



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
CENTRO DO CIÊNCIAS DA EDUCAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

Fábio Bartolomeu Santana

**A construção do conceito de spin do elétron como um processo de Metáfora Epistêmica
intracientífica: implicações para a educação científica**

Florianópolis

2022

Fábio Bartolomeu Santana

A construção do conceito de spin do elétron como um processo de Metáfora Epistêmica intracientífica: implicações para a educação científica

Texto submetido ao Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Doutor em Educação Científica e Tecnológica em 14/02/2022.

Orientador: Prof. Henrique César da Silva, Dr.

Coorientador: Prof. Frederico Firmo de Souza Cruz, Dr.

Florianópolis

2022

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

Santana, Fábio Bartolomeu

A construção do conceito de spin do elétron como um processo de Metáfora Epistêmica intracientífica : implicações para a educação científica / Fábio Bartolomeu Santana ; orientador, Henrique César da Silva, coorientador, Frederico Firmo de Souza Cruz, 2022.
310 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Educação Científica e Tecnológica. 2. Metáfora Epistêmica. 3. Spin do Elétron. 4. Ensino de Mecânica Quântica. 5. Natureza da Ciência. I. Silva, Henrique César da. II. Cruz, Frederico Firmo de Souza. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica. IV. Título.

Fábio Bartolomeu Santana

A construção do conceito de spin do elétron como um processo de Metáfora Epistêmica intracientífica: implicações para a educação científica

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

Prof. Hector Palma, Dr.

Universidad Nacional de San Martín

Prof. Ivã Gurgel, Dr.

Universidade de São Paulo

Prof. Paulo José Sena dos Santos, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Frederico Firmo de Souza Cruz, Dr.

Co-orientador - Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de doutor em Educação Científica e Tecnológica.

Prof. Juliano Camillo, Dr.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Henrique César da Silva, Dr.

Orientador

Florianópolis, 2022.

Dedico este trabalho a todos aqueles que compartilham da causa educativa, democrática, científica e humana, que vem a ser o processo de construção e compartilhamento de conhecimentos, enfim, da instrução coletiva.

AGRADECIMENTOS

A lista de agradecimentos é longa. Concluo o doutorado aos 48 anos, incompletos, e assim, já com uma longa caminhada e com muitas vivências. Decorre daí a grande quantidade de pessoas envolvidas, direta ou indiretamente, neste fabuloso projeto, que considero pessoal em alguns aspectos, mas coletivo em outros.

Este período foi também impactado por fatores externos; meu pai teve câncer; minha mãe faleceu; a pandemia nos isolou; me preparei para quatro concursos; assumi dois cargos públicos; alterei completamente os rumos da carreira profissional, realizei muitos estudos e pesquisas, sem interromper a atividade profissional, não sendo esta uma escolha, mas sim uma imposição das circunstâncias. Neste sentido, não seria possível tal realização sem concessões pessoais; e elas tiveram um preço alto. Diante destes desafios, alguns seres humanos maravilhosos tiveram um papel indispensável. Na impossibilidade de fazer menção a todos os envolvidos, mencionarei aqueles que não poderia deixar de citar em hipótese alguma; aos demais, o faço de um modo mais geral, mas com igual reconhecimento.

Devo, primeiramente, agradecer aos familiares mais próximos, minha esposa Fabiani, minha filha Bianca e meu filho Leonardo. Eles viveram e conviveram com os efeitos que um projeto dessa magnitude causa no seio do lar e no âmbito profissional, um período que começou já nas adequações e preparativos, anos antes do ingresso. Instabilidades, dúvidas, inseguranças, pequenas vitórias, muitos contra tempos, readaptações, enfim, todos os tipos de abalos, sentidos e absorvidos pela vizinhança imediata, a família. A eles, minha imensa gratidão por essa passagem, em especial à minha esposa, por ser a inspiração inicial e permanente para esta grande jornada.

Agradeço imensamente aos professores Henrique e Fred, pelas orientações, ideias, aberturas e concessões. Suas contribuições deram substância e contornos importantes para o resultado final deste projeto. Eles aceitaram e acreditaram nas possibilidades, confiaram em meu trabalho e permitiram que o mesmo se desenvolvesse livre e coletivamente, o que considero uma façanha e tanto. A vocês, nobres colegas, um especial agradecimento.

Este trabalho é uma síntese não apenas de algumas ideias profundas e também das vivências de um período muito duro, mas também reflexivo e esperançoso. Neste processo, companheiros de pesquisa, de Pós-Graduação, enfim, companheiros de causa, de luta, todos estes tiveram um papel muito importante, um certo protagonismo neste trabalho. Por tudo isso, sou muito grato.

Devo igualmente agradecer ao grupo de pesquisa, FLUXO. O debate permanente de

ideias e as discussões de temas relacionados às pesquisas desenvolvidas pelos membros desse grupo sempre desempenhou um papel balizador e inspirador para meu trabalho, sobretudo pelas contribuições específicas, em várias ocasiões onde fragmentos de minha pesquisa foram por eles apreciados e, com muita satisfação e entusiasmo, grandes contribuições foram incorporadas ao meu trabalho. A vocês, todo meu reconhecimento e agradecimento.

Por fim, devo reconhecer e registrar o trabalho realizado pela banca, com suas contribuições e questionamentos, já na qualificação, professores Ivã Gurgel, Paulo Sena, Sandro Livramento e Hector Palma. Devo ainda registrar a minha satisfação em ter conhecido o Sr. Hector Palma, que além de nos brindar com suas ideias como objeto de nossa investigação, prontamente cedeu a sua obra para pesquisa, no momento em que o isolamento social dificultara e limitara o andamento dos trabalhos, expressando sempre um entusiasmo inspirador.

A vocês, todo meu apreço, reconhecimento e agradecimentos.

A ciência, além de um bem humano é também uma expressão de humanidade, herdada daqueles que a constroem, a praticam e a ensinam. A atividade científica é uma das formas da percepção humana acerca do mundo natural. Assim, não existe ciência sem contemplação, sem envolvimento, sem emoção. É uma forma muito particular da capacidade criativa humana, na busca pela realização de um ideal, pautado pela crença de que o Universo deva apresentar alguma regularidade, mesmo não havendo nenhuma garantia a este respeito.

(SANTANA, 2022)

RESUMO

Nas últimas décadas, algumas linhas de pesquisa sobre as metáforas têm relacionado este fenômeno, em princípio linguístico, com a cognição humana. A relevância das metáforas é também reconhecida no campo científico, não apenas como um recurso heurístico, mas, em determinadas circunstâncias, como um processo imprescindível para a produção de novos conhecimentos científicos. Diante de uma variada gama de estudos e definições, a hipótese da Metáfora Epistêmica proposta por Hector Palma objetiva descrever o fenômeno metafórico na produção de conhecimentos científicos. Para este autor, vários episódios científicos podem ser entendidos a partir de relações metafóricas influenciadas por contextos teóricos, empíricos e culturais, envolvendo conhecimentos estabelecidos em diferentes áreas do saber. O êxito de uma metáfora científica depende de sua capacidade de solucionar a problemática para a qual foi proposta, bem como de satisfazer as condições de validação – que não são apenas técnicas e/ou lógicas – vigentes em um dado período histórico. Ao longo deste processo de validação, as características metafóricas tendem a se apagar, de modo que apenas uma análise genealógica pode revelar que um determinado conhecimento possui em suas origens um processo metafórico. Neste sentido, o objetivo principal deste trabalho consiste em demonstrar a plausibilidade da hipótese da metáfora epistêmica de Palma a partir da análise do episódio referente à produção do conceito de spin do elétron. Para tanto, analisamos um conjunto de documentos históricos e historiográficos, referentes ao episódio considerado, identificando nestes materiais, trechos que evidenciam aspectos do processo de metáfora epistêmica. Em caráter complementar, também analisamos alguns manuais de física para o ensino superior, uma vez que este tipo de texto contempla os conhecimentos estabilizados, considerados indispensáveis para a formação de cientistas e de professores. Uma vez demonstrada a plausibilidade da hipótese, passamos a sustentar a noção de metáfora epistêmica como recurso pedagógico e analítico, estabelecendo um diálogo com algumas áreas de pesquisa em ensino de ciências – dentre as quais o uso analogias e metáforas, história e filosofia da ciência, natureza da ciência e ensino de mecânica quântica – apontando suas potencialidades para a educação científica e para a formação de professores.

Palavras-chave: Metáfora Epistêmica; spin do elétron; educação científica; analogias e metáforas; Natureza da Ciência; ensino de mecânica quântica.

ABSTRACT

In recent decades, some lines of research on metaphors have related this phenomenon, in principle linguistic, to human cognition. The relevance of metaphors is also recognized in the scientific field, not only as a heuristic resource, but, in certain circumstances, as an essential process for the production of new scientific knowledge. Faced with a wide range of studies and definitions, the Epistemic Metaphor hypothesis proposed by Hector Palma aims to describe the metaphorical phenomenon in the production of scientific knowledge. For this author, several scientific episodes can be understood from metaphorical relationships influenced by theoretical, empirical and cultural contexts, involving knowledge established in different areas of knowledge. The success of a scientific metaphor depends on its ability to solve the problem for which it was proposed, as well as to satisfy the validation conditions – which are not just technical and/or logical – in force in a given historical period. During this validation process, metaphorical characteristics tend to fade away, so that only a genealogical analysis can reveal that a given knowledge has a metaphorical process in its origins. In this sense, the main objective of this work is to demonstrate the plausibility of the hypothesis of Palma's epistemic metaphor from the analysis of the episode referring to the production of the concept of electron spin. Therefore, we analyzed a set of historical and historiographical documents, referring to the episode considered, identifying in these materials, excerpts that highlighted aspects of the epistemic metaphor process. Complementarily, we also analyzed some physics manuals for higher education, since this type of text includes stabilized knowledge, considered essential for the training of scientists and teachers. Once the plausibility of the hypothesis was demonstrated, we started to support the notion of epistemic metaphor as a pedagogical and analytical resource, establishing a dialogue with some areas of research in science teaching – among which the use of analogies and metaphors, history and philosophy of science, nature of science and teaching of quantum mechanics – pointing out its potential for science education and teacher training.

Keywords: Epistemic Metaphor; electron spin; scientific education; analogies and metaphors. Nature of Science; quantum mechanics teaching.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagem de Gestalt, pato e lebre.....	45
Figura 2 - Distribuição eletrônica do elemento alcalino Sódio-Na (esquerda) e alcalino terroso Magnésio-Mg (direita), pertencentes aos grupos 1 e 2 do terceiro período da tabela periódica.	100
Figura 3 - (I) Efeito Zeeman: campo magnético de baixa intensidade, insuficiente para desacoplar os momentos angulares orbital e de spin; o momento angular total, \vec{J} , precessiona em torno da direção de \vec{B} ; (II) efeito Paschen-Back: campo magnético suficientemente intenso para desacoplar os momentos orbitais angular e de spin; desacoplados, cada um dos momentos angulares irá precessionar em torno da direção de \vec{B}	103
Figura 4 - Termos espectrais para o elemento alcalino Sódio (à esquerda) e para o elemento alcalino terroso Magnésio (à direita); a escala de energia adotada é cm^{-1}	105
Figura 5 - Modelo clássico de uma partícula elétrica puntual em movimento circular, com momento angular \vec{L} e momento de dipolo magnético $\vec{\mu}$	175
Figura 6 - Valores possíveis para a componente \vec{S} e $\vec{\mu}_s$, para o caso de $\ell = 2$ ($m_\ell = -2, -1, 0, +1, +2$).....	180
Figura 7 - Representação dos vetores \vec{S} e $\vec{\mu}_s$ e suas componentes na direção arbitrária, z ..	183
Figura 8 - Esquema do aparato experimental de Stern-Gerlach.....	184
Figura 9 - Movimento do elétron em torno do núcleo, segundo o modelo atômico de Bohr.	193
Figura 10 - Interação entre o momento de dipolo magnético induzido pelo momento do elétron em torno do núcleo atômico e um campo magnético externo.....	197
Figura 11 - Força de Lorentz sobre um elétron em seu movimento orbital devido a um campo magnético, uniforme à esquerda e convergente à direita.....	200
Figura 12 - Imagem esquemática do experimento de Stern-Gerlach.....	202
Figura 13 - À esquerda, resultado do experimento de Stern-Gerlach para os átomos de prata; à direita, a previsão clássica para o referido fenômeno.....	202

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Conceitos relacionados ao processo de bissociação.....	53
Quadro 2 - Relação de categorias analíticas referente às MEIC.....	92
Quadro 3 - Quantitativo dos segmentos analíticos, destacados e comentados na seção anterior.	153
Quadro 4 - Estrutura de tópicos referente ao Capítulo 40 do livro didático de Halliday e Resnick (2009).....	173
Quadro 5 - Inventário dos SAs identificados no Capítulo 40 do livro didático de Halliday e Resnick (2009). Itens destacados com (*) não foram contabilizados.....	189
Quadro 6 - Estrutura de tópicos referente ao Capítulo 8 do livro didático de Eisberg e Resnick (1985).....	190
Quadro 7 - Inventário dos SAs identificados no Capítulo 8 do livro didático de Eisberg e Resnick (1985). Itens destacados com (*) não foram contabilizados.....	212
Quadro 8 - Estrutura de tópicos referente ao Capítulo IX do livro didático de Cohen- Tannoudji, Diu e Laloë (2020a, p. 985).....	213
Quadro 9 - Inventário dos SAs identificados no Capítulo IX do livro didático de Cohen- Tannoudji, Diu e Laloë (2020a).....	224
Quadro 10 – Comparativo entre os manuais analisados.....	225

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	Analogias e Metáforas
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CERN	Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear (tradução livre)
CSE	Conceito de Spin do Elétron
CTEM	Ciências, Tecnologia, Engenharia e Matemática
EC	Ensino de Ciências
ECN	Ensino de Ciências Naturais
EF	Ensino de Física
EPEF	Encontro de Pesquisa em Ensino de Física
ESG	Experimento de Stern-Gerlach
FdC	Filosofia da Ciência
FM	Física Moderna
HdC	História da Ciência
HFSC	História, Filosofia e Sociologia da Ciência
ME	Metáfora(s) Epistêmica(s)
MECA	Metodologia de Ensino com Analogia
MEIC	Metáfora(s) Epistêmica(s) Intracientífica(s)
MQ	Mecânica Quântica
NdC	Natureza da Ciência
NFS	Nacional Science Foundation
NHME	Narrativa Histórica de Metáfora Epistêmica
PPC	Project Physics Course
PNLD	Programa Nacional do Livro e do Material Didático
SA	Segmentos Analíticos
SdC	Sociologia da Ciência
SMT	Struture Mapping Theory
SNEF	Simpósio Nacional de Ensino de Física
TMC	Teoria da Metáfora Conceptual
TWA	Teaching-With-Analogy
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina

UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	APRESENTAÇÃO E PROBLEMÁTICA.....	16
1.2	QUESTÕES DE PESQUISA.....	21
1.3	OBJETIVOS.....	21
1.4	METODOLOGIA.....	22
2	O CONCEITO DE METÁFORA EPISTÊMICA: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	30
2.1	INTRODUÇÃO.....	31
2.2	METÁFORA E CONHECIMENTO CIENTÍFICO.....	35
2.3	PRESSUPOSTOS FUNDAMENTAIS DA METÁFORA EPISTÊMICA.....	40
2.4	CARACTERIZAÇÃO CONCEITUAL DA METÁFORA EPISTÊMICA.....	49
2.4.1	O conceito de bissociação.....	51
2.4.2	Considerações epistêmicas sobre a bissociação.....	55
2.4.3	O processo de literalização de uma Metáfora Epistêmica.....	60
2.5	NÍVEIS E LIMITES DAS METÁFORAS EPISTÊMICAS.....	66
2.6	METÁFORA EPISTÊMICA COMO UMA NOÇÃO-HIPÓTESE EM NÍVEL INTRACIENTÍFICO: CARACTERÍSTICAS E POSSIBILIDADES.....	71
2.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74
3	VERIFICAÇÃO DA PLAUSIBILIDADE DA HIPÓTESE DA METÁFORA EPISTÊMICA INTRACIENTÍFICA: A ELABORAÇÃO DO CONCEITO DE SPIN DO ELÉTRON COMO ESTUDO DE CASO.....	82
3.1	INTRODUÇÃO.....	83
3.2	ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	86
3.3	ANÁLISE DA HISTORICIDADE DO CONCEITO DE SPIN DO ELÉTRON. .	94
3.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	153
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	157
4	ELEMENTOS DA METÁFORA EPISTÊMICA NA CONSTRUÇÃO DO CONCEITO DE SPIN DO ELÉTRON EM MANUAIS DE FÍSICA.....	164
4.1	INTRODUÇÃO.....	165
4.2	ASPECTOS METODOLÓGICOS DA ANÁLISE.....	169
4.3	ASPECTOS METODOLÓGICOS DA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	170

4.4	ANÁLISE DE MANUAIS: NÍVEL INTRODUTÓRIO.....	172
4.4.1	Descrição do manual.....	172
4.4.2	Análise.....	173
4.4.3	Resultados e considerações.....	187
4.5	ANÁLISE DE MANUAIS: NÍVEL INTERMEDIÁRIO.....	190
4.5.1	Descrição do manual.....	190
4.5.2	Análise.....	191
4.5.3	Resultados e considerações.....	211
4.6	ANÁLISE DE MANUAIS: NÍVEL AVANÇADO.....	213
4.6.1	Descrição do manual.....	213
4.6.2	Análise.....	214
4.6.3	Resultados e considerações.....	222
4.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	224
5	CONSIDERAÇÕES SOBRE A NOÇÃO DE METÁFORA EPISTÊMICA INTRACIENTÍFICA NA EDUCAÇÃO CIENTÍFICA.....	229
5.1	INTRODUÇÃO.....	230
5.2	ANALOGIAS E METÁFORAS NO ENSINO DE CIÊNCIAS.....	234
5.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE A NOÇÃO DE METÁFORA EPISTÊMICA INTRACIENTÍFICA E O USO DIDÁTICO DE ANALOGIAS E METÁFORAS	239
5.4	HISTÓRIA, FILOSOFIA E NATUREZA DA CIÊNCIA NA EDUCAÇÃO CIENTÍFICA.....	243
5.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE A NOÇÃO DE METÁFORA EPISTÊMICA INTRACIENTÍFICA E A TEMÁTICA DA NATUREZA DA CIÊNCIA.....	270
5.6	SOBRE O ENSINO DE MECÂNICA QUÂNTICA.....	275
5.7	CONSIDERAÇÕES SOBRE A NOÇÃO DE METÁFORA EPISTÊMICA INTRACIENTÍFICA E O ENSINO DE CONCEITOS DE MECÂNICA QUÂNTICA.....	289
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	303

1 INTRODUÇÃO

Apresentaremos a seguir uma visão geral de nossa proposta, nossas justificativas, a relevância da pesquisa desenvolvida, a delimitação de nosso problema, nossos objetivos, o objeto de pesquisa e a metodologia empregada em nossa investigação.

Iremos abordar o papel do fenômeno metafórico na elaboração de conhecimentos científicos, partindo de uma dada concepção de metáfora aplicada a um estudo de caso no campo da Física, mais especificamente, o episódio histórico referente à elaboração do conceito de spin do elétron.

Nossa investigação traz contribuições para o campo da filosofia da ciência e apresenta também potenciais desdobramentos para a educação científica, o ensino e a formação docente em ciências, destacadamente para o campo da física.

1.1 APRESENTAÇÃO E PROBLEMÁTICA

O estudo da metáfora remonta ao tempo de Aristóteles e é de autoria deste filósofo o primeiro estudo sistemático sobre o tema que, a partir do século XX, passa a dialogar com diferentes áreas de conhecimento (CAVALCANTE; FERREIRA; GUALDA, 2016; LIMA, 2005; ORTONY, 1993), levando em conta também as interações sociais e culturais.

Mais recentemente, as metáforas passaram a ser reconhecidas como um importante aspecto da cognição humana, onde a Teoria da Metáfora Conceptual, de Lakoff e Johnson, é considerada como marco inaugural, tendo exercido grande influência nos estudos atuais da metáfora (GIBBS, 2006; SCHRÖDER, 2008; SILVA; LEITE, 2015).

No campo científico, o papel das metáforas vem sendo apontado (ARRUDA, 1993; KNUDSEN, 2003; KUHN, 1998), estando intimamente relacionado com o uso de modelos e analogias em diferentes âmbitos do saber científico dentre os quais na sua produção, nas adaptações didáticas, no ensino de ciências e na divulgação científica (KOPP; ALMEIDA, 2019; PULACZEWSKA, 2010; SKORCZYNSKA, 2014; SOUZA; NEVES, 2016).

O emprego de analogias e modelos no processo criativo da ciência é destacado pelos trabalhos de Maxwell (1856) e Boltzmann (1974a, 1974b), que não apenas empregaram e defenderam o uso destes objetos, como buscaram fundamentá-los enquanto recursos

metodológicos autênticos para a prática científica (ABRANTES, 1988; ROQUE; VIDEIRA, 2013). As discussões sobre modelos e analogias estendeu-se para o campo da filosofia já no início do século XX, com as contribuições de P. Duhem e N. R. Campbell, e mais adiante, em meados do século XX, com os trabalhos seminais de Black (1962) e Hesse (1966) que recolocaram os modelos, analogias e metáforas na ordem do dia da filosofia da ciência (DUTRA, 2013).

De acordo com Palma (2015), há duas grandes mudanças importantes que conduzem à uma nova percepção acerca da relevância das metáforas nos domínios científicos, quais sejam: a virada epistêmica, da qual Kuhn (1970) é um importante marco teórico, e a virada linguística, que tem em Lakoff e Johnson (2017) um marco teórico de fundamental importância. Atualmente, o papel das metáforas na elaboração de conhecimentos científicos é amplamente reconhecido (GENTNER; JEZIORSKI, 1993; PALMA, 2015).

Frente a este contexto, é nosso objetivo ressaltar a pertinência do conceito de *Metáfora Científica*, também denominado *Metáfora Epistêmica* (ME), elaborado por Hector Palma, filósofo da ciência contemporâneo. Em sua obra *Ciencia y metáforas: crítica de una razón incestuosa*, Palma (2015) reconhece a ubiquidade e sutileza das metáforas nas ciências naturais e propõe o conceito de ME, estabelecendo seus pressupostos teóricos.

O conceito de metáfora proposto por Palma (2009, 2015) articula aspectos da linguística – semântica e pragmática –, da filosofia da linguística e da história e filosofia da ciência. O autor considera que o processo metafórico no campo científico implica em uma junção de ideias, conceitos, teorias, pertencentes a diferentes âmbitos de conhecimento.

Palma (2009, 2015) leva em conta o conceito de *bissociação*, originalmente desenvolvido por A. Koestler (2014), para fundamentar a combinação metafórica entre dois âmbitos de conhecimento distintos. Esta combinação além de inédita é também desafiadora, frente às concepções vigentes no contexto científico e sócio cultural em que é sugerida.

A proposição de uma bissociação consiste no ato inaugural de uma ME. A partir de então, a ME fica sujeita ao escrutínio da comunidade científica no interior da qual foi proposta. Este processo de validação e significação é denominado de *literalização*, e desenvolve-se diacronicamente. A metáfora inicialmente proposta perde seu caráter metafórico e consolida-se como conhecimento estabilizado. Diferentes autores fundamentam este processo de apagamento ou desaparecimento dos traços de uma metáfora, com destaque para a fundamentação de P. Ricoeur (1980) e C. Turbayne (1974).

Para evidenciar a presença de metáforas na ciência, Palma (2015) analisa diferentes episódios científicos, ilustrando como conceitos de diferentes campos de saber foram

empregados metaforicamente para gerar novos conhecimentos, segundo o conceito de ME proposto pelo autor.

Nota-se, contudo, a ausência de uma análise sobre a produção de conhecimentos científicos, por meio de processos metafóricos, envolvendo conceitos originários em um mesmo campo científico, isto é, nota-se a ausência de uma análise sobre *processos metafóricos intracientíficos*.

Conforme indicado por Palma (2015), processos de ME exitosos podem ser reconhecidos a partir de análises diacrônicas de episódios históricos, uma vez que toda ME exitosa tende a ocultar-se, apagando seu caráter metafórico e convertendo-se em conhecimento novo, estabilizado. O autor refere-se a este processo como *análise genealógica*.

Nossa proposta consiste em investigar a plausibilidade da hipótese da metáfora epistêmica em nível intracientífico (MEIC). Para tanto, iremos considerar a Física como campo de conhecimento intracientífico e elegemos o episódio histórico relacionado à construção do conceito de spin do elétron. Realizaremos, portanto, a análise genealógica da MEIC que deu origem ao conceito de spin do elétron.

Mostraremos que a MEIC relacionada ao spin do elétron podem ser potencialmente útil para o ensino de ciências em ao menos três contextos: o ensino de conceitos relacionados à Física Moderna (FM) e à Mecânica Quântica (MQ); abordagens de aspectos relacionados à Natureza da Ciência (NdC); o uso de Analogias e Metáforas (AM).

Ha diferentes razões para a escolha do referido episódio histórico. O conceito de spin está inserido no contexto da FM, uma temática cuja relevância para o ensino de ciências é explicitamente contemplada em diferentes documentos curriculares oficiais, no Brasil (BRASIL, 2002, 2018) e em outros países (STADERMANN; VAN DEN BERG; GOEDHART, 2019).

O ensino de FM é um campo de pesquisa bem estabelecido e a literatura da área tem apontado uma série de caminhos e dificuldades, dentre os quais, a carência de materiais didáticos adequados e limitações na formação docente, inicial e continuada (MARQUES *et al.*, 2019; OLIVEIRA; VIANNA; GERBASSI, 2007; PEREIRA; OSTERMANN, 2009; SILVA; ARENGHI; LINO, 2013).

No âmbito da FM, o ensino de MQ apresenta problemas ainda mais específicos, decorrentes da natureza desta teoria e seus conceitos, bem como e das implicações filosóficas próprias da MQ (GRECA; MOREIRA, 2001; PEDUZZI, 2003).

O entendimento de muitos dispositivos tecnológicos das sociedades contemporâneas requer conhecimentos de MQ (POSPIECH, 1999), além do que, grande variedade de tópicos

já ocupam lugar de destaque no ideário popular, como é o caso da supercondutividade, estrelas de nêutrons, gravidade quântica, teletransporte quântico, mundos paralelos (STADERMANN; VAN DEN BERG; GOEDHART, 2019). Neste contexto, o spin tem lugar de destaque na recente área da computação quântica, inaugurando, inclusive uma nova era na eletrônica, a spintrônica (AWSCHALOM; FLATTÉ; SAMARTH, 2002).

O conceito de spin é particularmente importante para as discussões sobre interpretações da MQ, sobretudo para discussões sobre o realismo científico (SAATSI, 2020), um debate histórico personificado nas figuras de Albert Einstein e Niels Bohr (POPPER, 1997), com desdobramentos que migraram do campo filosófico para o campo experimental mais recentemente (ASPECT, 2015; BAILY *et al.*, 2010).

