram que, depois de algum tempo, o espectro do hélio aparecia com linhas muito bem definidas.

O casal Curie propôs duas hipóteses quanto à energia gerada nos processos radioativos. A primeira delas supunha que as substâncias radioativas, por serem compostas por átomos pesados, retiravam radiações do meio e as reemitiam - uma hipótese de cunho gravitacional. A segunda hipótese seria de que as substâncias radioativas estivessem emitindo as radiações - que levava a crer que aqueles átomos estavam se transformando constantemente.

Entre 1902 e 1903³² Rutherford e Soddy passaram a trabalhar sobre a segunda hipótese, pesquisando compostos de rádio, urânio e, especialmente, tório³³. Foi identificado um comportamento anômalo na série de desintegração do tório, com a radioatividade do tório se mantendo em equilíbrio³⁴. A explicação dada para este efeito foi que: a radioatividade constante possuída pelo tório estaria em um valor de equilíbrio. A taxa de aumento da radioatividade – devido à produção de material novo – é balanceada pela taxa de decaimento do tório formado (acho que vale à pena dar destaque para este efeito).

Foi a partir desse efeito que foi proposta a hipótese da desintegração atômica. Foi feita uma série de experimentos nas emanações do tório, especialmente na que era conhecida como tório X (hoje conhecida como um isótopo do rádio), descrevendo suas características químicas e taxa de produção. Eles concluíram que a radioatividade é um fenômeno atômico e acompanhado por mudanças químicas, nas quais novos tipos de matéria são produzidos. Esses resultados apresentavam a primeira evidência de mudanças químicas a nível subatômico, dando início à teoria da desintegração dos elementos (Mendeleev estava entre os que discordavam desta ideia, por considerar que os átomos eram imutáveis). Esses trabalhos foram fundamentais para separar as mudanças radioativas - que ocorrem no núcleo dos átomos - e as mudanças químicas - que ocorrem na eletrosfera.

Natureza das partículas alfa + radioatividade e tabela periódica

A compreensão definitiva da natureza da partícula alfa só veio em 1909, quando Rutherford e Royds publicaram um artigo com resultados de experimento realizado em 1908. O experimento isolava as partículas de hélio geradas por emissões alfa (pode detalhar mais esse experimento, se achar interessante). Este foi um resultado convincente de que a partícula alfa se torna um átomo de hélio após perder sua carga³⁵.

Quando a partícula alfa foi identificada como um átomo de hélio duplamente ionizado e a partícula beta como um elétron, a valência e a massa dos átomos passaram a ser utilizadas

³² Foi durante este período que Rutherford e Soddy enunciaram o conceito de meia-vida e constatam que as partículas alfa possuem carga positiva.

³³ Todos os isótopos radioativos naturais pertencem à série de desintegração de algum desses três elementos radioativos: tório 232, urânio 238 e urânio 235.

³⁴ O texto se refere aqui ao *equilíbrio secular* da radioatividade: em alguns processos radioativos à medida que um elemento se desintegra, formando outro, esse segundo elemento também tem sua quantidade diminuída na mesma quantidade pela sua própria desintegração. Isto causa um equilíbrio na quantidade de isótopos por um longo tempo.

³⁵ A “primeira lei da radioatividade”, ou primeira lei de Soddy, descreve as mudanças sofridas por um núcleo após emitir uma partícula alfa.

para localizar os produtos radioativos na tabela periódica. Cientistas tentam identificar a relação entre a valência dos elementos antes e depois das emissões radioativas. Von Hevesy falha, e Fajans foi o primeiro a posicionar, em termos de valências e massas, as substâncias primárias, seus produtos intermediários e os produtos finais na tabela periódica.

A emissão de partículas alfa e beta é finalmente explicada: com a expulsão de um raio alfa, o produto resultante é mais leve e eletroquimicamente positivo. Para o caso da expulsão do raio beta, ele é mais eletroquimicamente negativo (pode ser interessante ilustrar o efeito com transições na tabela periódica). Boltwood considerou, teoricamente, a existência de chumbo nos minerais de urânio, reforçada por trabalhos seguintes de Soddy e Fajans³⁶.