O ensino do conceito de spin está inserido em dificuldades específicas, uma vez que no âmbito do ensino da MQ, estudantes comumente recorrem à imagens da física clássica para interpretar conceitos quânticos (JOHNSTON; CRAWFORD; FLETCHER, 1998), uma problemática que estende-se aos manuais (MOHAN, 2020).

A concepção de que o spin é um conceito necessariamente atrelado à relatividade e sem análogo clássico é predominante nos textos didáticos, muito embora não seja este o estado atual do conhecimento acerca do spin; esta propriedade pode ser inteiramente compreendida em termos não relativísticos (HALPRIN, 1978) além de apresentar um análogo clássico próximo (OHANIAN, 1986). Como vemos, a depender do contexto histórico, o entendimento acerca do que é spin muda.

Conforme amplamente apontado pela literatura da área (MONTEIRO; NARDI; BASTOS FILHO, 2009; OLIVEIRA; VIANNA; GERBASSI, 2007; OSTERMANN; MOREIRA, 2000; PEREIRA; OSTERMANN, 2009; ZHU; SINGH, 2011), o ensino de temas de FM – e mais especificamente de MQ – requerem estratégias didáticas adequadas às especificidades peculiares daqueles temas (SOUZA *et al.*, 2021), seja no ensino básico ou superior. As estratégias incluem interpretações e discussões sobre experimentos emblemáticos revisitados, como é o caso do paradoxo EPR, onde o spin tem um papel de destaque (POSPIECH, 1999), incluindo as simulações computacionais e o uso da história e filosofia da ciência (KRAGH, 1992; MCKAGAN; PERKINS; WIEMAN, 2008; PEDUZZI, 2003; RODRIGUES, 2019; ZHU; SINGH, 2011).

É consenso na literatura que a história e a filosofia da ciência (HFC) podem enriquecer de diferentes modos os processos de ensino e aprendizagem em ciências, tanto em nível básico, quanto em nível superior (DAMASIO; PEDUZZI, 2017; GUERRA; BRAGA; REIS, 2013; HOLTON, 2003; MATTHEWS, 1992; OLIVEIRA, 2011).

O uso da HFC também é apontado como importante estratégia didática para promover abordagens que levem em conta aspectos da Natureza da Ciência (NdC) (MCCOMAS, 2008; MOURA; GUERRA, 2016). A abordagem de aspectos da NdC é atualmente um dos principais objetivos da educação científica (ABD-EL-KHALICK; LEDERMAN, 2000; BARTHOLOMEW; OSBORNE; RATCLIFFE, 2004), sendo considerado como um fator indispensável para uma formação cidadã contemporânea (IRZIK; NOLA, 2014).

Por outro lado, os desafios para que este tipo de abordagem chegasse às salas de aula fez emergir uma pluralidade de perspectivas que buscaram transformar a NdC em um objeto educacional adequado (ALLCHIN, 2017; BEJARANO; ADURIZ-BRAVO; BONFIM, 2019; MENDONÇA, 2020), estimulando as pesquisas da área de ensino de ciências à concentrarem esforços na formação inicial e continuada de professores e na produção de materiais didáticos (FERREIRA; CUSTÓDIO, 2021; FORATO; PIETROCOLA; MARTINS, 2011; MOURA; GUERRA, 2016).

As potencialidades cognitivas e atitudinais relacionadas às AM têm sido apontadas pela literatura como importantes contribuições para enriquecer as situações de ensino de ciências uma vez que AM permitem relacionar contextos mais abstratos a outros mais concretos e mais familiares, sendo também um importante meio de estimular a criação e percepção de sistemas de relação entre diferentes domínios (DAGHER, 1995; DUIT, 1991).

As investigações sobre AM acumularam grande quantidade de dados empíricos acerca do uso destas figuras de linguagem (DUARTE, 2005; MOZZER; JUSTI, 2015). Por outro lado, a abrangência e pluralidade de aplicações fez emergir diferentes propostas para teorizar e sistematizar não apenas o uso didático das AM (CLEMENT, 1993; GALAGOVISK; ADÚRIZ-BRAVO, 2001; GENTNER, 1983; HOLYOAK; THAGARD, 1989; NAGEM; CARVALHAES; DIAS, 2001), mas também o seu uso metodológico investigativo (FERRY; PAULA, 2017; TREAGUST; HARRISON; VENVILLE, 1996). Os estudos abrangem a formação docente, os textos didáticos, jornalísticos e de divulgação científica e obras paradidáticas, a sondagem de conhecimentos prévios e/ou concepções alternativas, o ensino por investigação e a aprendizagem significativa (ALMEIDA; DINIZ, 2020; BOZELLI; NARDI, 2012; CURTIS; REIGELUTH, 1984, 1984; KINOCHI, 2012; KOPP; ALMEIDA, 2019; NERSESSIAN, 1992; OLIVA *et al.*, 2001; OLIVEIRA; MOZZER, 2017; RAMOS; MENDONÇA; MOZZER, 2019; REIGELUTH, 1983; SANTANA, 2019; SOUZA; NEVES, 2016; SOUZA; ROCHA, 2017; TREAGUST; HARRISON; VENVILLE, 1996).

Contudo, a literatura também tem apontado que as potencialidades de AM nas situações de ensino não têm sido satisfatoriamente aproveitadas devido a falta de

conhecimentos teóricos e pedagógicos, por parte dos professores, acerca do uso de AM nas situações de ensino. Neste sentido, parte das pesquisas têm concentrado esforços na abordagem destes temas na formação docente (ALMEIDA, 2019; ALMEIDA; DINIZ, 2020; OLIVEIRA; MOZZER, 2017).

Iremos argumentar que a noção de ME pode ser empregada como instrumento analítico potencialmente útil para produzir narrativas históricas de metáfora epistêmica (NHME), isto é, narrativas que evidenciem aspectos históricos e filosóficos da atividade científica. A adaptação de uma NHME para diferentes níveis de ensino, isto é, sua didatização, é potencialmente útil na promoção de abordagens integradoras entre HFC e NdC.

A noção de ME pode operar como instrumento analítico para a realização de estudos de caso de AM historicamente emblemáticas na ciência. A noção de ME pode cumprir um duplo papel na formação docente, favorecendo a aquisição de conhecimentos teóricos, conceituais e pedagógicos sobre as AM nas situações de ensino.

Dada a natureza do estudo de caso que estamos propondo, a noção de ME é também potencialmente útil para o ensino de MQ, em particular para o ensino do conceito de spin.

1.2 QUESTÕES DE PESQUISA

Em nossa investigação assumiremos a hipótese da ME proposta por Palma (2009, 2015), considerando-a em nível intracientífico, isto é, uma MEIC. Nosso problema de pesquisa consiste em verificar a plausibilidade da MEIC no âmbito da Física, bem como suas potenciais implicações para a educação científica, para o ensino de ciências em nível médio e superior e para a formação docente.

Desse modo, tomaremos a MEIC como uma noção hipótese buscando responder as seguintes questões de pesquisa: 1) É possível sustentar a hipótese da Metáfora Epistêmica em nível intracientífico? 2) A noção de Metáfora Epistêmica em nível intracientífico é potencialmente útil para a educação científica?

1.3 OBJETIVOS

Para respondermos as questões propostas, nossos objetivos de pesquisa foram assim organizados:

Objetivos Gerais

- Demonstrar a plausibilidade da hipótese da ME proposta por Palma (2009, 2015), considerando-a no âmbito intracientífico da Física;
- Evidenciar as potenciais contribuições da noção de MEIC para a educação científica.

Objetivos Específicos

- Caracterizar a estrutura conceitual da MEIC;
- Analisar o episódio histórico referente à construção do conceito de spin do elétron, evidenciando a presença de elementos constituintes da MEIC;
- Identificar e caracterizar a manifestação de elementos constituintes da MEIC geradora do conceito de spin do elétron nos manuais, destinados à formação de bacharéis e licenciados em Física;
- Evidenciar as potenciais contribuições da noção de MEIC para a educação científica, como instrumento analítico investigativo e didático metodológico.

1.4 METODOLOGIA

De acordo com Palma (2009, 2015), é através dos episódios da ciência que torna-se possível evidenciar a presença dos processos de ME. Nossa investigação irá considerar um conjunto de *materiais textuais*, formado por documentos originais e produções historiográficas relacionados a elaboração do conceito de spin do elétron.

Inicialmente detalhamos a hipótese da ME e então a estendemos ao âmbito intracientífico. A seguir, estabelecemos um conjunto de *categorias analíticas* com o intuito de caracterizar a noção de MEIC, levando em conta suas principais propriedades e aspectos conceituais.

Em um segundo momento analisamos os materiais textuais, selecionado e destacando trechos que evidenciaram propriedades e/ou aspectos conceituais da MEIC a partir do conjunto de categorias analíticas estabelecidas. Estes trechos foram denominados de *segmentos analíticos*. Dentre os materiais textuais, foram considerados documentos originais

de autoria de cientistas protagonistas do episódio referente ao spin do elétron, bem como materiais historiográficos produzidos por historiadores da ciência e outros autores não historiadores. Os resultados da análise foram apresentados em um quadro onde contabilizamos a quantidade de segmentos analíticos identificados em cada categoria analítica.

A seguir proferimos a análise de três manuais de Física utilizados no ensino superior, considerando os tópicos diretamente relacionados ao conceito de spin do elétron. Para cada manual, destacamos os segmentos analíticos identificados e os organizamos em um quadro. Para efeitos comparativos, também apresentamos um quadro geral, contendo as informações dos três manuais.

Finalmente, apresentamos as potenciais contribuições da noção de MEIC para a educação científica, apontando possíveis articulações com três grandes áreas de investigação: analogias e metáforas no ensino de ciências; natureza da ciência como objeto educacional; ensino de mecânica quântica.

Referências

- ABD-EL-KHALICK, F.; LEDERMAN, N. G. Improving science teachers' conceptions of nature of science: a critical review of the literature. **International Journal of Science Education**, v. 22, n. 7, p. 665–701, jul. 2000.
- ABRANTES, P. C. C. A metodologia de J. C. Maxwell e o desenvolvimento da Teoria Eletromagnética. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 5, n. Edição Especial, p. 58–75, 1988.
- ALLCHIN, D. Beyond the Consensus View: Whole Science. **Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education**, v. 17, n. 1, p. 18–26, 2 jan. 2017.
- ALMEIDA, H. A. DE. As concepções sobre analogias no discurso de licenciandos em ciências biológicas. **Góndola, enseñanza y aprendizaje de las ciencias**, v. 15, n. 1, p. 101–117, 26 dez. 2019.
- ALMEIDA, H. A. DE; DINIZ, R. E. DA S. A Tomada de Consciência sobre o uso de Analogias Espontâneas: Contribuições de uma Formação Continuada Desenvolvida com Professoras de Ciências. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 26, p. e20067, 2020.
- ARRUDA, S. M. Metáforas na Física. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 10, n. 1, p. 25–37, abr. 1993.
- ASPECT, A. Closing the Door on Einstein and Bohr's Quantum Debate. **Physics**, v. 8, p. 123, 16 dez. 2015.
- AWSCHALOM, D. D.; FLATTÉ, M. E.; SAMARTH, N. Spintronics. **Scientific American**, v. 286, n. 6, p. 66–73, jun. 2002.

BAILY, C. et al. **Interpretation in Quantum Physics as Hidden Curriculum**. . In: 2010 PHYSICS EDUCATION RESEARCH CONFERENCE. Portland, (Oregon): 2010. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.3515251>>. Acesso em: 12 out. 2021

BARTHOLOMEW, H.; OSBORNE, J.; RATCLIFFE, M. Teaching students “Ideas-About-Science”: Five dimensions of effective practice. **Science Education**, v. 88, n. 5, p. 655–682, set. 2004.

BEJARANO, N. R. R.; ADURIZ-BRAVO, A.; BONFIM, C. S. Natureza da Ciência (NOS): para além do consenso. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 25, n. 4, p. 967–982, out. 2019.

BLACK, M. **Models and Metaphors**. New York, NY: Cornell University Press, 1962.

BOLTZMANN, L. Model. In: **Theoretical physics and philosophical problems**. Vienna Circle Collection. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1974a. v. 5p. 213–220.

BOLTZMANN, L. On the methods of theoretical physics. In: **Theoretical physics and philosophical problems**. Vienna Circle Collection. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1974b. v. 5p. 5–12.

BOZELLI, F. C.; NARDI, R. Interações discursivas e o uso de analogias no ensino de Física. **Investigação em Ensino de Ciências**, v. 17, n. 1, 2012.

BRASIL. **PCN+ Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias**. Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, , 2002.

BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular: Ensino Médio** Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, , 2018.

CAVALCANTE, S.; FERREIRA, L. C.; GUALDA, R. Metáfora: diferentes perspectivas. **SCRIPTA**, v. 20, n. 40, p. 8–17, 2016.

CLEMENT, J. Using bridging analogies and anchoring intuitions to deal with students’ preconceptions in physics. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 30, n. 10, p. 1241–1257, dez. 1993.

CURTIS, R. V.; REIGELUTH, C. M. The use of analogies in written text. **Instructional Science**, v. 13, n. 2, p. 99–117, jul. 1984.

DAGHER, Z. R. Review of studies on the effectiveness of instructional analogies in science education. **Science Education**, v. 79, n. 3, p. 295–312, jun. 1995.

DAMASIO, F.; PEDUZZI, L. O. Q. História e filosofia da ciência na educação científica: para quê? **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)**, v. 19, n. 0, 2017.

DUARTE, M. DA C. Analogias na educação em ciências: contributos e desafios. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 10, n. 1, p. 7–29, 2005.

DUIT, R. On the role of analogies and metaphors in learning science. **Science Education**, v. 75, n. 6, p. 649–672, nov. 1991.

DUTRA, L. H. DE A. **Pragmática de modelos: natureza, estrutura e uso dos modelos científicos**. São Paulo: Edições Loyola, 2013.

FERREIRA, G. K.; CUSTÓDIO, J. F. Cenários do Debate sobre a Natureza da Ciência nos Cursos de Licenciatura em Física no Brasil. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 38, n. 2, p. 1022–1066, 20 set. 2021.

FERRY, A. DA S.; PAULA, H. DE F. E. Mapeamento estrutural de analogias enunciadas em uma aula sobre cinética química. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 23, n. 1, p. 29–50, mar. 2017.

FORATO, T. C. DE M.; PIETROCOLA, M.; MARTINS, R. D. A. Historiografia e natureza da ciência na sala de aula. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 27–59, 5 jul. 2011.

GALAGOVISK, L.; ADÚRIZ-BRAVO, A. Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales: el concepto de modelo Didático Analógico. **Enseñaza de las Ciencias**, v. 19, n. 2, p. 231–242, 2001.

GENTNER, D. Structure-Mapping: A Theoretical Framework for Analogy. **Cognitive Science**, v. 7, n. 2, p. 155–170, abr. 1983.

GENTNER, D.; JEZIORSKI, M. The shift from metaphor to analogy in Western science. In: ORTONY, A. (Ed.). **Metaphor and thought**. 2. ed. Cambridge [England]; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993. p. 532–550.

GIBBS, R. W. Cognitive linguistics and metaphor research: past successes, skeptical questions, future challenges. **DELTA: Documentação de Estudos em Lingüística Teórica e Aplicada**, v. 22, n. spe, p. 1–20, 2006.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Uma Revisao da Literatura Sobre Estudos Relativos ao Ensino de Mecânica Quântica Introdutória. **Investigação em Ensino de Ciências**, v. 6, p. 29–56, 2001.

GUERRA, A.; BRAGA, M.; REIS, J. C. History, Philosophy, and Science in a Social Perspective: A Pedagogical Project. **Science & Education**, v. 22, n. 6, p. 1485–1503, jun. 2013.

HALPRIN, A. Pedagogy of spin in nonrelativistic quantum mechanics. v. 46, n. 7, p. 768, 1978.

HESSE, M. **Models and Analogies in Science**. Indiana: University of Notre Dame Press, 1966.

HOLTON, G. What Historians of Science and Science Educators Can Do for One Another. **Science and Education**, v. 12, n. 7, p. 603–616, 2003.

HOLYOAK, K. J.; THAGARD, P. Analogical Mapping by Constraint Satisfaction. **Cognitive Science**, v. 13, n. 3, p. 295–355, jul. 1989.

- IRZIK, G.; NOLA, R. New Directions for Nature of Science Research. In: MATTHEWS, M. R. (Ed.). **International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. p. 999–1021.
- JOHNSTON, I. D.; CRAWFORD, K.; FLETCHER, P. R. Student difficulties in learning quantum mechanics. **International Journal of Science Education**, v. 20, n. 4, p. 427–446, abr. 1998.
- KINOUCI, O. Metáforas científicas no discurso jornalístico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, n. 4, p. 1–12, 2012.
- KNUDSEN, S. Scientific metaphors going public. **Journal of Pragmatics**, v. 35, n. 8, p. 1247–1263, ago. 2003.
- KOESTLER, A. **The act of creation**. London: Last Century Media, 2014.
- KOPP, F. A.; ALMEIDA, V. D. Analogias e metáforas no ensino de Física Moderna apresentadas nos livros didáticos aprovados pelo PNLD 2018. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 36, n. 1, p. 69–98, 13 maio 2019.
- KRAGH, H. A sense of history: History of science and the teaching of introductory quantum theory. **Science and Education**, v. 1, n. 4, p. 349–363, dez. 1992.
- KUHN, T. S. **A estrutura das revoluções científicas**. 5. ed. São Paulo: Perspectiva, 1970.
- KUHN, T. S. Metaphor in science. In: ORTONY, A. (Ed.). **Metaphor and Thought**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. p. 533–542.
- LAKOFF, G.; JOHNSON, M. **Metáforas de la vida cotidiana**. Madrid: Catedra, 2017.
- LIMA, A. DE. A metáfora: da analogia à técnica de fusão de opostos. **Revista Investigações**, v. 18, n. 1, p. 9–40, 2005.
- MARQUES, T. C. DE F. et al. Ensino de física moderna e contemporânea na última década: revisão sistemática de literatura. **Scientia Plena**, v. 15, n. 7, p. 1–8, 9 ago. 2019.
- MATTHEWS, M. R. History, philosophy, and science teaching: The present rapprochement. **Science and Education**, v. 1, n. 1, p. 11–47, 1992.
- MAXWELL, J. C. **Are there real analogies in nature?**, 1856. Disponível em: <<http://sites.uci.edu/mathematics/files/2016/11/Maxwell-Analogies-in-Nature.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2018
- MCCOMAS, W. F. Seeking historical examples to illustrate key aspects of the nature of science. **Science & Education**, v. 17, n. 2–3, p. 249–263, fev. 2008.
- MCKAGAN, S. B.; PERKINS, K. K.; WIEMAN, C. E. Why we should teach the Bohr model and how to teach it effectively. **Physical Review Special Topics - Physics Education Research**, v. 4, n. 1, p. 010103, 6 mar. 2008.
- MENDONÇA, P. C. C. De que Conhecimento sobre Natureza da Ciência Estamos Falando? **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 26, p. e20003, 2020.

MOHAN, A. K. Philosophical Standpoints of Textbooks in Quantum Mechanics. **Science & Education**, v. 29, n. 3, p. 549–569, jun. 2020.

MONTEIRO, M. A.; NARDI, R.; BASTOS FILHO, J. B. A sistemática incompreensão da teoria quântica e as dificuldades dos professores na introdução da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 15, n. 3, p. 557–580, 2009.

MOURA, C. B. DE; GUERRA, A. Cultural history of science: a possible path for discussing scientific practices in science teaching? **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 16, n. 3, p. 749–771, 2016.

MOZZER, N. B.; JUSTI, R. “Nem tudo que reluz é ouro”: Uma discussão sobre analogias e outras similaridades e recursos utilizados no ensino de Ciências. v. 15, p. 25, 2015.

NAGEM, R. L.; CARVALHAES, D. DE O.; DIAS, J. A. Y. T. Uma proposta de metodologia de ensino com analogias. **Revista Portuguesa de Educação**, v. 14, n. 1, p. 197–213, 2001.

NERSESSIAN, N. J. How do scientists think? capturing the dynamics of conceptual change in science. In: **Cognitive Models of Science**. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1992. v. 15p. 3–44.

OHANIAN, H. C. What is spin. **American Journal of Physics**, v. 54, n. 6, p. 500–505, 1986.

OLIVA, J. M. et al. Una propuesta didáctica basada en la investigación para el uso de analogías en la enseñanza de las ciencias. **Enseñanza de las Ciencias. Revista de investigación y experiencias didácticas**, v. 19, n. 3, p. 453, 13 jan. 2001.

OLIVEIRA, F. F. DE; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. S. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 3, p. 447–454, 2007.

OLIVEIRA, R. A. DE. **A história da ciência no ensino: diferentes enfoques e suas implicações na compreensão da Ciência**. . In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS. Campinas: Abrapec, 2011.

OLIVEIRA, T. M. A.; MOZZER, N. B. Análise dos conhecimentos declarativo e procedimental de futuros professores de química sobre analogias. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)**, v. 19, n. 0, 2017.

ORTONY, A. Metaphor, language, and thought. In: ORTONY, A. (Ed.). . **Metaphor and thought**. 2. ed. Cambridge [England]; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993. p. 1–16.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão da bibliografia sobre a área de pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Medio”. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 5, n. 1, p. 23–48, 2000.

PALMA, H. **Metáfora e modelos científicos: a linguagem no ensino de ciências**. São Paulo: Edições SM, 2009.

- PALMA, H. **Ciencia y metáforas: crítica de una razón incestuosa**. Buenos Aires: Prometeu Libros, 2015.
- PEDUZZI, L. O. Q. Física e filosofia: uma aproximação através de um texto na disciplina estrutura da matéria. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 3, n. 2, p. 5–20, 2003.
- PEREIRA, A. P.; OSTERMANN, F. Sobre o ensino de física moderna e contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 14, n. 3, p. 393–420, 2009.
- POPPER, K. **A teoria dos quanta e o cisma da Física**. Chicago: The University Chicago Press, 1997.
- POSPIECH, G. Teaching the EPR paradox at high school? **Physics Education**, v. 34, n. 5, p. 311–316, set. 1999.
- PULACZEWSKA, H. Metaphors, particles, terminology: from objectivist to cognitivist approach in physics and linguistics. In: WITCZAK-PLISIECKA, I. (Ed.). . **Pragmatic Perspectives on Language and Linguistics: Pragmatics of Semantically-Restricted Domains**. New Castle: Cambridge Scholars Publishing, 2010. v. IIp. 377–391.
- RAMOS, T. C.; MENDONÇA, P. C. C.; MOZZER, N. B. Argumentação de estudantes na criação e crítica de analogias sobre o Modelo Atômico de Thomson. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 25, n. 3, p. 607–624, set. 2019.
- REIGELUTH, C. M. Meaningfulness and instruction: relating what is being learned to what a students knos. **Instructional Science**, v. 12, n. 3, p. 197–218, 1983.
- RICOEUR, P. **La metáfora viva**. Madrid: Ed. Europa, 1980.
- RODRIGUES, I. T. A História da Ciência na formação inicial de professores de ciências. **História da Ciência e Ensino: construindo interfaces**, v. 20, p. 2–14, 18 dez. 2019.
- ROQUE, T.; VIDEIRA, A. A. P. A noção de modelo na virada do século XIX para o século XX. **Scientiae Studia**, v. 11, n. 2, p. 281–304, jun. 2013.
- SAATSI, J. Truth vs. Progress Realism about Spin. In: SAATSI, J.; FRENCH, S. (Eds.). . **Scientific Realism and the Quantum**. [s.l.] Oxford University Press, 2020. p. 35–54.
- SANTANA, F. B. Quantização da luz: as metáforas conceituais de Einstein e Infeld no contexto da divulgação científica. In: SILVA, H. C. DA (Ed.). . **Ciência, Seus Textos e Linguagens: ensaios sobre circulação e textualização de conhecimentos científicos e matemáticos**. Curitiba: Editora CRV, 2019. p. 53–80.
- SCHRÖDER, U. A. Da teoria cognitiva a uma teoria mais dinâmica, cultural e sociocognitiva da metáfora. **Alfa**, v. 52, n. 1, p. 39–56, 2008.
- SILVA, A. S. DA; LEITE, J. E. R. 35 anos de Teoria da Metáfora Conceptual: fundamentos, problemas e novos rumos. **Revista Investigações**, v. 28, n. 2, p. 1–23, 2015.

SILVA, J. R. N. DA; ARENGHI, L. E. B.; LINO, A. Porque inserir física moderna e contemporânea no ensino médio? Uma revisão das justificativas dos trabalhos acadêmicos. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, v. 6, n. 1, 25 abr. 2013.

SKORCZYNSKA, H. Metaphor and education: reaching business training goals through multimodal metaphor. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 116, p. 2344–2351, fev. 2014.

SOUZA, A. R. DE; NEVES, L. A. D. S. O livro paradidático no ensino de Física: uma análise fabular, científica e metafórica da obra Alice no País do Quantum: A Física Quântica ao alcance de todos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 33, n. 3, p. 1145, 15 dez. 2016.

SOUZA, P. H. R. DE; ROCHA, M. B. Análise da linguagem de textos de divulgação científica em livros didáticos: contribuições para o ensino de biologia. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 23, n. 2, p. 321–340, jun. 2017.

SOUZA, R. DA S. et al. Ensino de Mecânica Quântica na licenciatura em Física por meio da História e Filosofia da Ciência. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 38, n. 2, p. 914–944, 20 set. 2021.

STADERMANN, H. K. E.; VAN DEN BERG, E.; GOEDHART, M. J. Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. **Physical Review Physics Education Research**, v. 15, n. 1, p. 1–25, 22 maio 2019.

TREAGUST, D. F.; HARRISON, A. G.; VENVILLE, G. J. Using an analogical teaching approach to engender conceptual change. **International Journal of Science Education**, v. 18, n. 2, p. 213–229, mar. 1996.

TURBAYNE, C. M. **El mito de la metáfora**. [s.l.] Fondo del Cultura Económica, 1974.

ZHU, G.; SINGH, C. Improving students' understanding of quantum mechanics via the Stern–Gerlach experiment. **American Journal of Physics**, v. 79, n. 5, p. 499–507, maio 2011.

2 O CONCEITO DE METÁFORA EPISTÊMICA: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Resumo

Apresentamos os pressupostos fundamentais bem como as bases conceituais que estruturam o conceito de metáfora científica, também denominada metáfora epistêmica, proposto pelo filósofo argentino Hector Palma. Diferentemente das metáforas ordinárias, o conceito de metáfora epistêmica incorpora não apenas palavras ou termos, mas estende-se a uma diversificada gama de termos comumente presentes no âmbito científico, tais como teorias, leis, conceitos, equações, etc. A proposição de Palma está diretamente relacionada com uma mudança de perspectiva, tanto nas concepções epistêmicas relativas a atividade científica, quanto nas concepções acerca do fenômeno metafórico, ocorridas a partir de meados do século XX. Estas mudanças permitem considerar o fenômeno metafórico para além dos limites didático e heurístico, alcançando os âmbitos cognoscitivo e epistêmico. Assim, compreender o fenômeno metafórico, sobretudo a hipótese da metáfora epistêmica, pode trazer novas perspectivas para a compreensão do conhecimento científico, bem como para o ensino de ciências em diferentes níveis, dadas as potencialidades do referido conceito. Neste sentido propomos o uso da metáfora epistêmica em nível intracientífico como uma noção hipótese a ser testada, com vistas à empregá-la como dispositivo analítico em estudos históricos, bem como dialogar com pesquisas que já investigam o uso de metáfora e analogias como dispositivo didático metodológico, acrescentando a estes dispositivos um caráter articulador da história da ciência e da natureza da ciência no ensino de ciências.

Palavras-chaves: metáfora epistêmica, história da ciência, natureza da ciência, ensino de ciências.

Abstract

We present the fundamental assumptions as well as the conceptual bases that structure the concept of scientific metaphor, also called epistemic metaphor, proposed by the Argentine philosopher Hector Palma. Unlike ordinary metaphors, the concept of epistemic metaphor incorporates not only words or terms, but extends to a diverse range of signs commonly present in the scientific field, such as theories, laws, concepts, equations, etc. Palma's proposition is directly related to a change in perspective, both in the epistemic conceptions

related to scientific activity, and in the conceptions about the metaphorical phenomenon, which occurred from the middle of the century XX. These changes allow us to consider the metaphorical phenomenon beyond the didactic and heuristic limits, reaching the cognitive and epistemic spheres. Thus, understanding the metaphorical phenomenon, especially the hypothesis of the epistemic metaphor, can bring new perspectives for the understanding of scientific knowledge, as well as for teaching science at different levels, given the potential of that concept. In this sense, we propose the use of the epistemic metaphor at an intra-scientific level as a hypothesis-notion to be tested, with a view to using it as an analytical device in historical studies, as well as dialoguing with researches that already investigate the use of metaphor and analogies as a didactic device methodological, adding to these devices an articulating character of the history of science and the nature of science in science education.

Keywords: epistemic metaphor, history of science, nature of science, science teaching.

2.1 INTRODUÇÃO

O fenômeno da metáfora tem sido objeto de estudo desde Aristóteles (LIMA, 2005). Permeando diversas áreas do saber originalmente relacionadas com a atividade linguística, a conceitualização deste fenômeno fez emergir uma gama diversificada de teorias e teve, a partir do século XX, suas investigações “fortemente realizados em uma perspectiva interdisciplinar e com recortes e objetivos bastante diversos” (CAVALCANTE; FERREIRA; GUALDA, 2016). Diante de um cenário amplo não é surpreendente que diferentes perspectivas não tenham sido capazes de produzir consenso acerca do fenômeno, cujas variadas formas manifestam-se em diversificados contextos, levantando questões de interesse filosófico, linguístico, psicológico e educacional (ORTONY, 1993).

Dessa forma, a metáfora compreende um conjunto de investigações de relativa abrangência e notável profundidade. De acordo com Cavalcante, Ferreira e Gualda (2016), dentre as obras marcantes sobre o tema destacam-se os estudos inaugurais de I. Richards, publicados em 1934, que produziram efeitos duradouros a partir da segunda metade do século XX, estabelecendo como pressuposto fundamental o fato de que as metáforas devem ser compreendidas, como já afirmara Nietzsche, “como um princípio onipresente do pensamento, como um fenômeno que permeia todo o discurso, e, por sua natureza, não pode ser reduzida a

paráfrases literais” (CAVALCANTE; FERREIRA; GUALDA, 2016, p. 9). Dada a sua abrangência, um estudo satisfatório requer o reconhecimento de que o fenômeno metafórico alcança os domínios da interação social e cultural (SILVA; LEITE, 2015) e desse modo os domínios científico e pedagógico podem, portanto, ser considerados. É justamente neste contexto que se localiza nosso interesse.

De início devemos estabelecer algumas considerações sobre modelos, analogias e metáforas. O potencial criativo das analogias na produção do conhecimento científico pode ser verificado em várias situações, como nos casos de W. Harvey, ao propor a circulação sanguínea no corpo humano por meio de um coração bomba (DELIZOICOV; CARNEIRO; DELIZOICOV, 2004), de J. C. Maxwell, ao propor o uso da hidrodinâmica para matematizar alguns fenômenos elétricos e magnéticos (ABRANTES, 1988) e de A. Einstein, ao propor uma descrição termodinâmica para a radiação eletromagnética, resultando na proposição do conceito de quantum de luz (GINGRAS, 2015). A elaboração da teoria eletromagnética de Maxwell é um caso particularmente interessante, pois em seu primeiro artigo sobre o tema (MAXWELL, 1890) este cientista busca justificar o uso das analogias como método científico de investigação autêntico (MAXWELL, 1856).

Por outro lado, o uso de modelos como parte da metodologia científica na produção de conhecimento foi também abordado e defendido por L. Boltzmann (BOLTZMANN, 1974a), com a publicação do verbete *Model* em uma das edições da Enciclopédia Britânica, no ano de 1902 (VIDEIRA, 2013). Nas duas primeiras décadas do século XX os filósofos Pierre Duhem e Norman Campbell protagonizaram uma disputa filosófica em torno da questão referente ao papel dos modelos e das analogias na ciência. Apesar de que a complexidade envolvida nesta disputa não seja inteiramente compreendida pela Filosofia da Ciência (MELLOR, 1968), pode-se considerar que, em linhas gerais, Duhem defendia que as teorias científicas prescindiam de modelos, enquanto Campbell defendia uma posição praticamente antagônica à de Duhem (DUTRA, 2013).

Em meados do século XX a noção de analogia na produção de conhecimento científico é retomada pela Filosofia da Ciência na obra de Mary Hesse, *Models and Analogies in Science*, originalmente publicada em 1966, na qual a autora reanalisa as posições de Pierre Duhem e Norman Campbell quanto ao uso dos modelos e das analogias na construção de teorias científicas, onde a autora defende que o poder preditivo das teorias está intrinsecamente relacionado aos modelos científicos, e conseqüentemente, com as analogias empregadas na elaboração dos modelos (HESSE, 1966).

Mais recentemente, a importância das analogias na ciência é também defendida por

Nersessian (1992), que à elas se refere como um subconjunto de *técnicas abstratas* que, em conjunto com a argumentação indutiva e dedutiva, compõem os métodos científicos formais. A abordagem proposta pela autora, denomina “Cognitive-Historical” (NERSESSIAN, 1992, p. 4), articula elementos da Psicologia Cognitiva, Filosofia da Ciência e História da Ciência, abordando a problemática da *mudança conceitual*. Tal problemática decorre da tentativa de compreender como o pensamento científico se modifica, ou seja, procura-se compreender como um modo de pensamento é substituído por outro, por exemplo, nas situações de mudanças de paradigma de Kuhn (1970).

Em sua abordagem, Nersessian (1992) utiliza como estudo de caso a elaboração da teoria eletromagnética por Maxwell, a partir do qual a autora procura evidenciar, dentre outros aspectos, a importância das analogias como métodos formais na produção de conhecimento científico. Além das implicações para a Filosofia da Ciência, Nersessian (1992) destaca as possíveis contribuições para a História da Ciência, para a Psicologia e para a Educação Científica. No que diz respeito ao ensino de ciências, para esta autora as analogias são então consideradas como um recurso para promoção da *mudança conceitual* dos estudantes, fundamentada a partir da psicologia cognitiva e da filosofia da ciência.

Segundo Silva e Catelli (2019) os estudos filosóficos sobre o papel das modelos¹ na ciência datam do século XIX. Atualmente estes estudos constituem um campo de investigação complexo e estruturado, cujas origens pode-se atribuir as obras de M. Black, em 1962, e M. Hesse, em 1966 (DUTRA, 2013). Desde então o interesse pelas metáforas, analogias e modelos em âmbito científico tem crescido extraordinariamente (RIVADULLA, 2006, p. 190).

De acordo com Schröder (2014), algumas das hipóteses fundamentais relacionadas a função cognitivo epistêmica da metáfora podem ser explicitamente identificadas em diferentes estudos – na filosofia, antropologia, psicologia e linguística – já a partir do século XVII. Contudo, é nas últimas décadas do século XX que os estudos da metáfora convergiram para os campos da cognição, considerando o fenômeno metafórico como parte integrante do pensamento, raciocínio e imaginação humanas (GIBBS, 2006). Neste cenário, outro importante marco inaugural é atribuído aos estudos de Lakoff e Johnson (2017), os quais estabeleceram os fundamentos da Teoria da Metáfora Conceptual (TMC), atribuindo à metáfora um papel cognitivo, cujos fundamentos encontram-se relacionados com a experiência sensorio motora humana (SILVA; LEITE, 2015). No contexto da TMC as

1 Para uma perspectiva mais ampla sobre modelos e metáforas, ver Rivadulla (2006).

metáforas “são produtos de nossos corpos, nossa interação com o meio físico², nossas interações sociais no marco cultural que nos é próprio” (CIAPUSCIO, 2011, p. 90). Mediante críticas e evidências, desde seu surgimento até os dias atuais, a TMC vem sendo modificada e aprimorada (SCHRÖDER, 2008, 2011).

A importância das metáforas no campo científico (incluindo modelos e analogias) vem sendo amplamente apontada (ARRUDA, 1993; KNUDSEN, 2003; KUHN, 1998; PULACZEWSKA, 2010) e diferentes estudos indicam sua presença nos livros didáticos (KOPP; ALMEIDA, 2019; SOUZA SILVA; MARTINS, 2010), em estratégias e como objeto de investigações no ensino (AMIN *et al.*, 2012; BOZELLI; NARDI, 2005; BROOKES; ETKINA, 2007; NARDI; ALMEIDA, 2006; QUALE, 2002; SKORCZYNSKA, 2014) e na divulgação científica (CERONI, 2014; SANTANA, 2019; SPERANÇA-CRISCUOLO, 2011; ZAMPONI, 2009).

Frente a este contexto, pretendemos apresentar a hipótese da Metáfora Epistêmica, defendida por Palma (2009, 2015a, 2015b). Segundo este autor, tal concepção é capaz de descrever o fenômeno metafórico em âmbito científico, derivando-se daí algumas contribuições para a compreensão do papel das metáforas na produção de conhecimento científico, no ensino de ciências e na divulgação científica (PALMA, 2015b).

Neste ponto pode ser útil destacar algumas considerações acerca de certas distinções e/ou semelhanças entre a concepção metafórica de Palma e os modelos e as analogias.

Sobre as analogias e metáforas, Palma (2015a) afirma que:

Tradicionalmente, “analogia” é diferenciada de “metáfora” por dizer que a primeira vem do grego *αναλογία*, (*ana* – reiteração ou comparação – e *logos* razão) e se refere a atividades mais vinculadas à comparação racional e com finalidade cognitiva, enquanto “metáfora” refere-se mais à criatividade literária, ao subjetivo e emocional. Dada a mudança na compreensão da metáfora que é proposta [pela concepção de metáfora epistêmica], tal distinção não faz sentido aqui (PALMA, 2015a, p. 22, grifos do autor).

Sobre os modelos e metáforas, Palma (2015a) considera que:

[...] existem diferentes formas de relacionar representação e representado, que se expressam nos diferentes tipos de modelos, mas também, e isto também se aplica às metáforas, na produção ou adoção de um modelo, a existência de um terceiro

2 Uma descrição básica e preliminar sobre a TMC encontra-se em Santana (2019).

elemento que produz a ligação entre representação e representados. O tratamento literário das metáforas resolve a questão apelando a uma instância mais ou menos evasiva como a inspiração ou a criatividade e a total arbitrariedade, deixando a questão em assento psicológico tanto para o caso do produtor quanto para aquele que, graças a uma certa sensibilidade, a capta e a desfruta. Mas a legitimidade e aceitabilidade dos modelos e [das Metáforas Epistêmicas] passam pela intersubjetividade e pela necessidade de objetividade extra (PALMA, 2015a, p. 51).

Uma discussão mais detalhada sobre as relações entre modelos a noção de Metáfora Epistêmica encontra-se em Palma (2015a, p. 48). No Capítulo 4 iremos pontuar algumas considerações sobre o uso de analogias e metáforas no ensino de ciências, ocasião em que iremos destacar outros aspectos importantes sobre as distinções e semelhanças com a concepção de Metáfora Epistêmica. De todo modo, entendemos que ao longo da argumentação que iremos apresentar, as distinções/semelhanças entre a concepção metafórica de Palma e os modelos e analogias, tornem-se gradativamente mais claras.

Assim, buscando contribuir com os estudos da metáfora no âmbito científico, apresentaremos a seguir os pressupostos teóricos que dão sustentação ao conceito de metáfora epistêmica, bem como os elementos conceituais que a constituem, visando a aplicação deste conceito em futuras investigações e no ensino de ciências.

2.2 METÁFORA E CONHECIMENTO CIENTÍFICO

O emprego de modelos e analogias desempenhou importante papel na produção de conhecimento científico a partir do século XIX, sobretudo no âmbito da física teórica – à época, um campo de pesquisa em formação – fornecendo subsídios não apenas heurísticos mas também metodológicos, contribuindo para seu estabelecimento como campo científico autêntico, bem como abrindo caminho para questionamentos epistêmicos inéditos sobre a atividade científica (ABRANTES, 1988; BOKULICH, 2015; BOLTZMANN, 1974b, 1974a; MAXWELL, 1856; ROQUE; VIDEIRA, 2013; VIDEIRA, 2006, 2013).

Segundo Palma (2015a), o uso de metáforas na ciência é rotineiro, embora sua ubiquidade não seja percebida de maneira evidente. Ao contrário, no decorrer da história da ciência, sobretudo a partir de meados do século XIX, a linguagem empregada pelos cientistas esteve envolta por pressupostos epistêmicos que, além de negligenciarem qualquer papel cognoscitivo na produção do conhecimento científico, tinham “a linguagem rigorosa e

formalizada como um desiderato epistêmico, [expulsando] irreversivelmente as metáforas do campo científico por sua referencialidade difusa” (PALMA, 2015a, p. 15), reconhecendo, todavia, seu valor heurístico ou mesmo didático.

O controle sobre a linguagem esteve presente desde o surgimento da ciência moderna, muito devido a seu potencial risco de subversão ao método científico empirista, característico daquele período histórico. De acordo com Pulaczewska (2010), considerando a visão aristotélica da metáfora – a transferência de uma palavra ou nome de um objeto para outro objeto – o seu uso em um contexto científico muito provavelmente enganaria todos aqueles que tomassem a palavra ou nome de forma literal, ou seja, como referência apenas ao objeto do qual fora originada a metáfora, sendo necessário, portanto, ser banida da linguagem científica.

Segundo Pascolini (2004), para os filósofos – dentre os quais Bacon, Hobbes, Locke – o uso de metáforas na ciência implicaria na introdução de termos não literais, impróprios ao domínio científico “com o risco de poluir os significados precisos e estáveis que a ciência deve descobrir além dos termos que usa” (2004, p. 3). Além disso, segundo Shapin (2013), a delimitação da linguagem empregada no campo científico buscava evitar as falhas do conhecimento vulgar frente a precisão e a lógica do pensamento erudito, salientando que:

Os filósofos tendem a não gostar de provérbios pela mesma razão que tendem a não gostar do raciocínio metafórico (e de outras formas de expressão indexical): ambos são indisciplinados e supõe-se que ambos incorporam modos imprecisos e superficiais de inferência, levando a inexatidão e ao erro (SHAPIN, 2013, p. 318).

No início do século XX, quando se estabelece a epistemologia positivista, tornou-se imprescindível a necessidade de “formalizar ao máximo a linguagem científica como meio para alcançar a objetividade e neutralidade” (PALMA, 2009, p. 8–9). Embora houvesse o reconhecimento dos valores heurístico e didático das metáforas para o campo científico, uma vez que a ciência era caracterizada pela precisão e pela ausência de ambiguidade, presumia-se que a sua linguagem deveria ser, correspondentemente, precisa e inequívoca (ORTONY, 1993). Este cuidado estendia-se ao uso das imagens.

Por exemplo, na filosofia ocidental do início do século XX, uma crença tácita no status privilegiado da linguagem literal era uma importante suposição subjacente das

teorias de significado de imagem [...]. Essa crença atingiu o auge na doutrina do positivismo lógico, tão difundida entre os filósofos e cientistas há sessenta anos. Uma noção básica do positivismo era que a realidade poderia ser precisamente descrita por meio da linguagem de uma maneira que fosse clara, inequívoca e, em princípio, testável – a realidade poderia, e deveria, ser literalmente descritível. Outros usos da linguagem não faziam sentido, pois violavam esse critério empirista de significado. Durante o apogeu do positivismo lógico, a linguagem literal reinou suprema (ORTONY, 1993, p. 1).

De acordo com Palma (2015a) o período compreendido entre as últimas décadas do século XIX e as primeiras décadas do século XX, onde predominaram concepções filosóficas da ciência que buscaram reduzir a prática científica a “um cálculo axiomático empiricamente interpretado” (PALMA, 2015a, p. 65), é também marcado pelo surgimento do idealismo e o desenvolvimento de novas teorias científicas como a Relatividade, a Mecânica Quântica e grandes desenvolvimentos na Biologia – as teorias evolucionista, celular, das doenças infecciosas e a genética –, sendo neste contexto que se consolidam também os extensos campos das ciências sociais, dentre os quais a antropologia, a sociologia, a psicologia e a linguística. Neste cenário a imagem da ciência que fora construída, não com base nas práticas científicas de fato, “mas como proposta à priori, prescritiva e canônica de como fazer boa ciência” (PALMA, 2015a, p. 73), traz consigo um pano de fundo constituído por críticas e revisões necessárias à visão corrente acerca da prática científica. Neste sentido, as críticas deflagradas no período considerado conduziram, pouco a pouco a uma virada epistêmica, tendo como ápice a obra inaugural de T. Kuhn (1970) em meados do século XX, a partir da qual o interesse dos estudiosos da ciência não mais restringia-se apenas ao produto da atividade científica, mas também à própria atividade científica, passando a levar em conta “os aspectos pragmáticos e incluir elementos psicológicos, sociológicos e históricos” (PALMA, 2015a, p. 74).

Com o advento das “revoluções científicas” de Kuhn (1970), a ciência passou a ser questionada, dentre outros aspectos, acerca de sua linguagem (PULACZEWSKA, 2010). Tais questionamentos reivindicavam que a linguagem científica teria lugar-comum junto a outras formas de linguagem, abrindo caminho para concepções que poderíamos localizar no extremo oposto, ou seja, que consideram que “a linguagem da ciência, para além de certos rituais e peculiaridades instrumentais, não se diferiria de outras atividades e linguagens sem referencialidade privilegiada ou rigorosa” (PALMA, 2015a, p. 16). Estes questionamentos partem de autores que podem ser rastreados desde o século XIX, os quais deflagram “uma crítica à ciência moderna e suas pretensões de objetividade denunciando, entre outras

misérias, que as ciências usam metáforas” (PALMA, 2015a, p. 16).

Assim, a transição epistêmica ocorrida ao longo de todo o século XX tornou possível, em suas últimas décadas, o surgimento de uma nova gama de estudos da ciência que incorporaram abordagens sociológicas, tais como o *Strong Programme*, *Science Studies*, dos quais derivaram novas linhas de estudo como os programas relativista e construtivista e os estudos *etnometodológicos*, que passaram também a considerar a organização social das comunidades científicas (PALMA, 2015a).

Atualmente, a importância das metáforas na ciência é reconhecida por diversos autores. Segundo Gentner e Jeziorski (1993, p. 447) “analogia e metáfora são centrais para o pensamento científico”. Para Boyd (1993, p. 483) as metáforas constituem um dos meios que os cientistas dispõem para “acomodar a linguagem à estrutura causal do mundo”. Além disso:

[...] as expressões metafóricas constituem, pelo menos por um tempo, uma parte insubstituível do mecanismo linguístico de uma teoria científica: casos em que existem metáforas que os cientistas usam para expressar alegações teóricas para as quais nenhuma paráfrase literal adequada é conhecida. Tais metáforas são constitutivas das teorias que expressam, e não meramente exegéticas (BOYD, 1993, p. 486).

Para Pulaczewska (2010, p. 377), é uma obviedade afirmar “que a ciência não pode se desenvolver sem uma linguagem para falar sobre seus insights”. Segundo Palma (2009, p. 7), constata-se “com facilidade que, ao longo da história da ciência – e também na atualidade –, os cientistas vêm utilizando metáforas”; e vai além, afirmando que “as metáforas que os cientistas utilizam dizem algo por si”, tendo portanto, “uma função cognoscitiva epistêmica legítima, sobretudo, insubstituível” (PALMA, 2015a, p. 16). Para Kuhn (1993, p. 539), a “metáfora desempenha um papel essencial no estabelecimento de vínculos entre a linguagem científica e o mundo”, tendo importante papel também na formação de cientistas:

Algo com as propriedades da metáfora é frequentemente chamado quando um novo termo é *introduzido* no vocabulário da ciência. Mas também é solicitado quando tais termos - já estabelecidos no linguagem comum da profissão - são *introduzidos* à uma nova geração de cientistas por uma geração que já aprendeu seu uso (KUHN, 1998, p. 534, grifos do autor).

Outro aspecto relevante em relação ao uso das metáforas na produção de conhecimento científico diz respeito ao pensamento abstrato. Nas ciências, sobretudo na Física, a necessidade de abstrações é uma prerrogativa recorrente (KOESTLER, 2014) e para empreender o pensamento abstrato, indivíduos põem em uso uma importante característica da metáfora (SHAPIRO, 1986), qual seja, a capacidade de estruturar compreensões e interpretações do abstrato em termos do concreto. A este respeito, Lakoff (1993, p. 205) afirma que “assim que se foge da experiência física concreta e começamos a falar sobre abstrações ou emoções, compreensão metafórica é norma”.

Sobre as abstrações, Gaston Bachelard (1884-1962) considera ser este o último estágio de desenvolvimento na história do pensamento científico, quando então o *espírito científico* atingiria o estágio da abstração completa. Neste estágio “o pensamento científico é então levado para *construções* mais metafóricas que reais” (BACHELARD, 1996, p. 7, grifo do autor).

Até aqui procuramos ressaltar que os caminhos tomados pelos estudos filosóficos da ciência e das metáforas, ocorridos ao longo do século XX, tornou possível o diálogo entre estes dois campos de conhecimento. Procuramos também, ressaltar que vários autores defendem a importância das metáforas na produção de conhecimento científica, dado o papel cognitivo e epistêmico inerentes ao fenômeno metafórico.

Neste sentido, diferentes autores consideram que as metáforas são empregadas em várias instâncias do processo de científico, perpassando a produção do conhecimento científico, a formação de cientistas, o ensino e a comunicação científicas. Palma (2009, 2015a) defende que, no âmbito da produção de conhecimento, as metáforas são constituintes do processo e não um mero recurso metodológico, heurístico ou expressivo. Além disso, de acordo com o autor, é plausível considerar que “boa parte dos processos de constituição do conhecimento científico opera pela apropriação, legitimação, abandono, descarte ou recuperação de [metáforas epistêmicas] disponível em um determinado momento [histórico]”. (PALMA, 2015a, p. 40). Neste sentido, para este autor, é plausível considerar que, subjacente a boa parte dos episódios que compõem a história das ciências, pode-se encontrar processos que o autor denomina por metáforas epistêmicas, mas alerta para o fato de que nem todos os processos históricos de produção de conhecimento científico podem ser estruturados a partir de metáforas epistêmicas:

Verificar a profusão da [metáforas epistêmicas] na ciência atual e no passado requer

apenas uma revisão de um número infinito de exemplos. Contudo, além dessa condição meramente quantitativa, é possível avançar com alguma plausibilidade na hipótese mais interessante e estrutural sobre processos históricos nas ciências, com o cuidado de não cair na tentação pan metafórica [...] (PALMA, 2015a, p. 40–41).

Desse modo, mediante tal posicionamento, pode-se colocar o seguinte questionamento: considerando a pluralidade de estudos e a ampla teorização já existentes para o fenômeno metafórico, como é constituído o objeto metafórico, estruturalmente organizado e conceitualmente estabelecido, capaz de desempenhar o papel defendido por Palma? Na próxima seção buscamos expor a argumentação de Palma que dá suporte ao conceito de metáfora epistêmica, por ele proposto.

2.3 PRESSUPOSTOS FUNDAMENTAIS DA METÁFORA EPISTÊMICA

Uma possível conceitualização do fenômeno metafórico no âmbito científico é proposta por Hector Palma³ em sua obra *Ciencia y metáforas: crítica de una razon incestuosa*, publicada em 2015, na qual ele apresenta de modo mais amplo e completo um conjunto de estudos sobre o tema.

De início, devemos salientar que a concepção do fenômeno metafórico proposto por Palma vai além do reconhecido papel heurístico e didático das metáforas. Além disso, conforme exposto anteriormente, a relativa conjunção entre os estudos da metáfora e da filosofia da ciência deveu-se, em parte, a virada epistêmica ocorrida em meados do século XX, a qual permitiu avanços no campo da filosofia da ciência, mas possibilitou também novas concepções de ciência, que num certo sentido poderíamos localizar no extremo oposto da concepção filosófica que fora superada com a referida virada epistêmica. Deve, portanto, ficar claro que o esforço de Palma em estabelecer um papel epistêmico para as metáforas não implica em abrir mão de certas especificidades do conhecimento científico:

3 Filósofo argentino dedicado à docência e à investigação em temas de filosofia da ciência em geral e da filosofia da biologia em particular, evolucionismo, história da eugenia, metáforas na ciência. Graduou-se como Professor de Filosofia (Universidade de Buenos Aires, 1991), Mestre em Ciência, Tecnologia e Sociedade (Universidade Nacional de Quilmes, 2000), Doutor em Ciências Sociais e Humanas (Universidade Nacional de Quilmes, 2003). Atualmente, e desde de 1998, desenvolve suas atividades na Universidade Nacional General San Martín, onde é professor titular da cátedra de Filosofia das Ciências (PALMA, 2020).

[...] a reavaliação da metáfora, e isso deve ser esclarecido, não vem apenas da reavaliação para ela das funções heurísticas ou estéticas que tradicionalmente lhe foram atribuídas e, por outro lado, desprezadas pela epistemologia padrão. Em todo o caso, não seria uma busca por elementos nos quais a ciência se assemelha a outras práticas discursivas, como a literatura, em que boa parte dos estudos sobre a ciência das últimas décadas caíram. Estas são algumas versões retóricas/irracionistas/pós-modernistas da moda que contribuíram para obscurecer a especificidade da ciência, incluindo-a em um conjunto heterogêneo de conhecimentos e práticas discursivas [...] (PALMA, 2005, p. 47).