Radioatividade e modelo atômico

Em 1909 Geiger e Marsden passaram a realizar experimentos de espalhamento com partículas beta (e posteriormente com partículas alfa). Um resultado obtido foi que uma pequena parcela das partículas alfa sofre espalhamento tal que "emergem novamente no lado da incidência". São feitos então testes com algumas condições diferentes (troca dos metais utilizados para o espalhamento, espessura, etc). Rutherford³⁷ interpreta esse experimento em 1911. Ele considerou razoável supor que os espalhamentos eram devidos a um único encontro entre as partículas e os átomos do metal, pois parecia uma interação mais provável do que a colisão com outra partícula alfa ou com átomos de outro material.

O modelo atômico de Thomson, cuja característica principal era a distribuição homogênea de cargas positivas e negativas pelo átomo, não dava conta de explicar aquele tipo de espalhamento. Assim, Rutherford examina teoricamente os encontros simples, a probabilidade da deflexão em qualquer ângulo, a alteração da velocidade em uma colisão atômica e compara espalhamentos únicos e compostos. Depois, compara toda a teoria desenvolvida com os resultados de experimentos já feitos, como os de Geiger e Marsden. Com isso, Rutherford conclui que "parece mais simples supor que o átomo contém uma carga central distribuída em um volume muito pequeno, e que as grandes deflexões se devam à carga central como um todo, e não a seus constituintes. [...] Os dados gerais disponíveis indicam que o valor dessa carga central para átomos diferentes é aproximadamente proporcional às suas massas atômicas, [...]".

³⁶ A "segunda lei da radioatividade", ou segunda lei de Soddy, Fajans e Russel, descreve as mudanças sofridas por um núcleo após emitir uma partícula beta.

³⁷ Rutherford havia se mudado para Manchester em 1907.

Diante dessas conclusões, Rutherford traz à tona o modelo atômico saturniano proposto em 1904 por Hantaro Nagaoka, e considera que as evidências obtidas são compatíveis com tal modelo³⁸. Conforme os conhecimentos sobre os isótopos aumentavam, a teoria mostrava maturidade para fazer previsões, como a da existência de alguns isótopos que foram isolados logo na sequência. Todo o corpo de evidências colecionado nos últimos dez anos em favor da complexidade dos elementos culminava com uma teoria bem estruturada, de forte coerência com os dados empíricos, capaz de fazer previsões e bem alinhada com outras teorias que se desenvolviam naquele momento.

Radiação gama

Eu não me aprofundi muito na pesquisa da história da radiação gama. O primeiro registro de sua identificação foi em 1900, pelo físico e químico francês Paul Ulrich Villard (1860 - 1934), enquanto estudava as propriedades dos elementos químicos urânio e rádio. Essa era uma radiação misteriosa, com um comportamento semelhante ao dos raios X, mas que possui muito mais energia e maior poder de penetração.

Estrutura possível para o seminário seria:

- Começa com um contexto histórico (últimos anos do século XIX);
- Primeiras evidências de desintegração nuclear (1899-1907, aproximadamente);
- Natureza das partículas alfa + radioatividade e tabela periódica (síntese dos resultados obtidos até aqui, ~ 1908-1909);
- Radioatividade e modelo atômico (1909-1911);

Sobre a radiação gama: acho que não é necessário se aprofundar na história dela, mas me parece importante ao menos comentar que ela existe. Uma possibilidade é falar sobre ela (muito brevemente) no começo do seminário (suas principais características, aplicações, etc) e justificar que o estudo histórico dela ficou de fora do escopo do seminário.

Depois das seções sobre radiação alfa e beta, poderia encerrar com algumas informações atuais sobre essas radiações: como ser comum a emissão de radiação gama depois da emissão

³⁸ Lembrando que a descoberta do elétron, por J. J. Thomson, foi feita em 1897.

Em 1886 Goldstein identificou a presença de cargas positivas nos átomos (utilizando tubos de raios catódicos), mas só em 1904 Rutherford identificou os prótons (em experiências com gás hidrogênio).

de radiação alfa ou beta, frequência da radiação gama, etc. São sugestões, vê como você acha melhor.