Palma não nega que hajam aspectos estéticos e retóricos envolvidos com o uso das metáforas. Contudo, para ele, estas qualidades constituem uma questão secundária. Do contrário, são as funções cognoscitivas e epistêmicas que serão por ele colocadas em primeiro plano (PALMA, 2015a). A negação de tais funções, como já expusemos, estiveram relacionadas à concepções epistêmicas que atribuíram à linguagem grande parte do compromisso da ciência com a objetividade e a racionalidade, a qual “expressaria a verdadeira explicação, que a ciência possui mas que é inacessível para os não especialistas” (PALMA, 2015a, p. 15). Neste cenário, a linguagem literal estaria apta a transmitir o conhecimento, enquanto a linguagem metafórica desempenharia funções estética ou retóricas, quando muito, heurísticas ou didáticas.

É de grande importância salientar que a proposição de Palma estende o papel das metáforas para além dos contextos comunicativo, didático e heurístico, relacionados aos saberes científicos. Embora os reconheça, para este autor as metáforas também desempenham um papel, este sim único e insubstituível, na produção e justificação do conhecimento científico, sem contudo, incorrer em uma literaturalização da linguagem científica (PALMA, 2015a). Além disso, não trata-se de rever o estatuto epistêmico da ciência, mas de rever o papel das metáforas no âmbito científico, ou seja, uma indagação e reivindicação de seu uso epistêmico.

Desse modo, Palma assume como pressuposto que as metáforas científicas são constitutivas do conhecimento e não um mero recurso, cujo emprego é prescindível. Não se trata apenas de comunicar aquilo que poderia ser dito em uma linguagem científica neutra e literal, acessível apenas aos especialistas. Assim, as metáforas científicas cumprem um papel cognoscitivo e epistêmico, não apenas entre os cientistas mas também na apropriação dos conhecimentos científicos pelos estudantes e pelos não especialistas. Assim sendo:

[...] o caráter fundamental e inevitável do uso de metáforas é claro. Portanto, não

faz sentido apresentar uma espécie de reclamação ou aviso sobre os supostos perigos ou riscos da linguagem metafórica. Antes, trata-se de analisar a natureza e a função das metáforas para entender o tipo de compromissos conceituais, intelectuais e epistemológicos que são assumidos quando as enunciamos e tirar proveito de suas potencialidades (PALMA, 2009, p. 62).

Para estabelecer as funções cognoscitivas e epistêmicas da metáfora no campo científico, Palma articula elementos conceituais sobre o fenômeno metafórico oriundos dos campos da semântica e da pragmática. Nestas duas perspectivas de estudo, diferentes autores estabeleceram aspectos fundamentais do fenômeno nos quais Palma se apoia para caracterizar seu conceito de metáfora científica.

Do ponto de vista da semântica, as metáforas implicam em uma mudança no significado de termos e o fenômeno é considerado inicialmente ao nível das palavras. Sem levar em conta o contexto da fala, os estudos semânticos consideram que para toda metáfora há uma expressão literal correspondente e nesta interação entre a linguagem literal e a linguagem figurada – uma espécie de tradução – a metáfora seria capaz de evidenciar as semelhanças preexistentes entre dois termos. Porém, Black (1955) estabelece, entre outros aspectos importantes, que as metáforas *criam* uma semelhança onde antes não havia nenhuma. Em sua investigação, M. Black reivindica um olhar filosófico sobre o tema da metáfora e para incitar uma discussão neste nível, propõe que as metáforas devem ser consideradas em um enfoque *interacionista*.

Nesta perspectiva, denuncia Black (1955), qualquer visão que considera a metáfora como uma expressão capaz de substituir a expressão literal, estaria adotando um enfoque *substitutivo*, e neste caso, “entender uma metáfora é como decifrar um código ou desvendar um enigma” (BLACK, 1955, p. 280). Por outro lado, qualquer visão que considera que a metáfora apresenta similaridades relativamente evidentes ao termo literal associado, e neste contexto, em que há uma relação de analogia intencional subjacente, M. Black qualifica este enfoque como *comparativo*. Contudo, questiona estas duas formas de conceber uma metáfora: “A declaração metafórica não substitui uma comparação formal ou qualquer outro tipo de declaração literal, mas possui capacidades e realizações distintas” (BLACK, 1955, p. 284).

Negando estes dois enfoques, M. Black propõem uma terceira perspectiva, argumentando que as metáforas colocam lado a lado dois sistemas conceituais que até então não estavam associados. Mais do que associá-los, quando proferida, uma metáfora coloca os dois campos em *interação* e este ato “suprime alguns detalhes, enfatiza outros – em suma, organiza nossa visão” (BLACK, 1955, p. 287). A metáfora, dessa forma, opera como um

filtro, através do qual pode-se ver o *assunto principal* a partir da perspectiva do *assunto subsidiário*, sendo necessário, contudo, que o leitor disponha de um *sistema de lugares comuns associados*.

Para compreender a nomenclatura utilizada por M. Black um exemplo pode ser útil: na expressão “o homem é um lobo”, o termo homem é o *assunto principal* e lobo é o *assunto subsidiário*. O *sistema de lugares comuns associados* é tudo aquilo que um leitor já conhece sobre os lobos, sejam estes conceitos falsos ou verdadeiros. A metáfora conduz o leitor a compreender um homem não a partir das implicações literais do termo “homem”, mas a partir das implicações literais que definem um lobo. Neste processo, alguns elementos serão enfatizados, exatamente aqueles que fazem parte da compreensão que o leitor tem previamente acerca de lobos e homens:

Quaisquer traços humanos que possam ser mencionados sem esforço excessivo na ‘linguagem dos lobos’ serão destacados e quaisquer que não puderem serão empurrados para segundo plano. A metáfora do lobo suprime alguns detalhes, enfatiza os outros - em suma, organiza nossa visão do homem (BLACK, 1955, p. 288).

É importante salientar que M. Black não nega que as metáforas possam desempenhar as funções *substitutiva* e *comparativa*. Ele reivindica, no entanto, que as metáforas sejam alçadas a condição de objeto da filosofia, uma vez que podem desempenhar funções *interativas*, nos moldes por ele propostos. Nestes termos, o trabalho de Black (1955) é considerado um marco para os estudos filosóficos da metáfora.

A partir dos trabalhos de P. Ricoeur, a metáfora é alçada do nível da palavra ao nível da sentença. Para P. Ricoeur, a criação da semelhança pela metáfora é corretamente caracterizada pela teoria da interação proposta por M. Black, contudo, adverte que “o portador da metáfora não é mais a palavra, mas a sentença como um todo” (RICOEUR, 1978, p. 145).

Deriva da proposição interativa de M. Black que a metáfora põem em interação dois âmbitos (homem/lobo) e cria semelhanças, apenas no nível lexical. Mas, segundo Ricoeur (1978), embora seja verdadeiro “que o efeito do sentido esteja focado na palavra, a produção do sentido é suportada por toda a expressão”, de modo que uma teoria da metáfora deva considerar inevitavelmente uma semântica da sentença. O que se quer dizer é que, embora a metáfora, em alguns casos, possa criar semelhanças onde antes não se percebia, como afirmara M. Black (1955), ela cria também novos sentidos para os léxicos, e estes sentidos

pertencem aos campos semânticos dos respectivos léxicos. Desse modo:

[...] a metáfora frase é o nascimento de um sentido novo, ou melhor, nela aparece um sentido novo em *in statu nascendi*, que se eleva das ruínas do sentido literal da frase; assim, se deve falar na metáfora frase de criação de sentido (CORONA, 2005, p. 69, grifo do autor).

Para P. Ricoeur, uma metáfora obriga a uma aproximação de diferentes campos semânticos e esta interação produz novos sentidos no interior dos campos semânticos, o que ele denomina de *inovação semântica*, a qual depende de três condições para ocorrência: *impertinência literal*, *nova pertinência predicativa* e *torção verbal*. Uma vez mais nos utilizaremos de um exemplo para melhor expor os conceitos que pretendemos esclarecer.

Retomemos a expressão “o homem é um lobo”. Aquele que se depara com tal expressão e percebe a incoerência naquilo que se está a afirmar, depara-se com uma *impertinência literal*. A tentativa de encontrar algum sentido na afirmação, partindo dos significados literais que os léxicos homem/lobo têm no interior dos campos semânticos a que pertencem, falha categoricamente, uma vez que “o extremo deste modo de predicação seria absurdo” (CORONA, 2005).

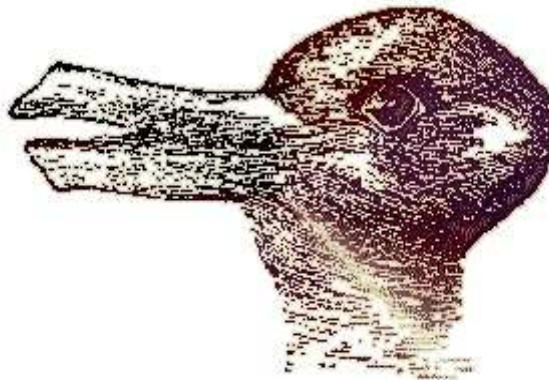
Diante do absurdo inicialmente instanciado, a interpretação da metáfora implica em desalojar a tentativa de significação lógica imediata – pois ela é falha – e estabelecer uma nova interpretação capaz de prover novos sentidos. Coloca-se neste ponto uma grande interrogação, qual seja, como descrever o processo que leva de uma incongruência inicial de ideias, uma contradição flagrante, para um estado de congruência, onde homem e lobo possam representar um estado de contradição significativa, como se houvesse surgido uma zona de intersecção entre dois campos semânticos distintos.

Para fundamentar o movimento da contradição inicial à uma contradição significativa, P. Ricoeur apoia-se na noção wittgensteiniana de “ver como” (HILGERT, 2015, p. 8). Trazendo para o exemplo dado, não se trata de ver que o homem é um lobo, mas sim, de ver o homem *como* um lobo, “em alguns sentidos, mas não em todos” (RICOEUR, 2000, p. 325). A inserção das ideias de Wittgenstein no processo metafórico defendido por P. Ricoeur decorre, portanto, da necessidade de descrever como surge a congruência de ideias onde antes reinava a contradição. Assim, ele explica:

É verdade que a transposição da análise de Wittgenstein para a metáfora introduz uma importante mudança: no caso da imagem ambígua, há uma *Gestalt* (B) que permite ver, seja uma figura A, seja outra figura C; o problema é, portanto: dado B, construir A ou C. No caso da metáfora, A e C são dados à leitura: são o *conteúdo* e o *veículo*; e o que deve ser construído é o elemento comum B, a *Gestalt*, o ponto de vista sob o qual A e C são semelhantes (RICOEUR, 2000, p. 325, grifos do autor).

Nestes termos, “a metáfora não é um enigma, mas a solução do enigma” (RICOEUR, 1978, p. 325) e há, portanto, um mecanismo que permite fazer surgir uma zona de intersecção entre dois campos semânticos, dando lugar a uma *nova pertinência predicativa* quando se olha para o homem como se ele fosse um lobo. A Figura 1 ilustra uma típica imagem de Gestalt, onde pode ser visualizado um pato e/ou uma lebre. Dado a figura, quem a observe poderá perceber “pato” ou “lebre”, sendo a imagem como um todo, o elemento comum às duas imagens particulares. Na analogia feita por Ricoeur, “pato” e “lebre” correspondem ao *conceito* e *veículo*; a metáfora é o elemento comum a ser construído – o ponto de vista sob o qual “pato” e “lebre” podem ser assemelhados.

Figura 1 - Imagem de Gestalt, pato e lebre.



Fonte: <<https://pilulasdepsicologia.wordpress.com/imagens/>>. Acesso: 24/04/2020

O desencontro semântico homem/lobo inicialmente posto exige ser solucionado. A metáfora cria, assim, uma tensão que impõe encontrar novos sentidos para os léxicos homem/lobo, ou seja, buscar por uma aproximação. Como afirma Ricoeur (1978, p. 148) “a assimilação consiste precisamente em tornar semelhantes, ou seja, semanticamente próximos, os termos que o enunciado metafórico reúne”. A metáfora permanece *viva* enquanto se perceber a tensão homem/lobo. Mediante este estado de tensão, no qual se estabelece uma *nova pertinência predicativa*, as palavras necessitam ter seus sentidos alargados, ocorrendo assim uma *torção verbal* (CORONA, 2005). Importa, contudo, deixar claro que ver o homem *como* um lobo implica logicamente que o homem *não é* um lobo; “as fronteiras de sentido são

transgredidas, mas não abolidas” (RICOEUR, 2000, p. 327).

Apesar das limitações inerentes aos estudos da metáfora no âmbito da semântica, há consenso de que as metáforas apresentam um caráter fundacional, no sentido de que criam novos significados “que não surgem de similitudes ou analogias pré existentes senão de ato criativo” (PALMA, 2015a, p. 26). Apesar disso, os “novos significados habilitam falar em duas linguagens – uma literal e outra metafórica – mas a segunda não é redutível nem traduzível à primeira” (PALMA, 2015a, p. 26). A este respeito, vale ressaltar que um termo ou expressão é considerada literal quando seus significados estão dados em um determinado contexto, ou seja, há um acordo de compreensão de significados que é compartilhado por indivíduos em suas relações de comunicação. Neste contexto compartilhado, uma expressão é metafórica quando requer uma interpretação que até então não é parte do conjunto de normas interpretativas compartilhadas⁴.

Os estudos semânticos da metáfora, contudo, não levam em conta o significado comunicativo, o qual é determinado pelo contexto no qual os falantes usam a língua. A visão pragmática, por outro lado, considera que o contexto da fala é determinante para a elaboração e compreensão das metáforas. Isto explica porque algumas metáforas podem ter êxito ou mesmo existirem em determinados contextos mas não em outros (PALMA, 2015a) – por exemplo, nem sempre foi possível afirmar que a sociedade é como um organismo. De acordo com Palma:

A dimensão pragmática da linguagem refere-se ao fato de que existem elementos do contexto que não são estritamente linguísticos, que determinam ou influenciam decisivamente a produção e o entendimento das ações linguísticas, neste caso, as metáforas. Esses elementos contextuais, que são fundamentais para entender por que uma metáfora é entendida como tal, resultam cruciais para dar conta do modo em que se produzem, têm êxito e circulam as [metáforas epistêmicas] (PALMA, 2015a, p. 27).

Ainda de acordo com este autor, a produção de significado com base em elementos contextuais dá-se a partir de um modelo inferencial, produzindo e recebendo informações tomando por base informações prévias, em contraste com o modelo semiótico baseado na

⁴ Diferentes autores (DAVIDSON, 1978; KOESTLER, 2014; LAKOFF; JOHNSON, 2017; RICOEUR, 2000; TURBAYNE, 1974) argumentam em favor de que as metáforas podem estar ativas ou inativas (dito deste modo para evitarmos a variedade de termos, próprios de cada autor). Em suma, uma expressão metafórica está ativa enquanto tensiona os sujeitos a buscarem interpretações para a expressão cuja interpretação ainda lhes é estranha, desconhecida ou mesmo ilógica, enquanto a expressão metafórica inativa já não é mais percebida como tal; já trata-se de uma expressão literalizada.

noção de código.

Neste âmbito, J. Searle estabelece que no ato comunicativo há um conjunto de regras ou estratégias empregadas pelos falantes/ouvintes para produzir/interpretar as expressões metafóricas. Assim sendo, o emprego de metáforas implica necessariamente na existência de um contexto propício e compartilhado entre falantes e ouvintes, e da capacidade dos ouvintes em captar as intenções do falante (PALMA, 2015a).

Em resumo, pode-se considerar que as análises semântica e pragmática oferecem contribuições mas também limitações para estabelecer o fenômeno metafórico no âmbito científico. Do âmbito semântico deriva-se o caráter fundacional das metáforas e do âmbito da pragmática deriva-se a relevância do contexto para a compreensão da metáfora. Contudo, de acordo com Palma (PALMA, 2015a) as limitações decorrem de fato de que as análises semântico pragmáticas são válidas sincronicamente, ou seja, aplicam-se plenamente “para descrever a produção e compreensão das metáforas que não mudam de estatuto, ou seja aquelas que sempre são metáforas” (PALMA, 2015a, p. 30). Desse modo, é importante considerar dois aspectos fundamentais e complementares. As metáforas científicas já não apresentam a tensão significativa inicial pois sua origem metafórica já não é percebida; elas passam de metáfora viva a metáfora morta; apresentam, portanto, uma historicidade interna (PALMA, 2015a). Em resumo, sobre as contribuições da semântica e da pragmática para a constituição do fenômeno metáfora em âmbito científico, Palma afirma:

Além da novidade semântica, a dimensão pragmática da linguagem é fundamental porque toda metáfora é proferida em um contexto que faz com que seja exitosa ou [...] sem sentido. Mas as [metáforas epistêmicas], em particular, não mantêm uma relação dialética ou tensionada com uma linguagem literal, porque simplesmente esta já não está disponível ou se refere a outra coisa (PALMA, 2015a, p. 31).

A ideia de que a todo significado metafórico exista um significado literal sugere um desvio. Tal desvio, por certo, deve ser evitado em uma linguagem a partir da qual se pretende comunicar conhecimentos que exigem uma significação inequívoca, tal qual é o caso da ciência, e foi sobre esta égide que se sustentou por um bom tempo o distanciamento das metáforas da linguagem científica. Contudo, os estudos de Donald Davidson (1917-2003) sugerem o abandono da percepção de uma dualidade literal/metafórico⁵, constituindo assim

5 A superação da dualidade de significado – literal/metafórico – é empreendida por Palma de dois modos distintos: por meio dos pressupostos de Davidson (PALMA, 2009), que aqui expomos, e também por meio dos pressupostos de Quine, acerca da indeterminação da tradução (PALMA, 2015a). Segundo o autor, ambas

outro importante marco para a compreensão das metáforas (SILVA FILHO, 2001).

As ideias defendidas por D. Davidson se localizam em um domínio mais abrangente que o domínio da metáfora (ARRUDA, 2005). Apesar disso, não deixou de estabelecer implicações inovadoras para o fenômeno metafórico, dentre as quais algumas delas são particularmente úteis destacar. As metáforas, na concepção de Davidson, “agregam ao uso comum e ordinário da linguagem um resultado notável e interessante” (SILVA FILHO, 2001, p. 33), mas o seu significado deriva das palavras em sua interpretação mais literal, ou seja, não há um código a ser dominado por quem pretende interpretar uma metáfora. Por outro lado, há um modelo para interpretação que está atrelado ao sujeito em virtude da comunidade à qual ele pertence, herdando desta uma tradição cultural historicamente demarcada (QUINTANILLA, 1995). Trata-se de um ponto crucial para a construção do conceito de metáfora científica de Palma, uma vez que no interior dos limites de qualquer especialidade científica, os indivíduos compartilham um conjunto de significados, objetivamente estabelecidos, que estruturam teorias e conceitos internos à estas teorias, vigentes em um dado tempo e espaço.

Para Davidson a interpretação que um ouvinte elabora para a compreender o que foi proferido por um falante se desenvolve em dois níveis. Primeiramente o interprete se atém ao significado literal das palavras proferidas pelo falante, dentro do espaço cultural próprio a que pertence e, num segundo momento, o que o falante pretendeu dar a entender ao empregá-las.

Primeiro encontramos os significados literais e só depois buscamos os significados que o falante tentou expressar nesta situação e contexto específicos, se é que temos razões para supor que nesta ocasião o significado literal e o significado intencional divergem. Isto ocorre em qualquer caso de interpretação linguística, incluindo a interpretação de metáforas, só que com as metáforas este duplo processo é mais óbvio (QUINTANILLA, 1995, p. 118–119).

Quando uma metáfora coloca o ouvinte diante de um contexto que lhe exige um esforço de interpretação por estabelecer associações comparativas inéditas para ele, este necessita desprender um conjunto de hipóteses criativas para atribuir algum sentido ao que está sendo proferido. Considerando indivíduos pertencentes a uma mesma especialidade científica, este esforço de entendimento suscita novas possibilidades de interpretação e as incorpora nas percepções previamente dominadas por um ouvinte. Este processo modifica e

argumentações são igualmente válidas para o fim pretendido.

amplia os domínios de significação no interior da comunidade científica. Como mostraremos em breve, esta é uma das características da metáfora científica – modificar e ampliar a base de conhecimentos previamente estabelecidos no interior de uma especialidade científica. Nas palavras de Quintanilla (1995, p. 121), “a qualidade de uma metáfora se encontra em direta proporção a possibilidade de mudança conceitual e iluminação que pode provocar nos intérpretes”.

Diante dos aspectos que foram destacados nesta seção, ressaltamos três pressupostos fundamentais, estabelecidos no seio dos estudos da metáfora, sobre os quais se apoia a concepção metafórica de Palma: as metáforas podem *criar* novos significados; não há uma linguagem literal da qual se pode derivar uma linguagem metafórica, mas sim duas linguagens em si mesmas, cada qual com suas vantagens, alcances e limitações; na manifestação do fenômeno metafórico o contexto tem implicações determinantes.

2.4 CARACTERIZAÇÃO CONCEITUAL DA METÁFORA EPISTÊMICA

Para Palma o fenômeno metafórico no âmbito científico é um processo histórico, demarcado pelo pano de fundo conceitual e experimental científicos, mas também o contexto social e cultural de uma época, ou seja, um contexto em que predomina uma determinada conformação científico-cultural. No entanto, cabe estabelecer que: “as metáforas científicas, que aqui se denominarão *metáforas epistêmicas* (daqui em diante ME) são diferentes das outras e então requerem algumas precisões quanto a sua própria história interna” (PALMA, 2015a, p. 20, grifo do autor). Importa também destacar que as ME diferem das metáforas literárias:

As ME compartilham algumas características com as metáforas em geral, mas também diferem em outros aspectos fundamentais, não tanto nos mecanismos (psicológicos, neurológicos ou de qualquer outro tipo) que podem gerá-las, mas em sua função, em sua historicidade e em sua relação com a realidade (PALMA, 2015b, p. 137).

Notamos, portanto, que segundo este autor a ME desempenha funções que não são meramente retóricas, como é o caso das metáforas literárias; a ME possui uma historicidade

estrutural – é perceptível em seu ato inaugural (a *bissociação*), mas seu rastro se apaga com o tempo (sua *literalização*) – e deve guardar alguma correspondência com a realidade, tal qual se espera de todo enunciado científico válido.

Inicialmente partiremos da definição de ME para então destacar aspectos importantes do referido conceito para posteriormente aprofundarmos alguns destes aspectos. De acordo com Palma, a ME pode ser assim enunciada:

[...] no uso epistêmico das metáforas, uma expressão (termo, grupo de termos ou sistema de enunciados), e as práticas com ela associadas, habituais e correntes num âmbito de discurso determinado sócio historicamente, substitui ou vem agregar-se (modificando-a) com aspirações cognoscitivo epistêmicas a outra expressão (termo, grupo de termos ou sistema de enunciados), e às práticas a ela associadas em outro âmbito de discurso determinado sócio historicamente; esse processo se desenvolve em duas etapas, a saber: *bissociação sincrônica/literalização diacrônica* (PALMA, 2009, p. 21).

O primeiro ponto à destacar é que uma ME consiste na agregação de dois elementos (uma expressão, termo, grupos de termos ou sistema de enunciados). O momento em que tal associação ocorre constitui o “nascimento” da ME, o qual é denominado de *bissociação*. O fato de se tratar de um processo *sincrônico* indica que a agregação de elementos é localizada pontualmente no tempo, o qual detalharemos em breve.

Notemos que o contexto em que tal agregação ocorre é determinante para a ME. Os limites do contexto incluem dois aspectos que devemos destacar. Primeiramente, são as *práticas habituais e correntes* pertencentes ao referido campo científico que estão disponíveis para formar as ME. Além disso, há o reconhecimento de implicações sociais e culturais, vigentes em um dado período, na constituição e validação do fazer científico.

A concepção de ME, portanto, dialoga de maneira consistente com as concepções epistêmicas que incluem as dimensões sócio históricas em suas bases conceituais. Não por acaso, afinal o reconhecimento do papel das metáforas na ciência pôde emergir, dentre outros aspectos, pela superação de concepções epistêmicas estruturadas de maneira transparente aos aspectos sócio históricos. Nota-se, portanto, um compromisso lógico do conceito de ME, o qual inclui determinadas epistemologias e exclui outras.

Outro aspecto importante a ser destacado diz respeito aos efeitos que podem ser desencadeados. O processo da ME pode conduzir a uma *substituição* ou *agregação* (de termos, grupos de termos ou sistemas de enunciados e as práticas a eles associadas). Notemos

que tanto a *agregação* quanto a *substituição* alteram a conformação do contexto científico, embora não do mesmo modo. Uma *agregação* possivelmente irá refletir de maneira mais sutil no quadro teórico e empírico de um campo científico. Por outro lado, uma *substituição* poderia implicar em uma mudança mais acentuada nos rumos de uma determinada comunidade científica. Uma abordagem do alcance dessas alterações traria, por certo, uma melhor compreensão do processo das ME, porém, nos conduziria demasiadamente para o campo epistemológico. Em relação a este ponto, é necessário e suficiente deixar claro que as ME (mas apenas estas) podem alterar de algum modo o quadro teórico experimental.

As *aspirações cognoscitivo epistêmicas* constituem propriamente o papel que as ME devem desempenhar no âmbito científico (PALMA, 2015a). Notemos, portanto, que Palma (PALMA, 2015a) assume explicitamente serem as ME constituintes do processo de produção de conhecimento, desempenhando, assim, um papel insubstituível.

A última etapa de um processo de ME consiste em sua *literalização*, a qual se constitui de um modo *diacrônico*, indicando, portanto, que a mesma se desenvolve ao longo do tempo. O termo *literalização* aqui empregado exprime o processo de apagamento da metáfora, ou seja, a *agregação/substituição* que esteve em jogo na *bissociação* torna-se imperceptível à comunidade científica. O termo *literalização* é aqui empregado buscando indicar que a novidade conceitual inaugurada pela *bissociação* tornou-se uma afirmação científica coerente e estável – coerente porquê passou a atender aos critérios lógicos e empíricos vigentes na comunidade científica em questão; estável porquê sua significação e aceitação foi acordada pela comunidade científica onde circula. Como detalharemos em breve, este é o destino inevitável de toda ME bem sucedida.

Passaremos agora a descrever com maiores detalhes os processos de *bissociação* e *literalização*. Estes conceitos constituem os elementos centrais e estruturantes da ME.

2.4.1 O conceito de *bissociação*

Para descrever o marco zero de uma ME, Palma emprega o conceito de *bissociação*, originalmente proposto por A. Koestler, em sua obra *The Act of Creation*, publicada em 1964:

A. Koestler (1964) explica a geração de uma metáfora através do conceito de

bissociação, definida como a intersecção de dois planos ou universos de discurso ordinariamente separados (as vezes incompatíveis) até que alguém os faça convergir produzindo um resultado novo e inesperado. Ambos planos ou universos deixam de constituir mundos com uma lógica própria, separados e não associados e a inédita convergência produz uma mudança igualmente inédita na percepção de fatos que começam a ser percebidos e reorganizados segundo a nova lógica, produto de transferência metafórica ou bissociação, podendo inclusive, literalmente, inaugurar novos fatos (PALMA, 2015a, p. 137).

A ideia de bissociação contém um conjunto de noções e conceitos cunhados por Koestler que merecem um detalhamento mais profundo, tendo em vista nossos propósitos. A bissociação consiste em um processo de criação, o qual Koestler considera como a unidade básica e comum “subjacente a descoberta científica, originalidade artística e inspiração cômica” (KOESTLER, 2014, p. 21).

A teoria para o ato da criação que A. Koestler propõe em sua obra tem seus contornos primeiramente delineados em *Insight and Outlook – an inquiry into the common foundations of science, art and social ethics*, obra publicada em 1949, na qual lança as bases da teoria. Passado mais de uma década, o autor publica *The Act of Creation*, este sim um volumoso tratado sobre os processos criativos humanos.

Inicialmente iremos nos ater aos aspectos conceituais do processo da bissociação proposto por A. Koestler, segundo as bases conceituais apresentadas na segunda obra – a mais completa. Enfatizamos que trata-se de um conceito que é central na teoria de Koestler, tomado por H. Palma como elemento basilar para sua hipótese da ME.

Segundo Koestler (2014) a comparação cômica (humor), a analogia objetiva (descoberta) e a percepção poética (arte) tem em suas bases uma unidade fundamental comum, um padrão criativo unificador. Tal elemento básico consiste na junção de dois universos de ideias, cada qual com lógicas de pensamento próprias, que em um dado momento se interseccionam, possibilitando uma percepção segundo uma perspectiva inédita.

Em sua obra, Koestler (2014) emprega exemplos para ilustrar suas ideias e conceitos, usando analogias geométricas (planos, linhas e pontos) para explicar a bissociação. Evitaremos o uso de tais analogias; ao contrário, iremos sugerir outras, as quais julgamos mais apropriadas. Por certo empregaremos exemplos, mas não os mesmos utilizados pelo autor. No Quadro 1 apresentamos os conceitos fundamentais relacionados ao processo de bissociação.

Iremos considerar os conceitos relacionados ao processo de bissociação no âmbito científico e buscaremos ilustrá-los a partir de um exemplo elementar no campo da Física.

Consideremos o problema referente à queda livre de um corpo, onde deseja-se encontrar a velocidade com a qual o mesmo, sendo abandonado de uma certa altura, teria no instante imediatamente anterior ao tocar o solo. A solução deste tipo de problema mobiliza elementos (teorias, leis, conceitos, equações) pertencentes ao âmbito da mecânica. A solução do problema se dará, portanto, no plano conceitual da mecânica, governado por um corpo lógico conceitual bem definido e cientificamente estabelecido.

Quadro 1 - Conceitos relacionados ao processo de bissociação.

Conceito	Descrição
Matriz de pensamento e comportamento	Corresponde ao conjunto de hábitos, ideias, pensamentos e práticas, aceitos como válidos e permitidos no interior de um dado campo científico.
Estratégia	Meios de aplicação da matriz de pensamento e comportamento.
Membros da matriz	Conjunto de técnicas, teorias, leis, teoremas, conceitos, equações, etc., que compõem uma matriz de pensamento.
Código	Sistema lógico formal válido no interior de uma matriz de pensamento.

Fonte: elaborado pelo próprio autor. Em 28/04/2020.

Há diferentes maneiras de articular a solução para o problema sugerido. O caminho que leva do problema à sua solução é denominado por A. Koestler de *estratégia*. Recolocando, diremos que há diferentes *estratégias* para a solução do problema, por exemplo, empregando a segunda lei do movimento de Newton ou a conservação de energia, mas cada uma delas é posta em uso de acordo com um conjunto de práticas, hábitos e habilidades estabelecidas, configuradas segundo uma *matriz de pensamento e comportamento*. Há aqui uma sutileza importante a ser considerada. Embora a mecânica possa, em princípio, ser compreendida como uma matriz de pensamento e comportamento, incluindo-se aí, tanto as leis de Newton quanto o princípio de conservação da energia, devemos considerar que estas duas construções teóricas pertencem a diferentes estágios do desenvolvimento da mecânica clássica e incorporam, inclusive, diferentes formalismos e concepções à respeito do movimento de um corpo no espaço, que vão desde Newton no século XVII, até os desenvolvedores da mecânica analítica nos séculos XVIII e XIX (SITKO, 2019; ZANETIC, 1988).

De todo modo, qualquer que seja a estratégia empregada, a mesma irá mobilizar determinados conceitos articulados por leis e equações, alguns em comum (massa, velocidade, altura) e outros específicos à cada *estratégia* (segunda lei do movimento de

Newton, princípio da conservação da energia mecânica, energia, força), os quais constituem os *membros* de cada matriz. O uso dos membros de uma matriz, mobilizados por alguma estratégia que busca a solução de um problema obedece a um *código* rígido, a lógica vigente no interior da matriz em questão.

Poderíamos pensar em um problema mais complexo, como o de obter a força de arrasto exercida por um monte de areia sobre o qual o corpo do problema anteriormente proposto viesse a cair. Uma solução possível envolveria o uso dos conceitos de energia e força para compor uma nova estratégia, articulando assim os elementos das diferentes estratégias primeiramente apontadas. O que ocorre, então, é uma associação, já que nenhuma das duas estratégia depende da outra para solucionar o problema em questão.

No entanto, algo diferente ocorre quando Maxwell, em sua primeira publicação sobre o eletromagnetismo (MAXWELL, 1890), busca uma abordagem teórica alternativa para descrever certos fenômenos elétricos e magnéticos, buscando, por exemplo, estabelecer uma estrutura matemática para os conceitos de linha de força e de estado eletrônico propostos por Faraday (ABRANTES, 1988). Em sua primeira publicação, Maxwell faz uso explícito da analogia, preocupando-se, inclusive, em fundamentar tal prática metodológica (MAXWELL, 1856), procurando ressaltar semelhanças matemáticas, mas não necessariamente fenomenológicas, entre a dinâmica dos fluidos e os fenômenos elétricos e magnéticos (ABRANTES, 1988). No emprego de suas analogias, Maxwell relaciona dois domínios conceituais distintos até então não relacionados. Assim, em um dado momento histórico, a hidrodinâmica consistiu de uma matriz e a eletricidade e magnetismo, outra completamente diferente. Cada uma delas possuía seus membros, seu código, estratégias e associações internas. Havia, portanto, “dois planos ou universos de discurso ordinariamente separados” (PALMA, 2015b, p. 137). A elaboração de uma estratégia que, em um dado momento histórico, tenha articulado conjuntamente as duas estratégias pertencentes a diferentes matrizes gerou não uma associação, mas uma *bissociação*, dando origem a algo inteiramente novo e que pode ser inicialmente duvidoso ou questionável.

Considerando os conceitos fundamentais do processo de *bissociação* que acabamos de expor, poderíamos assim colocar: para uma determinada atividade científica, uma matriz consiste em um modo de pensar e agir, um conjunto de hábitos e práticas regulados por um código a ser seguido; no interior de cada matriz há um conjunto de membros (teorias, leis, teoremas, princípios, conceitos, equações) os quais podem ser empregados para estabelecer estratégias, comuns ou inovadoras, para resolver problemas; a assimilação de uma matriz científica se dá pelo aprendizado.

2.4.2 Considerações epistêmicas sobre a bissociação

Pretendemos agora fazer algumas considerações de cunho epistêmico acerca dos processos de bissociação. Há ao menos um importante motivo que nos obriga a fazê-lo. Como já mencionado, a bissociação é um dos elementos basilares da hipótese da ME e esta, tal como proposta, vem apontar o papel epistêmico do fenômeno metafórico. Espera-se, portanto, que haja coerência entre estes conceitos, ou seja, que haja alinhamento epistêmico entre a ideia de bissociação e a noção de ME.

Salientamos, no entanto, que nossas inferências serão de cunho assertivo, pois uma análise comparativa mais pormenorizada entre as ideias de A. Koestler e uma ou mais concepções epistêmicas estaria além do escopo de nossa proposta.

A teoria proposta por Koestler circunscreve-se no âmbito da psicologia (KOESTLER, 2014). Embora não seja um especialista nesta área, Koestler é um crítico da escola vigente à época, o behaviorismo. O autor apoia-se em uma formação científica obtida na Universidade de Viena, visitou diferentes centros de ensino e pesquisa sobre psicologia, adquiriu amplo conhecimento sobre a literatura relevante ao estudo proposto e construiu relações de amizade com notáveis pesquisadores no ramo da Física e da Neurologia (KOESTLER, 2014).

Em 1959 Koestler publica uma obra intitulada *The Sleepwalkers: A History of Man's Changing Vision of the Universe*⁶, na qual apresenta uma análise de como a visão do homem em relação ao Universo se modificou ao longo do tempo, cobrindo um vasto período histórico, que se incia nos Jônios (século XII a. C) e se estende até a síntese newtoniana (século XVII d. C), apoiando-se em vários escritos originais e em renomados historiadores. Dessa forma, apropria-se de um amplo conhecimento sobre a história da astronomia e da mecânica (KOESTLER, 1989).

Parte da metodologia empregada por Koestler consiste em fundamentar suas ideias e conceitos evidenciando-os através de episódios históricos. Na seção de sua obra destinada ao ato criativo da descoberta científica encontramos diversas passagens que revelam fragmentos e especulações epistêmicas, as quais se alinham com algumas concepções muito familiares à epistemologia kuhniana. Salientamos que embora a obra de Thomas Kuhn (1922-1996) – *A Estrutura das Revoluções Científicas* – tenha sido publicada em 1962, portanto 2 anos antes da obra de A. Koestler, não há nesta qualquer referência aos escritos de T. Kuhn.

6 A obra foi traduzida para o português e publicada no Brasil sob o título *O Homem e o Universo: como a concepção do Universo se modificou através dos tempos* (KOESTLER, 1989).

Passemos, então, aos apontamentos epistêmicos relacionados ao processo de *bissociação* no âmbito científico. Segundo Koestler (2014), o exercício das práticas e hábitos no interior de uma matriz ocorre mediante um duplo controle. De um lado, aquele exercido pelo código de regras rígido; do outro, pelo uso de estratégias flexíveis. Em uma matriz de âmbito científico o código de regras corresponde ao conjunto de teorias, leis, teoremas, princípios, conceitos e equações. A rigidez consiste nas relações lógicas que conferem coerência interna à matriz. As estratégias consistem em todas as possibilidades de aplicação do código que rege a matriz. É pelo uso de estratégias que os cientistas encontram soluções para os problemas pertinentes à matriz. A flexibilidade consiste na possibilidade de elaboração de novas estratégias, ou seja, na solução de novos problemas, os quais passam a fazer parte de uma matriz determinada. No interior de uma matriz, o código controla o que pode e o que não pode ser realizado; nas palavras de Koestler (2014, p. 42), “o código é um persuasor invisível” e o mesmo precisa ser assimilado, aprendido.

O uso do termo *código* está envolto em certa ambiguidade proposital, segundo o autor (KOESTLER, 2014), uma vez que pretende estabelecer que o controle se estende desde as práticas especializadas (apreensíveis), até o funcionamento neurológico e o código genético. O funcionamento neurológico, presente em todos os indivíduos, controla a percepção em seu nível mais fundamental.

Os estímulos que afetam os sentidos fornecem apenas a matéria-prima de nossa experiência consciente [...]; antes de atingir a consciência, a entrada é filtrada, processada, distorcida, interpretada e reorganizada em uma série de estações de retransmissão, em várias camadas do sistema nervoso; mas o próprio processamento não é experimentado pela pessoa, e as regras do jogo segundo as quais os controles funcionam são desconhecidas para ele. [...] Uma maçã parece diferente para Picasso e para o verdureiro porque suas matrizes visuais são diferentes (KOESTLER, 2014, p. 43).

Embora possa não ser sua intenção, notamos que Koestler assume uma posição epistêmica da não neutralidade do sujeito no âmbito da percepção. Por outro lado, para este autor a não neutralidade do sujeito permeia também os melindres da observação experimental:

Desde os dias da Grécia até o presente, a história ecoa com o som e a fúria de controvérsias apaixonadas. Esse fato em si mesmo é prova suficiente de que o mesmo “conjunto de dados” e até o mesmo “experimento crucial” podem ser

interpretados de mais de uma maneira (KOESTLER, 2014, p. 240, grifos do autor).

Diferentes episódios de controvérsia são apontados – sobre o novo sistema Copernicano do sistema solar; sobre a natureza dos cometas segundo Galileu e o padre jesuíta Sarsi; Newton e Huyghens acerca da natureza corpuscular da luz; entre Kekulé e Van't Hoff sobre a estrutura das moléculas orgânicas – incluindo uma das mais memoráveis no séc. XX acerca do caráter determinista ou indeterminista da mecânica quântica (KOESTLER, 2014). Ainda sobre os experimentos, irá afirmar que eles não devem ser tomados como veredictos finais, nem à favor nem contra uma teoria.

[...] um físico não deve permitir que sua convicção subjetiva de que ele está no caminho certo seja abalada por dados experimentais contrários. E vice-versa, sua aparente confirmação por dados experimentais não prova necessariamente que uma teoria esteja certa (KOESTLER, 2014, p. 245).

A iniciação de um indivíduo em um determinado ramo científico obriga-o ao aprendizado de uma ou mais matrizes, da mais geral à mais especializada. O domínio do código, a criação de estratégias, em suma a apropriação de teorias, leis, teoremas, conceitos e equações, bem como seu emprego e articulação na solução de problemas, implica na aquisição de hábito. Embora estejam envolvidos graus de flexibilidade variados, hábitos estabelecidos em um ambiente monótono, sob condições relativamente similares “tendem a se tornar rígidos e automatizados” (KOESTLER, 2014, p. 44).

Embora a aquisição de hábitos seja necessária, com o tempo pensamentos restritos a uma única matriz irão apresentar limitações óbvias, afinal, as estratégias são flexíveis, mas o código é rígido. Assim, hábitos e práticas inerentes a uma matriz específica tendem a se tornar mais ou menos automatizadas. Segundo Koestler (2014), há dois modos de escapar destas rotinas automatizadas. Um deles ocorre durante os sonhos, ou estados similares, nos quais o raciocínio lógico é suspenso. O outro ocorre em um estado onde o raciocínio lógico mantém-se ativo. Tal estado:

[...] é sinalizado pelo flash espontâneo de insight, que mostra uma situação ou evento familiar sob uma nova luz e provoca uma nova resposta a ele. O ato bissociativo conecta matrizes anteriormente desconectadas da experiência

(KOESTLER, 2014, p. 45).

O processo bissociativo, portanto, é fruto de um insight e resulta na conexão de duas matrizes, com estruturas lógicas internas não necessariamente compatíveis, cujos hábitos, práticas e códigos vigentes no interior de cada uma delas, impedia a percepção de uma possível articulação mútua. Com a suspensão momentaneamente das regras do jogo durante um insight, o processo bissociativo de duas matrizes promove “sua *fusão* em uma nova síntese intelectual” (KOESTLER, 2014, p. 45, grifo do autor).

Por outro lado, a síntese bissociativa é mais propensa ao êxito da descoberta científica “quanto mais firmemente estabelecido e bem exercitada é cada uma das [matrizes] ainda separadas”, sujeitas ao “amadurecimento de uma cultura para fazer e explorar uma nova descoberta” (KOESTLER, 2014, p. 108–109). Assim, a importância atribuída por A. Koestler ao contexto histórico cultural é evidente, bem como a sua percepção da necessidade de se ter um quadro teórico conceitual – as matrizes de pensamento e comportamento – firmemente estabelecidas.

Cabe ressaltar que a fusão de matrizes pode ocorrer em diferentes níveis de complexidade e abrangência. Além disso, os níveis de alcance a complexidade dos processos de bissociação refletem diretamente no alcance e complexidade de uma ME. Uma categorização preliminar é sugerida por Palma (PALMA, 2015a) – posteriormente iremos detalhá-la. Ainda sobre a fusão ou síntese intelectual, A. Koestler afirma:

E quando duas matrizes se integram, elas não podem mais ser fragmentadas. É por isso que as descobertas de ontem são os lugares-comuns de hoje, e por que sempre nos maravilhemos com o quão estúpidos éramos em não ver que o *pós factum* parece ser tão óbvio (KOESTLER, 2014, p. 105).

A obviedade do novo quadro, a impossibilidade de reverter a junção das matrizes não indica outra coisa senão a *literalização* da ME, ou seja, a naturalização da nova ideia, inicialmente absurda, apontada por Palma (PALMA, 2015a, p. 33). A consolidação do novo quadro estará inevitavelmente sujeita aos sistemas de controle e validação do referido campo científico, a respeito do qual voltaremos a falar mais adiante. Notemos, portanto, que o papel inventivo desempenhado pelo sujeito durante os processos bissociativos é livre e instantaneamente irracional, mas o fruto deste processo estará sujeito aos critérios de

validação inerentes ao campo científico em questão, onde impera, dentre outros critérios de valor, a racionalidade.

A descoberta científica é classificada por A. Koestler (2014) como emocionalmente neutra. Isto não implica, contudo, que a atividade científica seja apática. O que está em jogo é uma “mistura bem equilibrada e sublimada” (KOESTLER, 2014, p. 87) de curiosidade intelectual, ambição, competição e vaidade que precisam ser contidas, afinal não é possível obter satisfação de uma atividade cujos momentos de regozijo decorrem de um processo lento e paciente, tendo em vista que “especulações inebriantes sobre os mistérios da natureza devem ser submetidas aos rigores da verificação objetiva” (KOESTLER, 2014, p. 87). Percebemos, portanto, que as interações sociais estão presentes e além disso, a verificação objetiva exerce uma função de controle.

Sobre os ciclos de conhecimento que ocorrem no campo científico, A. Koestler manifesta-se da seguinte maneira:

Os avanços coletivos da ciência como um todo, e de cada um de seus ramos especializados, mostram a mesma alternância entre erupções relativamente breves que levam à conquista de novas fronteiras e a longos períodos de consolidação. No caso do indivíduo, essa tarefa prolongada tem seus limites naturais em três anos e dez anos ou mais; mas, no cenário histórico, a assimilação, consolidação, interpretação e elaboração de uma descoberta revolucionária podem continuar por gerações e até séculos. O novo território aberto pelo avanço impetuoso de alguns gênios, atuando como um líder, é subsequentemente ocupado pelas falanges sólidas da mediocridade; e logo a revolução se transforma em uma nova ortodoxia, com seus inevitáveis sintomas de unilateralidade, superespecialização, perda de contato com outras províncias do conhecimento e, por fim, distanciamento da realidade. Vemos isso acontecendo - inevitavelmente, ao que parece - em vários momentos da história de várias ciências. A ortodoxia emergente endurece-se em um “sistema fechado” de pensamento, pouco disposto ou incapaz de assimilar novos dados empíricos ou de se ajustar a mudanças significativas em outros campos do conhecimento; mais cedo ou mais tarde a matriz é bloqueada, surge uma nova crise que leva a uma nova síntese e o ciclo recomeça (KOESTLER, 2014, p. 225–226, grifos do autor).

Como observado, para este autor o progresso da ciência não é gradual nem contínuo, mas descontínuo. Tampouco é formado por descobertas individuais; do contrário, por “episódios da evolução das matrizes coletivas da ciência” (KOESTLER, 2014, p. 227).

Consideramos que a exposição realizada nesta subseção é suficiente para evidenciar que a teoria proposta por Koestler incorpora aspectos epistêmicos, dentre os quais o progresso irregular e não cumulativo do conhecimento, a não neutralidade do sujeito, a importância do contexto histórico cultural, a subjetividade na interpretação dos dados experimentais e

consequente incapacidade de fornecer um veredito definitivo e pontual, por um lado a presença de um fator de irracionalidade inventiva em nível individual, por outro um fator de racionalidade assegurada por uma matriz de comportamento rígida em nível coletivo, logicamente coerente e rigorosa – racional, portanto.

É de fundamental importância deixar claro que a irracionalidade aqui considerada não significa a ausência de um pensamento racional, mas ao contrário, a presença de dois sistemas de pensamento racionais que até então eram logicamente incompatíveis.

2.4.3 O processo de literalização de uma Metáfora Epistêmica

A bissociação sincrônica exprime, como vimos, o ato inaugural de uma ME. Sincrônico por se tratar de um fato histórico, temporalmente localizado, um marco temporal. Mas, além de haver uma história em curso, da qual o surgimento de uma ME passa a fazer parte, há também uma historicidade estrutural, uma história própria, interna, que as diferencia “radical e definitivamente, agora sim, de suas primas distantes, as metáforas literárias e retóricas” (PALMA, 2015a, p. 33).

A historicidade estrutural a que Palma se refere diz respeito ao processo que se inicia após a bissociação, quando então a novidade conceitual é submetida aos critérios de validação, à racionalidade científica – o escrutínio científico. Uma vez exitosa, com o passar do tempo, e mediante a aprovação da comunidade na qual foi proposta, a nova ideia passa a ser vista como uma obviedade; neste estágio, os traços metafóricos já não são percebidos, e neste sentido, o novo conhecimento já se apresenta com uma significação estável – a metáfora epistêmica, agora literalizada (PALMA, 2015a). Assim, após a bissociação que lhe originou, a ME inicia o processo de literalização ou lexicalização:

[...] quando lexicalizada ou literalizada, a metáfora deixa de ser uma metáfora viva para ser uma metáfora morta. [...] a grande diferença (que extrai outras diferenças importantes) entre uma metáfora literária e uma metáfora científica é que ela esconde, oculta ou esquece sua origem, enquanto a primeira a exhibe como sua grande triunfo, sua razão de ser e seu privilégio cultural (PALMA, 2015a, p. 33).

O processo de lexicalização ou literalização de uma metáfora, ou seja, sua passagem

de metáfora viva a metáfora morta foi teorizado pelo filósofo australiano Colin Murrey Turbayne (1916 – 2006) em sua obra *The myth of metaphor*, publicada em 1962.

Um dos pontos centrais da tese deste autor é o de que as metáforas tendem, com o passar do tempo, a serem tomadas em um sentido literal, ou seja, elas “raras vezes se revelam a si mesmas” (TURBAYNE, 1974, p. 8). Mas esta afirmação contém importantes pressupostos e implicações que não são auto evidentes e portanto, necessitam de maiores esclarecimentos.

É útil, neste momento, esclarecer o que este autor assume como sendo uma metáfora. Ele parte do conceito aristotélico, mas o estende. Segundo Turbayne (1974) o conceito de Aristóteles diz respeito a transferência do *nome* de uma coisa à outra, a qual o nome não pertence. Nesta concepção, o autor assume que *nome* faz referência aos elementos textuais convencionais, como um nome próprio, uma oração, etc., e desta forma o fenômeno metafórico se restringe apenas aos fatos da linguagem. Assim considerada, a noção aristotélica não é suficiente para atender aos propósitos de Turbayne. Irá sugerir, então, que o alcance do fenômeno metafórico seja estendido para todos os signos:

[...] sem alargar indevidamente o significado da definição de Aristóteles, interpreto seu *nome* como designando um signo ou conjunto de signos. Isso permitirá que os artistas que *falam* com tinta ou argila *falem* em metáforas. Também permitirá que os modelos físicos específicos de especialistas em ciências aplicadas sejam classificados [...] como metáforas (TURBAYNE, 1974, p. 25, grifo do autor).

Notadamente, a argumentação do autor abrange uma grande variedade de elementos metafóricos, incluindo signos empregados nas linguagens próprias das ciências. Em suma, o objeto metafórico a que Turbayne está se referindo é amplo, incluindo não apenas nomes (palavras, orações, etc.), mas também uma grande variedade de signos, abrangendo campos com a arte e as ciências. Tal pluralidade é extensível ao conceito de ME, o qual admitirá uma ampla gama de objetos metafóricos, tais como “conceitos, teorias, noções, etc.” (PALMA, 2015a, p. 41). Embora não sejam explicitamente consideradas, o papel das relações matemáticas é indispensável à elaboração de conceitos e teorias em determinados campos de conhecimento, e também estes signos podem ser objeto da ME.

Se por um lado Turbayne amplia o alcance da metáfora aristotélica, incluindo todos os tipos de signos, por outro ele o restringe, removendo as situações onde um signo seria empregado em sentido figurado. O autor alega que dentre os possíveis sentidos que um termo

possa ter, a nenhum deles pode-se atribuir o monopólio do sentido literal (TURBAYNE, 1974). Para o autor, portanto, o *tropo* – uso de uma palavra em sentido figurado – não necessariamente caracteriza uma metáfora. No entanto, todos os diferentes tipos de tropo – metonímia, sinédoque e catacrese – são metáforas em potencial:

Qualquer tropo pode alcançar o status completo de metáfora, mas somente se quem o usa fundir os dois sentidos, fingindo que há apenas um sentido. Assim, para o homem comum, pode não haver metáfora para a *substância* de Aristóteles, na *máquina da natureza* de Descartes, na *força* e na *atração* newtoniana, na *energia cinética* de Thomas Young, e na figura *Leda* de Michelangelo. Localizados em seus contextos habituais, esses tropos apenas apresentam ao homem comum a face da verdade literal. Mas, para iniciados que estão alertas aos sentidos *originais* e aos hoje literais, elas podem se tornar metáforas. Não há metáforas *per se* (TURBAYNE, 1974, p. 31–32).

Destacamos nesta passagem, uma importante consideração sobre o processo metafórico: não existem metáforas *per se*. O homem não especializado, alheio aos estudos aristotélicos, não pode compreender o significado de *substância* no contexto do pensamento aristotélico. A ele resta aplicar o sentido literal de que dispõem, relativo a algum outro contexto – certamente não o do pensamento aristotélico. Por outro lado, ao iniciado, ou seja, aquele que conhece o contexto do pensamento aristotélico, o significado é outro, porém igualmente literal – já estabilizado. Há, portanto, dois sentidos literais, mas também dois contextos de significação. Tanto o homem não especializado quanto o homem iniciado dispõem de um significado literal para o termo *substância*, mas somente o homem iniciado pode perceber a metáfora, desde que possa transitar pelos dois contextos, o especializado e o não especializado. Poderíamos então perguntar: como o novo significado constitui-se em um novo contexto? Vejamos.

De acordo com Turbayne (1974), o primeiro momento de uma metáfora consiste na percepção de uma inadequação; deve-se ao emprego de um signo com um sentido diferente do habitual, um cruzamento de espécies. Aquele que não é um iniciado em Descartes e ouve pela primeira vez que *o homem é uma máquina* percebe de súbito uma inadequação, pois a relação homem/máquina é contra o convencional. Mas tão logo se percebe aspectos em comum – um complexo sistema com partes internas, por exemplo – tem-se uma nova percepção, a do corpo humano visto *como se* fosse uma máquina. Havendo êxito nesta percepção, começa a emergir um novo conceito, o de homem-máquina – o cruzamento de espécies – e a metáfora entra, assim, na segunda etapa de sua vida: o êxito. Nas palavras de

Turbayne:

[...] como essa afirmação e negação produzem a necessária dualidade de significado, a metáfora eficaz entra rapidamente no segundo estágio de sua vida; o que antes era um nome inadequado se torna uma metáfora. Atinge seu momento de triunfo. Aceitamos a metáfora ao concordar com o artifício. Este é o estágio em que [...] usamos uma metáfora para a consciência, para iluminar fatos obscuros ou anteriormente ocultos. Nesta fase, por ser nova, a metáfora dificilmente engana ninguém (TURBAYNE, 1974, p. 39).

Uma vez que tenha viabilizado uma nova percepção, com o passar do tempo o termo homem-máquina terá seu significado estabilizado e aos poucos se constituirá como um novo sentido para o termo *homem*, um novo literal válido, mas agora em um novo contexto, sobretudo aos iniciantes na doutrina cartesiana. Segue-se daí o último estágio, o qual irá torná-la imperceptível:

O momento em que a metáfora é inadequada e o momento de seu triunfo são breves comparado ao período infinitamente longo em que a metáfora é aceita como um lugar comum. Os dois últimos estágios às vezes são vistos como uma transição de uma metáfora *viva* para uma *moribunda* ou *morta*. Mas é melhor dizer, ou que a metáfora naquele momento está oculta, ou que há deixado de sê-lo. Nesse longo período, a metáfora original pode se desenvolver em diversas formas; mas é apenas em uma destas formas que a metáfora pode ser considerada literalmente (TURBAYNE, 1974, p. 39).

O processo de ocultação da metáfora, a percepção primeira de uma inadequação seguida de um beneplácito interpretativo que por fim se vê exitoso, inaugura um novo sentido em um novo contexto e então torna-se aceito neste novo contexto. Este processo corresponde ao processo de literalização de uma ME, adotado por Palma (2015a). A literalização de uma ME, portanto, corresponde a um processo de validação da novidade conceitual inaugurada pela bissociação que originou a referida ME.

Apesar da diversidade de signos possíveis no processo metafórico que Palma está considerando, a ausência da dualidade literal/metafórico conduz à algumas considerações a partir das quais busca indicar de que modo a hipótese da ME se localiza no debate filosófico sobre as relações entre linguagem, realidade e verdade e também sobre os modelos científicos.

Como já indicamos anteriormente, de acordo com Palma (2015a), tanto a ciência

quanto a filosofia da ciência, consentiram às metáforas funções didáticas e heurísticas, reconhecendo assim sua utilidade, mas também atribuíram-lhe um caráter totalmente prescindível. Tal posicionamento pautava-se na premissa de que as metáforas seriam afirmações logicamente falsas, e portanto não poderiam ser empregadas como forma de expressão dos enunciados científicos. No entanto, para o autor, ao assumir um papel constitutivo das ME na produção do conhecimento científico, “o problema da verdade e da falsidade dos enunciados metafóricos adquire uma nova dimensão” (cf. PALMA, 2015a, p. 34). Neste sentido, ao considerar-se que a ME adquire, no decorrer de sua historicidade interna, a estabilidade de seu significado – sua literalização – a ME é então percebida como uma expressão com um único sentido, este negociado e aceito no interior da comunidade onde circula. Assim, o apagamento dos traços metafóricos da ME “faz com que o problema da metáfora se dissolva no da linguagem em geral” (PALMA, 2015a, p. 34) e desse modo, a “linguagem que surgiu como subsidiária tem que dar conta sozinha de sua referência, e neste caso sua origem é irrelevante, seja ela desviante, figurativa ou enviesada” (PALMA, 2015a, p. 35). Assim, de acordo com o autor:

Com efeito, para as teses reducionistas ou, como chamou Black, substitutivas da metáfora, trata-se de estabelecer o original que a metáfora está substituindo e esse enunciado será aquele que tem referência enquanto a metáfora será sempre um enunciado falso em termos descritivos. Mas aqui defendo uma tese que poderíamos chamar de *emergentista*, segundo a qual o enunciado metafórico introduz uma novidade irreduzível e, portanto, intraduzível, tem sua própria aspiração à sua referência e reinicia novamente o problema da verdade e da referência, mas não subsidiariamente, mas da mesma forma que com qualquer outra instrução. O problema do significado e da referência das ME seria, em qualquer caso, exatamente o mesmo problema da linguagem científica comum e a questão seria então reduzida ao problema não resolvido da relação da linguagem com o mundo, sem mais (PALMA, 2015a, p. 35, grifo do autor).

Por outro lado, para o autor, o problema da relação entre a ME e a realidade pode ser tratado de modo mais produtivo a partir do ponto de vista representacionista: “as ME representam setores da realidade e não os descrevem linguisticamente” (PALMA, 2015a, p. 36). Portanto, para o autor, no que diz respeito ao conceito de ME, a questão das relações entre linguagem e realidade a partir de concepções linguísticas seria menos apropriado. Do contrário, Palma considera mais profícuo redefinir a relação entre linguagem metafórica (ME) e realidade em termos de um ponto de vista representacionista. A visão representacionista do conhecimento é relativamente extensa; mais contemporaneamente, inclui os estudos – no

âmbito da filosofia da ciência – de van Fraassen, Mundi, Giere, e as então denominadas concepções semânticas (cf. PALMA, 2015a).

De acordo com Palma, várias teses representacionistas e relacionadas às concepções semânticas aplicam-se, ainda que restritivamente, à ME.

[1] A representação não é apenas mais um aspecto, constituinte da dimensão psicológica ou sociológica humana, mas uma de suas condições determinantes; [2] A visão representacionista concebe o conhecimento científico como uma representação mais refinada do que a do conhecimento corrente, em que um determinado aparato conceitual representativo é aplicado com sucesso a um conjunto de determinados âmbitos empíricos; [3] Se trata de uma representação objetiva, diferente da representação mental como um mero produto subjetivo, psicológico e individual. A objetividade científica surge da própria prática e de sua aceitabilidade coletiva; [4] Não estamos falando aqui de uma representação verdadeira, mas de uma representação adequada em seu objetivo de representar um determinado domínio fenomênico ou empírico. É mantida uma concepção pragmática do conhecimento científico que estabelece como e em que condições certas estruturas conceituais podem ser usadas para explicar processos e fenômenos contingentes do mundo empírico. Da mesma forma, é uma representação intencional, ou seja, é sempre uma representação para um sujeito (social) que é regido pelos padrões da comunidade científica, histórica e dinamicamente configurados (PALMA, 2015a, p. 36).

Segundo Dutra (2013), o conceito de modelo é polissêmico e o debate filosófico que o contempla, no qual Palma procura localizar a hipótese da ME, constitui um amplo campo de discussão, com diferentes enfoques e múltiplas contribuições, sobretudo não consensuais. De acordo com Arenhart e Moraes (2011), na filosofia da ciência, a abordagem semântica surge em oposição à abordagem sintática, esta defendida por filósofos do empirismo lógico, pertencentes ao Círculo de Viena e ao Círculo de Berlim. Dentre as críticas levantadas contra esta abordagem estavam a sua aparente artificialidade e a sua dificuldade em lidar com diferentes formulações de uma mesma teoria, que, segundo esta abordagem, deveriam ser consideradas como diferentes teorias – cita-se, aqui, as formulações equivalentes de Heisenberg e Schrödinger para a Mecânica Quântica não relativística de meados dos anos de 1920. Em oposição a este modo de ver as teorias científicas, a abordagem semântica surge por volta dos anos de 1950, considerando em suas bases conceituais a ideia de modelos, conduzindo à novas questões acerca do que seriam os modelos (ARENHART; MORAES, 2011), derivando daí as investigações filosóficas que põem estes objetos no centro das discussões, onde localizam-se os trabalhos seminais de Black (1962) e Hasse (1966).

Por fim, salientamos que as considerações apresentadas no parágrafo anterior tem por

objetivo apenas indicar algumas possíveis conexões entre o conceito da ME e os estudos filosóficos sobre modelos, destacando, todavia, que uma discussão aprofundada, em âmbito filosófico e sobre como a ME se localiza neste cenário, estaria além da proposta de nossa investigação.

2.5 NÍVEIS E LIMITES DAS METÁFORAS EPISTÊMICAS

Até aqui apresentamos as bases conceituais que estruturam a noção de ME, conforme Palma (PALMA, 2009, 2015a), seu propositor. Passaremos agora a apresentar algumas considerações sobre os diferentes níveis que as ME podem assumir – os grandes sistemas de pensamentos, como é o caso do mecanicismo no séc. XVII e do evolucionismo no séc. XIX, e interações entre teorias consolidadas em diferentes âmbitos de conhecimento, como a introdução de conceitos da mecânica clássica na economia ou de conceitos evolucionistas na sociologia (PALMA, 2015a). Apresentaremos, também, algumas considerações acerca do alcance, ou seja, dos limites de validade de uma ME, bem como sobre os critérios envolvidos no estabelecimento destes limites de validade.

Nossa intenção não é apresentar uma análise profunda ou mesmo detalhada acerca dos diferentes níveis em relação aos quais as ME poderiam ser categorizadas. Segundo Palma (2015a), as ME não constituem um padrão rigidamente estabelecido, tampouco são facilmente identificáveis e desse modo uma taxonomia inicial, mas de modo algum definitiva, pode ser útil.

Começemos por considerar os limites de validade de uma ME. Independentemente de seu nível, um fator comum a todas elas é estarem sujeitas ao escrutínio, ou seja, devem satisfazer aos critérios estabelecidos pelas comunidades nas quais circulam. Nas palavras de Palma:

[...] ultrapassar o limiar de requisitos da comunidade científica ocorrerá na medida em que suas diretrizes de avaliação e aceitabilidade sejam respeitadas. Uma má metáfora científica não será capaz de responder aos padrões de avaliação exigidos, pelo menos não por muito tempo, e será abandonada (PALMA, 2015b, p. 45).

De acordo com autor, boa parte dos episódios científicos poderia ser considerado como o conjunto de decisões de aceitação ou rechaço de ME, tomadas por uma comunidade científica em resposta aos problemas e perguntas que derivam de um quadro empírico estabelecido, denominado por *experiência disponível*. Tais decisões apoiam-se no conjunto de teorias, conceitos e explicações, que embora apresentam certa margem de convencionalidade, posto que são válidos em um dado tempo e lugar, são racionais e objetivas porque “respondem à pautas e critérios que essa comunidade científica vem elaborando intersubjetivamente ao longo do tempo” (PALMA, 2015a, p. 45). Essas decisões carregam os compromissos cognitivo epistêmicos da comunidade em questão, já que com elas “se pretende descrever/explicar/compreender/predizer o mundo” (PALMA, 2015a, p. 45) e isto corresponde a uma característica específica do conhecimento científico quando comparado a outras formas de conhecimento. Desse modo:

O que se elege ou seleciona são ME que através do processo que se denominou de bissociação sincrônica/lexicalização diacrônica conferem à experiência disponível novas configurações. A *experiência disponível* inclui o que em um dado momento determinado se considera evidência empírica, que é um conjunto cujos limites não são definitivos nem claros; se trata, em suma, de uma base empírica relevante que se enriquece e reconfigura mediante novas ME (PALMA, 2015a, p. 45, grifo do autor).

Nesta passagem destacamos dois aspectos. O primeiro diz respeito ao qualificador *disponível*, por meio do qual o autor pretende expressar não apenas as limitações humanas ou técnicas, afinal estas são superáveis, mas também as limitações impostas por critérios inerentes à atividade científica. De acordo com Palma a experiência disponível é limitada, predominantemente:

[...] pela configuração, imanente à comunidade e aos discursos científicos atuais sobre o que é considerado um *fato científico* e suas condições. Os fatos científicos não estão lá sempre disponíveis para serem detectados, senão que surgem de uma construção histórica cujo ato fundamental é incluí-los sob esse estatuto (PALMA, 2015a, p. 46, grifo do autor).

O segundo aspecto que pretendemos destacar diz respeito ao enriquecimento e reconfiguração da base empírica mediante novas ME. Como dito, os fatos científicos são

construções historicamente estabelecidas, ou seja, são concebidos e interpretados à luz do quadro teórico conceitual disponível. Contudo, mediante as limitações deste quadro, serão as inovações conceituais carreadas pela ME que permitiram reinterpretações da uma dada base empírica, e assim enriquecendo e reconfigurando⁷ o quadro teórico conceitual.

De acordo com Palma (2015a), os tipos de ME não são categorias rígidas nem a priori, sob as quais seja possível enquadrar os processos históricos da ciência, bem como não são categorias claramente identificáveis, uma vez que podem assumir variadas formas ou níveis. Mediante a dificuldade em estabelecer uma categorização geral para os diferentes níveis de ME, Palma propõe-se ao menos em “estabelecer uma classificação ou taxonomia provisória e não exaustiva” (PALMA, 2015a, p. 46), sendo esta: 1) as grandes metáforas; 2) metáforas de interação entre campos científicos; 3) metáforas provenientes da cultura; 4) metáforas na divulgação científica e ensino. A seguir apresentamos uma breve exposição acerca destes níveis.

As grandes metáforas⁸ incluem amplos sistemas de pensamento que podem tomar a forma de suposições metafísicas, como é o caso da *physis* grega, o mecanicismo do séc. XVII e o evolucionismo do séc. XIX. Elas atravessam diferentes campos de saber – científico, cultural, artístico, filosófico, literário, etc. –, nutrindo-os com elementos fundamentais que permeiam toda a produção de conhecimento destes campos, podendo até mesmo inaugurar verdadeiros estilos pois costuma se alinhar com os traços epistêmicos e metodológicos nestes campos (PALMA, 2015a).

As metáforas de interação entre campos científicos⁹ dizem respeito as ME que, segundo Palma (PALMA, 2015a), consistem no “uso metafórico de teorias, conceitos e modelos que passam de uma área específica da ciência para outra, em princípio diferentes” e permitem compreender como estas duas áreas se influenciam mutuamente. Embora o número de metáforas deste tipo possivelmente seja muito grande, como afirma Palma, é possível apontar “algumas das linhas principais e certos padrões” (PALMA, 2015a, p. 153), sendo a Física e a Biologia, as duas áreas que nos últimos três séculos tenham sido “as duas principais áreas provedoras de metáforas” (PALMA, 2015a, p. 154) deste tipo. Como exemplo, o autor aponta o desenvolvimento de teorias sociais baseadas nas leis de Newton, uma delas desenvolvida por Berkeley em 1773 e outra por Carey em meados do séc. XIX (PALMA, 2015a); nesta mesma época Walras propõem uma teoria econômica cujas leis apresentam

7 Para um exemplo de reconfiguração da base empírica ver a análise histórica sobre o experimento de Stern-Gerlach, em Wienert (1995).

8 Para uma exposição mais ampliada sobre as grandes metáforas, ver Palma (2009, 2015a); para uma análise sobre a metafísica mecanicista, ver Turbayne (1974).

9 Uma descrição mais pormenorizada pode ser verificada em Palma (2009, 2015a).

certa relação de analogia com as ideias de Newton (PALMA, 2015a). Em 1893 Durkheim publica a obra *Divisão do Trabalho Social* na qual, de acordo com Palma, “abunda o uso de analogias organicistas biológicas e médicas da sociedade” (PALMA, 2015a, p. 156), sendo esta obra uma das várias que empregam metáforas biológicas para descrever aspectos constituintes e funcionais da sociedade (PALMA, 2015a).

Com relação as metáforas provenientes da cultura, Palma (2015a) afirma que já não se tratam de metáforas que envolvam o fluxo de conceitos ou teorias de um campo científico para outro, mas sim, de metáforas e analogias que operam restritivamente no interior de corpos teóricas e cujas origens estão associadas ao senso comum e ao imaginário cultural, tais como “a árvore da vida, a mão invisível do mercado ou da economia, etc.” (PALMA, 2015a, p. 47). Tratam-se de “metáforas menos efetivas”, cuja presença é rapidamente percebida e cumprem “com o papel que tradicionalmente lhes foi atribuído: retórico, didático, estilístico” (PALMA, 2009, p. 60).

Com relação ao uso de metáforas na divulgação e na educação científica¹⁰, de acordo com Palma seu emprego corresponde aos usos próprios da didática, tanto na formação de cientistas e de não especialistas, quanto na divulgação científica:

Às vezes, essas metáforas coincidem com as geradas pelos cientistas, mas outras vezes são de uso estritamente didático para ensinar a um público não iniciado. Em ambos os casos, diferente em muitos outros aspectos, o uso de metáforas correntes e estabelecidas contribui para a construção e o reforço de imagens culturais do mundo e da ciência (PALMA, 2015a, p. 47).

Notadamente o autor aponta que nas situações de ensino ou divulgação dos conhecimentos científicos ao público não especializado, o uso das metáforas fica restrito apenas a sua função didática, contribuindo para formar reforçar percepções culturais sobre o mundo e a atividade científica. E é categórico em afirmar que “com toda a legitimidade, escorregam sob o eufemismo da transposição didática” (PALMA, 2015a, p. 239).

O autor afirma também que no âmbito da divulgação científica quase todas as metáforas empregadas correspondem àquelas próprias dos cientistas e algumas poucas seriam de uso exclusivamente jornalístico, mas apesar disso, neste âmbito, o uso de metáforas não têm “repercussão alguma nos conhecimentos substantivos das ciências” (PALMA, 2015a, p.

¹⁰ Para uma descrição mais detalhada sobre as metáforas epistêmicas no ensino e na divulgação científica, ver Palma (2015a).

239). Por outro lado, Palma considera que estas metáforas têm algum valor cognitivo, pois embora possam produzir notórios equívocos, contribuem de algum modo para formar a opinião do público acerca da atividade científica e seu papel na sociedade moderna (PALMA, 2015a). Contudo, alerta que no contexto da divulgação científica as metáforas podem implicar em um risco interpretativo e ganhar contornos ideológicos.

Dentre os exemplos, o autor descreve várias metáforas de cunho religioso que circulam pelos noticiários. Apontando-as através de citações de diferentes jornais, são notícias que veiculam temas científicos, por exemplo, sobre a *máquina de Deus* – o CERN¹¹ –, a *partícula de Deus* – o bóson de Higgs – ou sobre vídeo games que permitem ao jogador que se torne um Deus, visto que ele deve projetar o DNA dos habitantes de uma sociedade que ele próprio deverá criar, desde sua estrutura física como prédios, veículos, etc., até a forma de governo (PALMA, 2015a, grifos do autor).

Outro padrão encontrado neste nível de metáfora tem como objeto a inteligência humana. De acordo com o autor, tal atributo é muitas vezes considerado como um elemento que diferencia o ser humano dos outros animais, e “permeia toda uma classe de matrizes ideológicas” (PALMA, 2015a, p. 245), sendo por vezes empregado como critério de hierarquia de indivíduos ou grupos, algo que pode ser constatado no âmbito da educação no momento em que os testes de QI “passaram a ser considerados indicadores precisos da inteligência” (PALMA, 2015a, p. 246). Contudo, Palma (2015a) pretende apontar o uso de outra metáfora da inteligência atualmente muito difundida em noticiários: a lingerie inteligente, capaz de localizar sua portadora por meio do Sistema de Posicionamento Global, um biquíni inteligente que averte sobre a intensidade da radiação solar ou em casas e edifícios inteligentes e, de modo mais evidentemente, os telefones inteligentes (ou smartphones). A respeito das sutilezas ideológicas que podem figurar por trás dos usos destas metáforas, o autor averte:

No entanto, em todos os casos, a inteligência é identificada com a resposta apropriada, a reação automática à estímulos externos, memória e controle. Fazendo a extrapolação para trás, um indivíduo Inteligente, de acordo com esse critério, seria aquele perfeitamente adaptado ao que é dado, que se encaixa perfeitamente na estrutura e função social que teve em sorte. No entanto, além do fato de que um prédio que abre portas para alguém é um prédio estúpido, um indivíduo inteligente parece alguém que pode dizer não, que consegue algo novo, que pode pensar, criticar e escolher, e não alguém que reaja automaticamente com base no que se espera dele (PALMA, 2015a, p. 247).

11 Tradução livre: Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear. Disponível em: <<https://home.cern/>>. Acesso: 12/11/2021.

Por fim, o autor evidencia a presença de metáforas empregadas na divulgação científica que procuram compreender e interpretar condutas animais como se fossem tipicamente de humanos e vice-versa: “Se antropomorfiza os animais e se zoologiza os humanos” (PALMA, 2015a, p. 248). Segundo o autor, tradicionalmente o homem se colocara em uma posição de destaque em relação aos outros animais, mas que a partir da teoria evolucionista de Darwin no século XIX têm seus privilégios biológicos revogados. Por outro lado, salienta Palma, considerar o homem apenas como mais um animal leva ao exagero de considerar “que as mesmas explicações se aplicam aos comportamentos animais mais simples e instintivos, como para os elaborados rituais comportamentais humanos” (PALMA, 2015a, p. 148).

Segundo o autor, essa antropomorfização do mundo animal pode ser encontrada na divulgação científica sob as mais variadas formas, tais como o emprego do termo monogamia para caracterizar supostas relações entre macho e fêmea de outras espécies que não a humana (PALMA, 2015a) – importante destacar que este termo resulta de uma construção sócio cultural muito particular da espécie humana. Do mesmo modo, outros termos e expressões do comportamento humano são igualmente aplicados ao comportamento animal, tais como amor pelos filhos, personalidade romântica, simpático, promiscuo (PALMA, 2015a).

Além do âmbito comportamental, as metáforas dualistas animal-homem também ocorrem no âmbito econômico, como identificado por Palma em em uma nota jornalística que relatava como uma espécie de macaco empreendia o hábito da limpeza com “fins econômicos”, supostamente sendo capazes de avaliar a “disponibilidade e qualidade” de certa “mercadoria”, bem como analisavam a “concorrência” e se dispunham a “pagar um preço mais alto ou mais baixo” (PALMA, 2015a, p. 251). Em outro nota afirma-se que “as formigas podem ser corruptas” e podem ser enganadas por “lagartas impostoras” (PALMA, 2015a, p. 252).

Na seção seguinte iremos considerar a ME em um nível não explorado por Palma, à saber, as metáforas científicas que operam entre ramos especializados pertencentes a um mesmo campo científico.

2.6 METÁFORA EPISTÊMICA COMO UMA NOÇÃO-HIPÓTESE EM NÍVEL INTRACIENTÍFICO: CARACTERÍSTICAS E POSSIBILIDADES

Na seção anterior buscamos apresentar a taxonomia provisória sugerida por Palma para ilustrar alguns dos possíveis níveis de manifestação da ME. Embora tenhamos feito uma exposição sem maiores detalhamentos, tomamos o cuidado de abarcar todos os níveis sugeridos pelo autor. Notamos, contudo, a ausência de um nível que nos parece muito evidente, a saber, as situações em que a metáfora epistêmica estaria pondo em relação elementos pertencentes a dois ramos de conhecimento distintos, mas pertencentes a um mesmo campo científico. Uma vez que as ME não são categorias a priori rigidamente estabelecidas, podendo assumir variadas formas, níveis e alcances (PALMA, 2015a), julgamos ser plausível a proposição de metáforas epistêmicas no interior de um dado campo científico, ou seja, em nível *intracientífico*. Desse modo, nos colocamos ao lado de Palma, sobretudo com a cautela de considerar a ME neste nível, por hora, como uma hipótese plausível. Assim sendo, por considerarmos a noção de ME estabelecida por Palma (2009, 2015a) como uma hipótese a ser testada em nível intracientífico, iremos nos referir a tal objeto como uma noção hipótese.

Neste ponto, algumas considerações são necessárias. Assumiremos que as ME no nível que estamos propondo possuem todas as características gerais de qualquer ME, pois a este respeito, Palma (2009, 2015a) não estabelece quaisquer restrições ou especificidades. Por outro lado, salientamos haver diferenças na natureza dos elementos que constituem as matrizes de pensamento que poderão ser postas em bissociação. No nível intracientífico, estes elementos constituem-se das teorias, leis, teoremas, conceitos, equações, etc. Ressaltamos também que em nível intracientífico, os processos de literalização, os quais conferem aceitação ou rechaço às ME, correspondem ao escrutínio científico, que embora apresente aspectos gerais, por certo também apresentam características particulares no interior de cada atividade científica. Em suma, não trata-se de redefinir o conceito de ME em si, mas apenas de definir os limites e critérios pertinentes ao nível que estamos denominando por intracientífico. Dessa forma, uma metáfora epistêmica que venha a se constituir em nível intracientífico, doravante MEIC, *é toda metáfora epistêmica que põe em bissociação elementos de diferentes ramos de estudo inerentes a um mesmo campo de conhecimento científico. Os elementos podem ser teorias, leis, teoremas ou conceitos e suas formas de representação, características do campo científico em questão.*

Como primeira aproximação, iremos considerar que o nível intracientífico inclui os campos da Física, Química, Biologia e Geociências. Estas são apenas delimitações da pesquisa, não constituindo uma restrição. As características da noção hipótese da MEIC nestes campos científicos possivelmente poderá apresentar especificidades.

Julgamos haver ao menos três razões para considerarmos a pertinência das interações metafórico epistêmicas em nível intracientífico. Em primeiro lugar, embora a ME seja um conceito devidamente estruturado e fundamentado por Palma, considerá-lo no âmbito interno de um dado campo científico pode implicar em especificidades adicionais ou mesmo evidenciar limitações do referido conceito, afinal, as categorias previamente estabelecidas e as referidas considerações e análises acerca das mesmas (PALMA, 2009, 2015a), não explicitam o funcionamento das estruturas subjacentes à ME, ou seja, os processos de bissociação e literalização não são evidenciados.

Em segundo lugar, as ME possuem uma historicidade interna: se inicia na bissociação e segue ao longo de sua literalização. Nesta última etapa, elas ficam submetidas ao escrutínio científico e após este processo, havendo êxito, tornam-se ocultas de modo que apenas uma análise histórica acerca de sua formação – sua genealogia – pode evidenciar os processos que a originaram (PALMA, 2015a). Tais processos conectam invariavelmente aspectos históricos e epistêmicos e a sua genealogia evidencia estas conexões. Desse modo, as ME tornam-se potenciais dispositivos analíticos e, conseqüentemente, em terceiro lugar, torna-se plausível propor o uso didático e metodológico das MEIC no ensino das diferentes disciplinas de ciências em diferentes níveis, em abordagens que levem em conta aspectos da natureza da ciência.

Ressaltamos, contudo, que os potenciais usos da MEIC necessitam ainda ser estruturalmente definidos e organizados. Além disso o referido conceito, enquanto hipótese, necessita ser validado, de modo que suas potencialidades possam ser devidamente exploradas. Desse modo, com o intuito de testar a noção hipótese da MEIC, propomos uma metodologia de validação, tal como descrito a seguir.

Assumindo que uma dada novidade conceitual, devidamente estabelecida no interior de um dado campo científico – uma teoria, lei, teorema, conceito, etc. – é oriundo de uma MEIC exitosa, isto implica necessariamente que em um dado momento tenha ocorrido algum processo bissociativo e sua subsequente literalização. Além disso, na historicidade destes processos encontram-se cristalizados os critérios de aceitação e rechaço, característicos da referida atividade científica em uma dada época.

Diante deste quadro, propomos testar a noção hipótese da MEIC a partir de uma análise genealógica, referente a construção e estabilização de uma dada novidade conceitual, inerente a um campo de conhecimento científico específico. É condição necessária para validação que toda a estrutura conceitual que caracteriza uma MEIC, bem como suas relações internas, tornem-se manifestas e evidenciadas em materiais historiográficos e/ou históricos.

Elencamos, assim, os seguintes critérios de validação para a noção hipótese de MEIC, cuja análise genealógica deverá evidenciar: 1) os diferentes âmbitos de conhecimento postos em bissociação e tensões daí decorrentes; 2) as tensões impostas pelo quadro da experiência disponível; 3) os critérios e as manifestações de aceitação/rejeição em resposta ao referido processo de bissociação; 4) aspectos do processo de literalização cuja consolidação consiste na estabilização do processo de bissociação; 5) aspectos da reconfiguração do quadro da experiência disponível decorrentes da novidade conceitual. Sugerimos ainda que estas características sejam estruturadas a partir de um conjunto de categorias analíticas, a serem empregadas na análise de materiais historiográficos e/ou históricos. As especificidades desta metodologia, bem como o estudo de caso que iremos propor, serão descritos no capítulo seguinte.

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentamos as características essenciais do conceito de metáfora epistêmica sugerido por Palma (2009, 2015a), as bases conceituais em que se apoia, sua estrutura conceitual interna, seus limites de validade e alguns níveis ou formas que ela pode assumir. Conforme expusemos, o emprego de metáforas no âmbito científico pode desempenhar diferentes papéis, incluindo ações didático metodológicas e heurísticas. Conforme expusemos, há consenso acerca de seu papel na produção de conhecimento científico e diferentes autores vem defendido seu caráter imprescindível. Desse modo o uso de metáforas é visto como um elemento constitutivo da produção de conhecimento e não um mero recurso, prescindível.

Destacamos ao menos dois pontos que justificam esta mudança de perspectiva acerca do papel das metáforas na produção de conhecimento. Embora perspectivas teóricas que reconheçam o papel cognitivo das metáforas possam ser rastreados desde o século XVII, mostramos que foi a partir de meados do século XX que o fenômeno metafórico tornou-se objeto de estudo sistemático em âmbito filosófico. Neste mesmo período observamos um movimento semelhante no campo da epistemologia e nos estudos sobre modelos científicos, consolidando mudanças expressivas na percepção da atividade científica. Neste sentido, configura-se um cenário que, além de inaugural, é também promotor e basilar para um enfoque metafórico, tanto cognitivo quanto epistêmico. Em resumo, não apenas a concepção de ciência se modificou, como também a concepção do fenômeno metafórico já não é o

mesmo do início do século XX.

Uma das características fundamentais do pensamento metafórico reside na possibilidade de estruturar conceitos abstratos em termos de conceitos mais familiares ou em termos da experiência concreta. Assim, o uso de metáforas e analogias constituem-se como potenciais recursos didático metodológicos, tendo implicações para o ensino de ciências e para a divulgação científica. Estes enfoques têm mobilizado esforços de pesquisa nestas direções.

Mediante uma gama diversificada de enfoques, a conceitualização e caracterização do fenômeno metafórico fez emergir diferentes perspectivas do fenômeno, dentre as quais destacamos o conceito de ME proposto por de Hector Palma. Conforme expusemos, Palma sintetiza em seu conceito alguns dos elementos fundamentais do fenômeno metafórico, tais como a novidade semântica, que diz respeito ao caráter fundacional e inovador do pensamento metafórico e, oriundo do campo da pragmática, o papel do contexto para a enunciação e interpretação da metáfora, a historicidade estrutural de algumas metáforas – incluída a ME, decorrente do desaparecimento da dualidade literal/metafórico, ou seja, sua passagem de metáfora viva a metáfora morta e por fim seu papel cognoscitivo epistêmico. O conceito de metáfora epistêmica, o qual sintetiza estas e outras características, constitui-se de um processo de bissociação sincrônica seguido de um processo de literalização diacrônica. Ambos os processos carregam aspectos epistêmicos em sua estrutura conceitual interna. Além destes aspectos inerentes à ME, outros contornos epistêmicos são agregados ao conceito, os quais levam em conta aspectos empíricos, sócio culturais e históricos. A proposição de Palma reivindica a revisão do papel das metáforas na produção científica e não uma revisão epistêmica da ciência. Tampouco diz respeito a um conceito metafórico que leve a uma literaturalização da ciência, mesmo porque o objeto metafórico não se restringe ao emprego de palavras, termos ou orações; ao contrário, engloba todos os signos característicos do processo da representação e textualização dos conhecimentos científicos.

De acordo com Palma, embora a ME possua uma estrutura conceitual definida, seus elementos internos – os processos de bissociação e literalização – conferem ao conceito certas variações, não constituindo-se portanto como uma categoria rígida ou à priori. Desse modo a ME pode apresentar-se em diferentes níveis e estar sujeito à diferentes limites de validade e de alcance. Neste sentido, julgamos plausível a proposição de um nível de ME que leve em conta relações de bissociação restritas ao interior de um dado campo científico, ou seja, uma metáfora epistêmica em nível intracientífico – MEIC.

Nos colocamos ao lado de Palma ao defendermos que a noção de ME pode derivar

várias contribuições, como a compreensão do papel das metáforas na produção de conhecimento científico e suas potencialidades para o ensino de ciências e divulgação científica. Adicionalmente, sugerimos sua potencialidade como dispositivo analítico histórico epistêmico. Contudo, ao mesmo tempo que adotamos o conceito de ME, o fazemos com cautela, por entendermos que em nível intracientífico o referido conceito necessite ser analisado. Embora não estejamos propondo uma redefinição do conceito, entendemos que em nível intracientífico limitações ou necessidades possam vir a ser evidenciadas, sobretudo na intrincada estrutura que é própria dos processos de bissociação e literalização, implicando assim em modificações ou mesmo o abandono do referido conceito. Desse modo, adotamos a ME como uma noção hipótese, ou seja, um conceito estruturado, cuja validade em nível intracientífico venha a ser verificada.

Importa-nos ainda ressaltar que os processos de bissociação e literalização, constituintes de toda ME, ocorrem no contexto científico e este, sempre bom lembrar, está sujeito a rigorosos critérios de controle. Deve-se, portanto, sempre considerar a importância da auditoria científica para evitar que os limites, inicialmente difusos de uma ME, levem à inconsistências lógicas e/ou formais (PALMA, 2015a). Por outro lado, as ME não seguem apenas a uma condição lógica de existência, mas também histórica, ou seja, “em cada época há um pequeno número de candidatos suficientemente legítimos às imagens da sociedade e do mundo” (PALMA, 2015a, p. 41).

Frente a este quadro, propusemos um protocolo de validação para a noção hipótese da MEIC, visando suas potencialidades como recurso didático metodológico no ensino de ciências, bem como dispositivo analítico para investigações de cunho histórico epistêmico.

Referências

- ABRANTES, P. C. C. A metodologia de J. C. Maxwell e o desenvolvimento da Teoria Eletromagnética. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 5, n. Edição Especial, p. 58–75, 1988.
- AMIN, T. G. et al. Arrow of time: metaphorical construals of entropy and the second law of thermodynamics. **Science Education**, v. 96, n. 5, p. 818–848, set. 2012.
- ARENHART, J. R. B.; MORAES, F. T. F. Estruturas, Modelos e os Fundamentos da Abordagem Semântica DOI:10.5007/1808-1711.2010v14n1p15. **Principia: an international journal of epistemology**, v. 14, n. 1, p. 15–30, 5 jun. 2011.
- ARRUDA, J. M. Verdade, interpretação e objetividade em Donald Davidson. **Veritas (Porto Alegre)**, v. 50, n. 1, 30 abr. 2005.

ARRUDA, S. M. Metáforas na Física. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 10, n. 1, p. 25–37, abr. 1993.

BACHELARD, G. **A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

BLACK, M. Metaphor. **Proceedings of the Aristotelian Society, New Series**, v. 5, p. 273–294, 1955.

BLACK, M. **Models and Metaphors**. New York, NY: Cornell University Press, 1962.

BOKULICH, A. Maxwell, Helmholtz, and the unreasonable effectiveness of the method of physical analogy. **Studies in History and Philosophy of Science Part A**, v. 50, p. 28–37, abr. 2015.

BOLTZMANN, L. Model. In: **Theoretical physics and philosophical problems**. Vienna Circle Collection. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1974a. v. 5p. 213–220.

BOLTZMANN, L. On the methods of theoretical physics. In: **Theoretical physics and philosophical problems**. Vienna Circle Collection. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1974b. v. 5p. 5–12.

BOYD, R. Metaphor and theory change: what is “metaphor” a metaphor for? In: ORTONY, A. (Ed.). **Metaphor and thought**. 2. ed. Cambridge [England]; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993. p. 481–532.

BOZELLI, F. C.; NARDI, R. O uso de analogias e metáforas como recursos didáticos no ensino de física. **TED: Tecnó, Episteme y Didaxis**, n. 17, 11 out. 2005.

BROOKES, D. T.; ETKINA, E. Using conceptual metaphor and functional grammar to explore how language used in physics affects student learning. **Physical Review Special Topics - Physics Education Research**, v. 3, n. 1, p. 010105, 15 maio 2007.

CAVALCANTE, S.; FERREIRA, L. C.; GUALDA, R. Metáfora: diferentes perspectivas. **SCRIPTA**, v. 20, n. 40, p. 8–17, 2016.

CERONI, G. Exploring the use of metaphor in communication of contemporary physics. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 116, p. 1324–1332, fev. 2014.

CIAPUSCIO, G. E. De metáforas durmientes, endurecidas y nómades: un enfoque lingüístico de las metáforas en la comunicación de la ciencia. **Arbor**, v. 187, n. 747, p. 89–97, 28 fev. 2011.

CORONA, P. E. **Paul Ricoeur: lenguaje, texto y realidad**. Buenos Aires: Editorial Biblos, 2005.

DAVIDSON, D. What metaphors mean. **Critical Inquiry**, v. 5, n. 1, p. 31–47, 1978.

DELIZOICOV, N. C.; CARNEIRO, M. H. DA S.; DELIZOICOV, D. O movimento do sangue no corpo humano: do contexto da produção do conhecimento para o do seu ensino. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 10, n. 3, p. 443–460, dez. 2004.

DUTRA, L. H. DE A. **Pragmática de modelos: natureza, estrutura e uso dos modelos científicos**. São Paulo: Edições Loyola, 2013.

GENTNER, D.; JEZIORSKI, M. The shift from metaphor to analogy in Western science. In: ORTONY, A. (Ed.). **Metaphor and thought**. 2. ed. Cambridge [England]; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993. p. 532–550.

GIBBS, R. W. Cognitive linguistics and metaphor research: past successes, skeptical questions, future challenges. **DELTA: Documentação de Estudos em Linguística Teórica e Aplicada**, v. 22, n. spe, p. 1–20, 2006.

GINGRAS, Y. The Creative Power of Formal Analogies in Physics: The Case of Albert Einstein. **Science & Education**, v. 24, n. 5–6, p. 529–541, jul. 2015.

HESSE, M. **Models and Analogies in Science**. Indiana: University of Notre Dame Press, 1966.

HILGERT, M. C. Reflexões sobre o o conceito de metáfora de Paul Ricoeur e a noção de euforia da tradução. v. 39, n. 1, p. 53–75, 2015.

KNUDSEN, S. Scientific metaphors going public. **Journal of Pragmatics**, v. 35, n. 8, p. 1247–1263, ago. 2003.

KOESTLER, A. **O Homem e o Universo: como a concepção do Universo se modificou, através dos tempos**. São Paulo: Ibrasa, 1989.

KOESTLER, A. **The act of creation**. London: Last Century Media, 2014.

KOPP, F. A.; ALMEIDA, V. D. Analogias e metáforas no ensino de Física Moderna apresentadas nos livros didáticos aprovados pelo PNLD 2018. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 36, n. 1, p. 69–98, 13 maio 2019.

KUHN, T. S. **A estrutura das revoluções científicas**. 5. ed. São Paulo: Perspectiva, 1970.

KUHN, T. S. Metaphor in science. In: ORTONY, A. (Ed.). **Metaphor and thought**. 2. ed. Cambridge [England]; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993. p. 532–550.

KUHN, T. S. Metaphor in science. In: ORTONY, A. (Ed.). **Metaphor and Thought**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. p. 533–542.

LAKOFF, G. The contemporary theory of metaphor. In: ORTONY, A. (Ed.). **Metaphor and thought**. 2. ed. Cambridge [England]; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993. p. 202–251.

LAKOFF, G.; JOHNSON, M. **Metáforas de la vida cotidiana**. Madrid: Catedra, 2017.

LIMA, A. DE. A metáfora: da analogia à técnica de fusão de opostos. **Revista Investigações**, v. 18, n. 1, p. 9–40, 2005.

MAXWELL, J. C. **Are there real analogies in nature?**, 1856. Disponível em: <<http://sites.uci.edu/mathematics/files/2016/11/Maxwell-Analogies-in-Nature.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2018

- MAXWELL, J. C. On Faraday's Lines of Force (1855). In: NIVEN, W. D. (Ed.). . **The Scientific Papers of James Clerk Maxwell**. Cambridge: Cambridge University Press, 1890. p. 451–513.
- MELLOR, D. H. Models and Analogies in Science: Duhem versus Campbell? **Isis**, v. 59, n. 3, p. 282–290, 1968.
- NARDI, R.; ALMEIDA, M. J. P. M. DE (EDS.). **Analogias, leituras e modelos no ensino de ciência: a sala de aula em estudo**. São Paulo: Escrituras Editora, 2006.
- NERSESSIAN, N. J. How do scientists think? capturing the dynamics of conceptual change in science. In: **Cognitive Models of Science**. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1992. v. 15p. 3–44.
- ORTONY, A. Metaphor, language, and thought. In: ORTONY, A. (Ed.). . **Metaphor and thought**. 2. ed. Cambridge [England]; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993. p. 1–16.
- PALMA, H. El desarrollo de las ciencias a través de las metáforas: un programa de investigación en estudios sobre la ciencia. **Revista CTS**, v. 20, n. 6, p. 45–65, dez. 2005.
- PALMA, H. **Metáfora e modelos científicos: a linguagem no ensino de ciências**. São Paulo: Edições SM, 2009.
- PALMA, H. **Ciencia y metáforas: crítica de una razón incestuosa**. Buenos Aires: Prometeu Libros, 2015a.
- PALMA, H. Ciencia y metáforas: Los viejos ruidos ya no sirven para hablar. **Cuadernos de Neropsicología: Panamerican Journal of Neuropsychology**, v. 1, n. 9, p. 134–146, abr. 2015b.
- PALMA, H. **Hector Palma**. Academia.edu. Disponível em: <<https://unsam.academia.edu/HectorPalma>>. Acesso em: 9 abr. 2020.
- PASCOLINI, A. Metafore e comunicazione scientifica. **JCOM**, v. 3, n. 1, p. 1–18, mar. 2004.
- PULACZEWSKA, H. Metaphors, particles, terminology: from objectivist to cognitivist approach in physics and linguistics. In: WITCZAK-PLISIECKA, I. (Ed.). . **Pragmatic Perspectives on Language and Linguistics: Pragmatics of Semantically-Restricted Domains**. New Castle: Cambridge Scholars Publishing, 2010. v. Iip. 377–391.
- QUALE, A. The role of metaphor in scientific epistemology: a constructivist perspective and consequences for science education. **Science & Education**, v. 11, p. 443–457, 2002.
- QUINTANILLA, P. Metáfora e interpretación en Donald Davidson. **Areté Revista de Filosofía**, v. 7, n. 1, p. 113–129, 1995.
- RICOEUR, P. The metaphorical process as cognition, imagination, and feeling. **Critical Inquiry**, v. 5, n. 1, p. 143–159, out. 1978.
- RICOEUR, P. **A metáfora viva**. São Paulo: Edições Loyola, 2000.

RIVADULLA, A. Metáforas y modelos en ciencia y filosofía. **Revista de Filosofía**, v. 31, p. 189–202, 2006.

ROQUE, T.; VIDEIRA, A. A. P. A noção de modelo na virada do século XIX para o século XX. **Scientiae Studia**, v. 11, n. 2, p. 281–304, jun. 2013.

SANTANA, F. B. Quantização da luz: as metáforas conceptuais de Einstein e Infeld no contexto da divulgação científica. In: SILVA, H. C. DA (Ed.). **Ciência, Seus Textos e Linguagens: ensaios sobre circulação e textualização de conhecimentos científicos e matemáticos**. Curitiba: Editora CRV, 2019. p. 53–80.

SCHRÖDER, U. A. Da teoria cognitiva a uma teoria mais dinâmica, cultural e sociocognitiva da metáfora. **Alfa**, v. 52, n. 1, p. 39–56, 2008.

SCHRÖDER, U. A. Trinta anos da Teoria Conceptual da Metáfora: uma retrospectiva crítica. **Caderno de Estudos Linguísticos**, v. 53, n. 1, p. 59–71, 2011.

SCHRÖDER, U. A. Abordagem cognitiva da metáfora em perspectiva pragmática nos séculos XVIII e XIX.pdf. **Alfa**, v. 58, n. 1, p. 115–136, 2014.

SHAPIN, S. **Nunca pura: Estudos históricos da ciência como se fora produzida por pessoas com corpos, situadas no tempo e no espaço, na cultura e na sociedade e que se empenham por credibilidade e autoridade**. Belo Horizonte: Fino Traço, 2013.

SHAPIRO, M. A. Analogies, visualization, and mental processing of science stories. **Annals of the International Communication Association**, v. 9, n. 1, p. 339–355, maio 1986.

SILVA, A. S. DA; LEITE, J. E. R. 35 anos de Teoria da Metáfora Conceptual: fundamentos, problemas e novos rumos. **Revista Investigações**, v. 28, n. 2, p. 1–23, 2015.

SILVA, F. S. DA; CATELLI, F. Os modelos na ciência: traços da evolução histórico-epistemológica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 4, p. 1–9, 2019.

SILVA FILHO, W. J. Davidson a metáfora e os domínios do literal. **Utopía y Praxis Latinoamericana**, v. 15, n. 6, p. 30–43, 2001.

SITKO, C. M. Os desenvolvimentos da Mecânica Analítica que culminaram na elaboração de $F=ma$. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 36, n. 1, p. 158–177, 13 maio 2019.

SKORCZYNSKA, H. Metaphor and education: reaching business training goals through multimodal metaphor. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 116, p. 2344–2351, fev. 2014.

SOUZA SILVA, C. A. DE; MARTINS, M. I. Analogias e metáforas no livro didático de física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 27, n. 2, p. 255–287, ago. 2010.

SPERANÇA-CRISCUOLO, A. C. **A metáfora como recurso didático em textos de divulgação científica**. Anais. Anais...: 4. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE METÁFORA. Porto Alegre: 2011.

TURBAYNE, C. M. **El mito de la metáfora**. [s.l.] Fondo del Cultura Económica, 1974.

VIDEIRA, A. A. P. Boltzmann, física teórica e representações. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 3, p. 269–280, 2006.

VIDEIRA, A. A. P. Modelo: a noção síntese das concepções filosóficas de Boltzmann. **Scientiae Studia**, v. 11, n. 2, p. 373–380, jun. 2013.

WEINERT, F. Wrong theory - right experiment: the significance of the Stern-Gerlach experiments. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 26, n. 1, p. 75–86, abr. 1995.

ZAMPONI, G. De códigos e livros: a metáfora como estratégia no gênero de popularização da ciência. **Estudos Linguísticos**, v. 38, n. 3, p. 321–333, dez. 2009.

ZANETIC, J. Dos “Principia” da mecânica aos “Principia” de Newton. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 5, n. Especial, p. 23–35, 1 jan. 1988.

3 VERIFICAÇÃO DA PLAUSIBILIDADE DA HIPÓTESE DA METÁFORA EPISTÊMICA INTRACIENTÍFICA: A ELABORAÇÃO DO CONCEITO DE SPIN DO ELÉTRON COMO ESTUDO DE CASO

Resumo

Apresentamos uma análise referente a formulação do conceito de spin do elétron buscando destacar trechos (parágrafos, frases, sentenças, equações) de fontes historiográficas e/ou originais onde seja possível evidenciar elementos estruturais da noção hipótese da metáfora epistêmica proposto por Hector Palma. Nosso objetivo é corroborar com a hipótese de Palma e desta forma contribuir para o entendimento do papel das metáforas na ciência. Para tanto, elegemos o episódio histórico referente a construção do spin do elétron. Uma das razões para nossa escolha relaciona-se com o fato de que a descrição dos desdobramentos das linhas espectrais (multipletos) dos átomos de elementos alcalinos não encontra suporte no princípio da correspondência, fazendo do spin uma grandeza classicamente indescritível, potencializando assim o uso de metáforas. Além disso, pesquisas na área do ensino vem apontando dificuldades e caminhos para a abordagem dos conceitos de Física Moderna em diferentes níveis, o que inclui o conceito de spin do elétron e neste sentido o presente estudo pode dar algumas contribuições. Com o intuito de evidenciar a plausibilidade do conceito de metáfora epistêmica elaboramos um conjunto de categorias analíticas, cada qual refletindo um aspecto essencial do conceito de Palma, de modo a categorizar trechos extraídos de materiais originais e historiográficos, assumindo que a identificação destes trechos é condição suficiente para validar a hipótese da metáfora epistêmica de Palma.

Palavras-chaves: metáfora científica, metáfora epistêmica, spin do elétron, ensino de Física.

Abstract

We present an analysis regarding the formulation of the concept of electron spin seeking to highlight excerpts (paragraphs, sentences, equations) from historiographic and/or original sources where it is possible to evidence structural elements of the notion-hypothesis of the epistemic metaphor proposed by Hector Palma. Our goal is to corroborate the Palma hypothesis and thus contribute to the understanding of the role of metaphors in science. For this, we chose the historical episode referring to the construction of the electron spin. One of

the reasons for our choice is related to the fact that the description of the unfolding of the spectral lines (multiplets) of the atoms of alkaline elements is not supported by the principle of correspondence, making spin a classically indescribable quantity, thus enhancing the use of metaphors. In addition, research in the field of teaching has been pointing out difficulties and ways to approach the concepts of Modern Physics at different levels, which includes the concept of electron spin and in this sense the present study can make some contributions. In order to highlight the plausibility of the concept of epistemic metaphor, we elaborated a set of analytical categories, each reflecting an essential aspect of the concept of Palma, in order to categorize excerpts extracted from original and historiographic materials, assuming that the identification of these excerpts is a condition enough to validate the hypothesis of Palma's epistemic metaphor.

Keywords: scientific metaphor, epistemic metaphor, electron spin, physics teaching.

3.1 INTRODUÇÃO

Nosso objetivo é demonstrar a validade da noção hipótese da metáfora epistêmica (ME) em nível intra científico (MEIC). Importa salientar que não há distinção conceitual entre ME e MEIC; há, contudo, uma limitação de alcance, a saber, que uma MEIC refere-se a uma metáfora epistêmica que reside nos limites de um único campo científico – em nosso caso específico, o campo da Física. Assim, em nossas considerações, quando nos referirmos às propriedades ou aspectos conceituais, o emprego do termo ME ou MEIC é indiferente, não implicando em nenhuma ambiguidade. Por outro lado, ao empregarmos o termo MEIC estaremos indicando que o aspecto das limitações quanto ao alcance – restrição de domínio a um único campo científico – serão importantes na referida discussão, além do que, nestes casos deve-se atentar para algumas especificidades decorrentes do campo científico em questão, sobre as quais iremos discorrer em breve.

O conceito da ME, estruturado por Palma (2005, 2009, 2015), possui dois elementos constitutivos básicos, a bissociação e a literalização, como já apresentado anteriormente. O ato fundacional de uma ME – a bissociação – é definido e fundamentado por Arthur Koestler com o intuito de descrever os processos criativos humanos, ocorridos em nível psicológico, sendo elemento fundacional comum na produção do humor, na criação artística e na produção

do conhecimento científico (KOESTLER, 2014). A transformação de uma metáfora viva em metáfora morta – a literalização – foi fundamentada no campo da metáfora por Colin Turbayne com o intuito de descrever o processo pelo qual uma afirmação inicialmente inadequada converte-se em metáfora e esta, com o passar do tempo, tende a ser percebida com significado literal (TURBAYNE, 1974), ou seja, seu aspecto metafórico tende a tornar-se oculto.

Todo processo de MEIC inicia-se com uma bissociação, uma relação entre campos teórico experimentais até então não relacionados, algo que pode ser inicialmente percebido como inadequado, que irá suscitar reações de oposição por parte das comunidades científicas pertinentes aos campos teórico experimentais envolvidos na bissociação. Em âmbito intracientífico, as argumentações para aceitação/rejeição de uma dada bissociação darão origem à controvérsias científicas, às quais podem variar em profundidade e persistência. A submissão de uma bissociação aos critérios de aceitação/rejeição de uma dada comunidade científica – em breve os especificaremos – dá início ao processo de literalização. Uma bissociação capaz de atender aos compromissos lógicos, metodológicos e epistêmicos de uma dada comunidade científica resultará em conhecimento novo, estabilizado, uma ME exitosa que já não é percebida como uma metáfora, mas sim como expressão natural de uma ideia. Desse modo, conforme indicado por Palma (2015), somente uma análise genealógica poderá mostrar que uma ME literalizada foi um dia uma metáfora.

Salientamos que o conceito de ME pode envolver elementos científicos de diferentes categorias, tais como teorias, leis, teoremas, conceitos, equações, etc. (PALMA, 2015; TURBAYNE, 1974). Em nosso estudo, optamos por considerar o processo da MEIC relacionado ao surgimento de uma novidade científica conceitual, pois julgamos que elementos como teorias, leis e teoremas, além de serem estruturas lógico científicas mais complexas, podem também apresentar uma historicidade mais ampla, impondo assim um esforço maior para a análise do episódio histórico. Além disso, uma teoria, lei ou teorema pode, em princípio, apresentar uma estrutura interna composta de várias ME, cada qual com a uma historicidade própria e possíveis inter-relações, o que inevitavelmente implicaria em um estudo formal mais amplo e complexo. Contudo, é importante salientar que conceitos científicos somente podem ser significados no interior de alguma teoria, e no campo específico da Física, a constituição conceitual somente é plena quando leva-se em conta representação e formalismo matemáticos.

Definimos como objeto de análise o conceito de spin do elétron e tal escolha foi norteada por diferentes motivos. Em primeiro lugar, conceitos relacionados à Mecânica

Quântica (MQ) têm sido objeto de investigações e as pesquisas vêm apontando dificuldades e caminhos, tanto para o ensino, quanto para a formação de professores (MONTEIRO; NARDI; BASTOS FILHO, 2009; OLIVEIRA; VIANNA; GERBASSI, 2007; OSTERMANN; MOREIRA, 2000). Neste sentido, o estudo da MEIC relacionado ao conceito de spin do elétron pode trazer contribuições na abordagem de conceitos da MQ, sobretudo a partir de uma perspectiva histórica e epistêmica, cuja importância é também apontada por diferentes estudos (JIMÉNEZ-ALEIXANDRE; CRUJEIRAS, 2017; SASSERON; DUSCHL, 2016; VILAS BOAS *et al.*, 2013).

Em segundo lugar, no que diz respeito aos aspectos didáticos e metodológicos, a abordagem do tema spin do elétron é envolvida por certas dificuldades didáticas, históricas e epistêmicas (GOMES; PIETROCOLA, 2011; WEINERT, 1995). De acordo com Tomonaga (1997) ocorre o mesmo no âmbito conceitual:

Spin ocupa uma posição única no ensino de física, uma vez que é necessário uma ampla gama de física com diferentes graus de dificuldade para sua compreensão. Por esse motivo, não há um livro sobre mecânica quântica que descreva esse assunto com profundidade suficiente. A maioria dos livros didáticos dedica no máximo um capítulo a esse assunto e fornece apenas uma descrição utilitária. A teoria da relatividade, essencial para a compreensão de spin e estatística, é frequentemente esquecida, exceto na derivação da equação de Dirac. A relação entre spin e estatística é aparente, mas sua base é difícil de entender (TOMONAGA, 1997, p. viii).

Podemos ainda apontar um terceiro fator, o qual diz respeito ao uso de modelos, analogias¹² e metáforas. Maxwell e Boltzmann, por exemplo, não somente defenderam o uso de analogias e modelos, como também lhes conferiram aspectos epistêmicos (BOLTZMANN, 1974; MAXWELL, 1856). A metáfora científica de Maxwell, embora muito bem sucedido na teorização e obtenção das equações do campo eletromagnético (ABRANTES, 1988), não se aplica na descrição matemática do spin e a outros conceitos da MQ, uma vez que no formalismo desta teoria, grandezas como momento, posição, momento angular, etc. não mantêm as mesmas relações matemáticas que as definem classicamente, sendo este um requisito necessário para emprego das analogias definidas por Maxwell (cf. LIVRAMENTO, 2017, p. 139). Além disso, no âmbito da MQ as grandezas físicas possuem outra significação, ou seja, não podem ser reinterpretadas em termos clássicos (cf. GRIFFITHS, 2011, p. 11–13).

¹² No que diz respeito ao conceito de metáfora epistêmica que estamos considerando, não há diferenças substanciais em relação ao conceito de analogia (cf. PALMA, 2015, p. 22).

Neste sentido, o conceito de ME é mais abrangente que o conceito de metáfora científica definido por Maxwell, uma vez que não está limitado à necessidade de qualquer tipo de semelhança entre representações matemáticas para que analogias sejam empreendidas. Ao contrário, em uma ME ocorre a justaposição de matrizes teórico conceituais que não apresentam, em princípio, qualquer relação.

Partindo da ideia de que o conceito de ME apresenta uma historicidade interna, é pela perspectiva histórica da formação de um dado conceito – neste caso, *spin do elétron* – que devemos esperar encontrar evidências dos elementos que compõem a estrutura conceitual do processo de ME que resultou no referido conceito. Temos portanto, três pontos a considerar. O primeiro implica em definir um recorte histórico suficientemente abrangente, ou seja, que contemple os processos de bissociação e literalização da MEIC da qual deriva o conceito de spin do elétron. O segundo implica em especificar um conjunto de categorias de análise que seja capaz de refletir os elementos estruturais da noção hipótese da MEIC. Por fim, o terceiro implica em buscar as evidências dos processos de bissociação e literalização nos textos historiográficos e/ou originais, pertinentes ao episódio histórico considerado. Estes pontos estabelecem, de certo modo, os aspectos metodológicos de nossa análise, os quais serão detalhados a seguir.

3.2 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Conforme apontado anteriormente, estabelecer os aspectos metodológicos envolvidos em nossa análise implica em três pontos essenciais: (1) estabelecer um recorte temporal que inclua todo o processo da MEIC – sua bissociação e sua literatização; (2) especificar como o processo de MEIC pode ser caracterizado de modo a refletir a sua identidade e consistência conceitual; (3) especificar como tornar manifestas as características de um processo de MEIC.

Em relação aos limites do recorte histórico, os mesmos devem ser definidos com base na evolução da análise, ou seja, na medida em que formos capazes de identificar a presença dos marcos, inaugural e final (bissociação e literalização), da MEIC em questão. É importante ressaltar que tal delimitação deve, além de contemplar a temática escolhida, ser temporalmente adequado de modo a captar satisfatoriamente o contexto científico (o quadro teórico e empírico), bem como elementos do contexto sócio-histórico e cultural (FORATO; PIETROCOLA; MARTINS, 2011).

Em relação ao segundo ponto, iremos propor um conjunto de categorias analíticas que reflitam as características essenciais que definem os processos de ME. Mostraremos que no caso de MEIC no âmbito da Física, há algumas especificidades inerentes a este campo de conhecimento, às quais decorrem da forma como são estabelecidas as relações entre as ideias científicas, o formalismo matemático e os experimentos. Em relação ao terceiro ponto, iremos propor o uso da produção historiográfica acerca do spin do elétron, complementada com documentos originais. A partir destes textos, buscaremos evidenciar as características do processo de MEIC presentes na forma de proposições qualitativas e/ou quantitativas, levando em conta as categorias analíticas propostas. A fundamentação e as justificativas serão agora apresentadas.

Demonstrar a validade da noção hipótese da ME implica em evidenciar os processos de bissociação e literalização. Estes processos apresentam certas especificidades conceituais e constituem a estrutura interna e a historicidade própria da ME (PALMA, 2015). Portanto, qualquer produção científica que possa ser considerada como decorrente uma ME possuirá uma rastreabilidade histórica. Consequentemente, a busca pelas raízes formativas de uma dada produção científica implicará numa perspectiva histórica e epistêmica acerca daquela produção científica – histórica porque tal dimensão é inerente ao processo de literalização de uma ME; epistêmica porque resulta de toda ME exitosa um conhecimento novo, no qual o papel desempenhado pela ME é insubstituível (PALMA, 2015).

Dado que todo processo de bissociação é sempre um evento sincrônico, o mesmo estará invariavelmente no passado, o que nos remete ao campo da *história da ciência*. Além disso, a ME traz em sua estrutura conceitual certas considerações epistêmicas embarcadas, o que nos leva a considerar aspectos da natureza do conhecimento.

De acordo com Cellard (2012), o documento escrito é quase sempre o único vestígio da atividade humana que permite algum tipo de reconstrução histórica referente a um passado relativamente distante. Como bem afirma o autor, o pesquisador não tem o domínio do documento, pois este constitui uma forma de comunicação unidirecional (CELLARD, 2012) e desse modo, o trabalho dos historiadores, ou seja, sua produção historiográfica, reflete os acontecimentos históricos mas implica em uma percepção que confere um caráter discursivo novo aos eventos do passado (MARTINS, 2004); o trabalho do historiador reconstrói a história a partir de um olhar sobre o passado, norteado pelo emprego de algum tratamento analítico (KRIPKA; SCHELLER; BONOTTO, 2015).

Um conjunto variado de valores e concepções podem influenciar as percepções do historiador da ciência acerca dos episódios científicos (MARTINS, 1993), dentre os quais

destacamos aqueles decorrentes de concepções epistêmicas, o que implicará em diferentes tipos de produção historiográfica (ABRANTES, 2002; KUHN, 1968). Esta consideração é muito importante, uma vez que o conceito de ME não apenas decorre, mas também firma-se sobre um determinado conjunto de pressupostos epistêmicos (PALMA, 2015). Desse modo, embora não estejamos propondo uma análise histórica acerca da construção do conceito de spin do elétron, faremos uso da produção historiográfica já disponível sobre o tema, cujas concepções epistêmicas subjacentes devem manter algum alinhamento àquelas inerentes a noção hipótese de ME que estamos defendendo. Notadamente, quando esta condição não for minimamente atendida, possivelmente não encontraremos nestes materiais historiográficos uma quantidade substancial de aspectos característicos do processo de ME e, conseqüentemente, estes materiais serão naturalmente descartados. Evidentemente, não encontrar qualquer vestígio do processo de ME em um amplo espectro de materiais historiográficos implicaria por em dúvida a validade da noção hipótese da ME. Conforme mostraremos oportunamente, isto não ocorre.

Optamos pelo uso de fontes predominantemente historiográficas, dado que uma análise pautada apenas em fontes primárias poderia implicar em limitações de acesso aos documentos originais, tanto de cunho idiomático quanto geográfico. Além disso, este tipo de análise consiste em uma tarefa que requer métodos e habilidades específicas, conforme apontado por Martins (2005), dos quais não dispomos. Outro fator que confere grande importância ao uso das fontes historiográficas em nossa investigação esta relacionado ao contexto de produção de ME. De acordo com Palma (2015), na proposição de ME entram em jogo o estado do conhecimento de um dado campo científico, a base empírica vigente, as condições sociológicas, antropológicas e psicológicas. Ainda segundo o autor, tais condições são historicamente determinadas e, desse modo, podem ser captadas pelos historiadores da ciência, tarefa esta que não teríamos condições de empreender devido as limitações já apontadas. Em resumo, a realização de uma análise histórica estaria além do alcance de nossas possibilidades e portanto, fora do escopo de nossa proposta. Por outro lado, tais considerações não impedem o uso de algumas fontes primárias. Estas desempenharão um papel complementar importante em nossa análise. O modo como faremos uso da historiografia e dos materiais originais serão explicitados mais adiante.

Buscaremos agora, caracterizar o processo de MEIC no campo da Física, em relação a qual, como já mencionado, há certas especificidades que necessitam ser detalhadas. Neste campo de conhecimento as ideias científicas (teorias, leis, teoremas, conceitos, etc.), além de uma representação textual, podem apresentar também uma representação estabelecida por meio

de formalismos matemáticos e imagéticos. Além disso, os experimentos devem ser concebidos e interpretados a partir de uma representação matemática que exprima as ideias científicas pertinentes ao fenômeno experimentado. As relações de coerência lógica entre ideias científicas, experimentos e formalismo matemático é um aspecto das MEIC próprio do campo da Física. Esta particularidade deve, portanto, permanecer explícita em nosso método, pois constitui condição necessária, visto que é inerente ao referido campo de conhecimento.

A organização conceitual de um campo científico, tal como ocorre na Física, é decorrente de relações de coerência lógica entre ideias científicas, descrição de experimentos e o formalismo matemático. A motivação para proposição de MEIC decorre de situações onde o uso da tradição científica vigente não é capaz de fornecer uma descrição adequada para uma dada situação experimental. A persistência deste quadro torna-se um ambiente propenso à inovações metodológicas e conceituais.

Pode-se pensar que a proposição e validação de uma MEIC consiste em um esforço empreendido por uma comunidade científica com o intuito de solucionar um problema que os métodos convencionais não dão conta de resolver. Uma MEIC consiste em um processo que começa com a proposição de uma bissociação sincrônica, isto é, a junção de aspectos teóricos de diferentes campos de conhecimento. A inovação conceitual decorrente da bissociação fica então sujeita aos critérios de validação da comunidade científica e com o tempo, os limites de significação da proposição metafórica inicial tornam-se definidos, estabilizados, convertendo-se em conhecimento novo. Este é o segundo estágio da MEIC, sua literalização diacrônica.

O processo de bissociação tem sua origem fundamentalmente em nível psicológico (KOESTLER, 2014) – é o insight do cientista. Contudo, sua materialidade se estabelece na comunicação, formal ou não formal, oficial ou extra oficial. Temos aqui um aspecto peculiar, inerente às MEIC no âmbito da Física. Os processos bissociativos, ou seja, a junção de ideias pertencentes à diferentes matrizes teóricas com o intuito de restabelecer a coerência lógica de um quadro teórico experimental, se materializam por meio de comunicações científicas (apresentações em eventos, artigos em periódicos, etc.) e nestes, a argumentação é constituída pela articulação entre a linguagem natural e a linguagem formal. Isto nos remete a duas possíveis formas de materialização das bissociações, as quais denominaremos por *qualitativa* e *quantitativa*. Uma bissociação qualitativa corresponderá a toda bissociação expressa em linguagem natural; por outro lado uma bissociação quantitativa corresponderá a toda bissociação expressa em linguagem matemática, ambas materializadas a partir de alguma textualização – em geral, documentos científicos.

O processo de literalização, por sua vez, se estabelece no decorrer do tempo, ou seja, é

diacrônico, perdurando por um tempo mais longo em relação ao ato fundacional do fenômeno metafórico (TURBAYNE, 1974). É nesta etapa do processo que a comunidade científica aplica seus critérios de validação. De acordo com Palma:

[...] poderíamos tentar considerar muitos dos episódios científicos como o conjunto de decisões cognitivas de aceitação/rejeição de metáforas epistêmicas que a comunidade científica faz com base nas teorias, conceitos e explicações disponíveis, em resposta a um conjunto historicamente limitado de perguntas e problemas sobre a experiência disponível (PALMA, 2015, p. 45).

É ao longo do processo de literalização que se tornam explícitas às manifestações de aceitação/rejeição, norteadas por valores lógicos, metodológicos e epistêmicos, vigentes no interior de uma comunidade científica. A superação de uma controvérsia, o estabelecimento de um conhecimento novo, a obtenção de consenso, decorre da proposição de uma bissociação, inicialmente sofrerá resistência por parte de uma dada comunidade científica que, estando comprometida com um conjunto de valores lógicos, metodológicos e epistêmicos, foi capaz de converter a proposição inicialmente inadequada em conhecimento científico válido, estabelecendo um novo estado de coerência lógica entre as ideias científicas, o formalismo matemático e o experimento. Cabe ressaltar que a proposição de ME, exitosas ou não, de algum modo reconfigura e enriquece a base empírica (PALMA, 2015).

A experiência disponível é mais um aspecto importante a ser ressaltado. Ela diz respeito ao que, em um dado momento histórico, uma comunidade científica reconhece como evidência empírica. Deve-se ressaltar a importância dada ao qualificador “*disponível*” (PALMA, 2015, p. 45, grifo do autor). Tal disponibilidade não se limita as capacidades humanas ou técnicas, as quais podem ser superadas de algum modo, mas também leva em conta o estado do conhecimento, imanente a uma dada comunidade científica e suas concepções acerca do que se considerada como “*fato científico*” (PALMA, 2015, p. 46, grifo do autor). Como bem afirma, “*fatos científicos nem sempre estão lá para serem detectados, mas surgem de uma construção histórica cujo ato fundacional é incluí-los sob esse estatuto*” (PALMA, 2015, p. 46).

As condições que permitem à uma ME tornar-se exitosa não decorrem apenas do estado teórico experimental de um campo científico, mas também das condições sócio históricas vigentes em uma dada época. Do contrário, as dificuldades de Copérnico e Galileu poderiam ser resumidas a obstáculos conceituais e tecnológicos. De acordo com Palma:

[...] vale dizer que, em qualquer momento dado, não estão disponíveis um universo infinito de [ME] possíveis, senão que, pelo contrário, há em cada época um escasso número de candidatos à imagens da sociedade e do mundo suficientemente legitimados. Estes conceitos, teorias, noções, etc., suscetíveis de serem utilizados como originários de uma ME, conformam um campo ou mundo objetivo, e legitimado através de mecanismos também historicamente dados, das produções humanas e dos argumentos e teorias científicas (PALMA, 2015, p. 41).

Considerando os aspectos conceituais relativos às ME anteriormente expostos, bem como as peculiaridades relativas às MEIC no âmbito da Física, apresentamos no Quadro 2 a relação de categorias analíticas que julgamos refletir a essência da estrutura conceitual da noção hipótese da MEIC. No emprego dos materiais historiográficos e/ou documentos originais, oficiais ou extra oficiais, formais ou não formais, estaremos interessados em categorizar parágrafos, frases, orações, sentenças ou equações – doravante, segmento(s) analítico(s) (SA) – segundo os critérios definidos pelas categorias analíticas que iremos detalhar a seguir.

A categoria denominada por *Bissoação qualitativa* será empregada para categorizar SA nos quais se verifique uma menção explícita à um processo de bissociação, mas expressa em linguagem natural. A categoria denominada por *Bissoação quantitativa*, por sua vez, será empregada para categorizar SA nos quais processos de bissociação sejam expressos por meio da linguagem matemática.

No campo científico da física as formas de bissociação qualitativa e quantitativa são indissociáveis, pois toda teoria física deve ser consistente, isto é, devem haver relações de coerência lógica entre os conceitos científicas que a teoria mobiliza e o formalismo matemático que a estrutura (POPPER, 1997). Além disso, tal consistência deverá conduzir a uma adequada representação/interpretação dos experimentos, isto é, espera-se da teoria, além da consistência, a capacidade de dar conta de alguma fenomenologia.

De acordo com Koestler (2014), o processo de bissociação ocorre, em sua unidade mais fundamental, em nível psicológico (insights). Notoriamente, como já mencionado, trata-se de um evento inacessível em sua origem, mas que encontra forma e materialidade sob diferentes textualidades. Desse modo, voltaremos nossa atenção para as comunicações das ideias científicas, tais como a produção historiográfica, artigos científicos originais, comunicações científicas, cartas, diálogos transcritos, etc. Documentos originais foram ocasionalmente considerados, na íntegra ou na forma de fragmentos citados em materiais historiográficos.

Quadro 2 - Relação de categorias analíticas referente às MEIC.

Categoria analítica	Identificador
Bissociação qualitativa	Processo bissociativo representado por meio da linguagem natural.
Bissociação quantitativa	Processo bissociativo representado por meio da linguagem matemática.
Experiência disponível	Estado do conhecimento; o quadro teórico, metodológico, formal e empírico.
Critério de aceitação	Emprego de um ou mais elementos da experiência disponível como critério de aceitação de uma bissociação.
Critério de rejeição	Emprego de um ou mais elementos da experiência disponível como critério de rejeição de uma bissociação.
Contextualização	Menção ao contexto sócio histórico que envolve o estado do conhecimento.
Manifestação de aceitação	Manifestação de aceitação de uma bissociação.
Manifestação de rejeição	Manifestação de rejeição de uma bissociação.
Reconfiguração	Modificação do quadro da experiência disponível.
Literalização	Estágio final de uma metáfora epistêmica exitosa.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A categoria denominada por *Experiência disponível* diz respeito a base empírica vigente em uma determinada época, bem como a percepção que a comunidade científica tem acerca da mesma, suas interpretações e metodologias. Leva em conta também o quadro teórico conceitual e seus formalismos, validados e vigentes no interior da comunidade científica (PALMA, 2015), enfim, o cenário teórico experimental e seu papel regulador na comunidade científica. Desse modo, os SA que fizerem menção direta ou indireta ao cenário teórico experimental e/ou seu papel regulador serão classificadas nesta categoria, constituindo evidência desta característica das ME.

As categorias analíticas definidas por *Critério de aceitação* e *Critério de rejeição* possuem finalidades simétricas. Serão classificados nestas categorias os SA que evidenciarem o uso de elementos da experiência disponível como critérios para aceitação/rejeição de processos bissociativos. Notemos uma sutil diferenciação entre estas duas categorias e a categoria da *Experiência disponível*. Nesta, iremos classificar SA que mencionem elementos que constituem a base empírica, teorias, conceitos, formalismos, metodologias, etc., ou seja, tudo que permita (re)construir o quadro da experiência disponível à época, sem empregá-los como critério de julgamento.

A categoria denominada por *Contextualização* diz respeito ao contexto sócio histórico

de uma época, o qual pode influenciar os processos científicos (FLECK, 2010; KUHN, 1968; PALMA, 2015). Como afirma Palma (2015), em um dado momento histórico estão disponíveis um conjunto limitado de ME, candidatas à imagens legítimas da sociedade e do mundo. Buscaremos traços deste contexto em fontes historiográficas, a partir das quais iremos classificar nesta categoria os SA que fizerem menção direta ou indireta ao contexto sócio histórico do período pertinente a nossa investigação.

As categorias que estamos denotando por *Manifestação de aceitação* e *Manifestação de rejeição* relacionam-se aos juízos de valor realizados pelos membros de uma comunidade científica, em resposta à proposição de MEIC, refletindo o conjunto de compromissos lógicos, formais, metodológicos e epistêmicos desta comunidade. Os processos de bissociação, uma vez materializados e difundidos, geram tensões no meio em que circulam, uma vez que os membros da comunidade científica pertinente irão manifestar-se – concordando ou objetando, parcial ou integralmente. Dessa forma, SA que possibilitem identificar manifestações destas tensões serão classificados nestas categorias analíticas. Devemos aqui ressaltar uma importante sutileza. Os juízos de valor podem, em alguns casos, estar relacionados ao quadro teórico experimental, mas não devem ser confundidos com ele. Além disso, um determinado quadro teórico experimental pode ser empregado por um grupo de cientistas como critério para negação de uma dada proposição, mas ser ignorado ou empregado como critério de aceitação por outro grupo, uma vez que podem entrar em jogo outros elementos decisórios, como diferentes concepções epistêmicas ou valores não necessariamente compartilhados por todos os membros de uma dada comunidade científica. Dito de outro modo, a *Experiência disponível* diz respeito a configuração teórico experimental, ao estado do saber no interior de uma comunidade científica, enquanto as *Manifestações de aceitação/rejeição* dizem respeito as atitudes manifestas por membros de uma comunidade científica frente a proposição de uma ME, reguladas pelo quadro da experiência disponível, é verdade, mas não exclusivamente por este. As manifestações de aceitação/rejeição geralmente – mas não necessariamente – estarão acompanhadas de algum critério que as tenha motivado. Desse modo, os SA que exprimem tais manifestações dos membros de uma dada comunidade científica constituirão evidência desta característica dos processos de ME.

Todo processo exitoso de ME sempre inaugura uma novidade conceitual, podendo enriquecer ou reconfigurar a base empírica (PALMA, 2015). Assim sendo, a categoria denominada por *Reconfiguração* diz respeito às mudanças provocadas por uma MEIC no quadro lógico formal, metodológico ou empírico de uma dada comunidade científica. Desse modo, as modificações decorrentes de MEIC ou a presença de ideias precursoras de MEIC,

identificadas em SA, constituirão evidência do efeito produzido pelas MEIC (ou de ideias precursoras) no quadro da experiência disponível.

O processo de literalização de uma ME ocorre ao longo do tempo e sua consumação corresponde ao estágio final de toda ME exitosa; consiste na ocultação do caráter metafórico de uma metáfora (TURBAYNE, 1974). Este processo, conforme indicamos, não é pontual e desse modo não é possível determinar quando e onde ele ocorre. Dito de outro modo, a aceitação de uma novidade conceitual por uma dada comunidade científica não pode ser identificada sincronicamente. No entanto, é possível identificar a tendência de aceitação referente a uma dada novidade conceitual, bem como o estágio final da MEIC (sua literalização), quando a mesma perde o vínculo com suas origens (PALMA, 2015), incorporando-se à experiência disponível, um conhecimento estabilizado em sua última instância, atingindo o status de conhecimento a ser ensinado para as futuras gerações de cientistas por meio dos manuais. Assim sendo, a identificação de SA que permitam evidenciar a formação de uma tendência de estabilização, associada a capacidade de reconfiguração positiva da experiência disponível, ou a identificação de sua última instância (sua presença nos manuais), constituirão evidência do processo de literalização, em andamento ou já consumado, e serão classificados na categoria que denominamos por *Literalização*.

3.3 ANÁLISE DA HISTORICIDADE DO CONCEITO DE SPIN DO ELÉTRON

Nesta seção buscaremos evidenciar os elementos que estruturam o conceito de MEIC, empregando as categorias analíticas apresentadas no Quadro 2 para categorizar SA (segmentos analíticos: parágrafos, frases, orações, sentenças ou equações) presentes em documentos históricos e obras historiográficas, relacionadas ao conceito de spin do elétron.

Reafirmando, o objeto metafórico proposto por Palma (2005, 2009, 2015) será por nós apropriado como uma noção hipótese aplicada ao campo de conhecimento da Física, considerando, desse modo, um contexto intracientífico; nesta seção trataremos de verificar a plausibilidade das MEIC, o que implica em algumas particularidades adicionais, em especial para o campo da Física, as relações de coerência lógica entre as ideias científicas, o formalismo matemático e a descrição/interpretação dos experimentos, inerentes ao campo de conhecimento que estamos considerando.

Apresentamos, a seguir, a reconstrução histórica do conceito de spin do elétron, a

partir de SA extraídas de diferentes materiais textuais, os quais serão classificados de acordo com as categorias analíticas do Quadro 2. Nosso objetivo, como já mencionado, é evidenciar elementos conceituais do processo de MEIC, tal como definimos anteriormente. Os SA serão identificados numericamente a partir de uma sequência progressiva, conforme a ordem em que forem apresentados. Após a sua apresentação, segue-se a justificativa para a referida categorização e/ou comentários adicionais. Equações, expressões ou desenvolvimentos matemáticos importantes para a discussão serão identificados com dois dígitos: o primeiro relacionado ao capítulo desta seção e o segundo relacionado a ordem crescente de apresentação.

Inicialmente iremos ressaltar alguns aspectos que julgamos importantes, constatados durante a análise do percurso histórico referente ao episódio da construção do conceito de spin do elétron. Consideramos que estes aspectos devem ser ressaltadas antecipadamente, a fim de oferecer um melhor entendimento da noção de MEIC. Nossa intenção é estabelecer previamente o cenário no qual as ideias de Niels Bohr (1885-1962) – seu modelo, postulados e princípios estabelecidos no âmbito da velha mecânica quântica – constituem um quadro conceitual de referência para a proposição de MEIC. Como veremos, estas metáforas contribuem para especializar o quadro conceitual da velha mecânica quântica, culminando com a elaboração do conceito de spin do elétron, em termos do cenário fenomenológico estabelecido pela espectroscopia da época.

Nossa análise sugere que em nível intracientífico as metáforas epistêmicas, além do caráter inovador que possuem, podem também apresentar um efeito cumulativo, isto é, na busca pela solução de um dado problema, sucessivos processos metafóricos, apesar de inaugurarem novas perspectivas a partir de bissociações inéditas, podem também incorporar alguns elementos de processos metafóricos anteriores. Em suma, toda MEIC é potencialmente capaz de reconfigurar o quadro da experiência disponível, em maior ou menor grau. Resulta deste potencial efeito cumulativo, um conjunto de conhecimentos, práticas e interpretações que pode agregar/modificar/ajustar o pano de fundo que orienta os trabalhos da comunidade científica como um todo.

Conforme iremos mostrar, o problema que exigiu a proposição do conceito de spin do elétron relacionava-se com a observação de anomalias no espectro óptico de certos elementos químicos, o denominado efeito Zeeman anômalo. Esta problemática estava inserida em um contexto teórico experimental fortemente demarcado pelo modelo atômico de Bohr para o átomo de hidrogênio e por outros aspectos conceituais mais profundos, defendidos pela escola de Copenhagen, que tinha em Niels Bohr o seu maior representante.

O modelo de Bohr fora proposto em 1913 para solucionar o problema da instabilidade presente no modelo atômico de Rutherford, bem como oferecer uma explicação para o espectro óptico do átomo de hidrogênio (EISBERG; RESNICK, 1985a). O modelo permitia calcular os níveis de energia do átomo de hidrogênio em boa concordância com as observações experimentais. Além disso, o modelo foi capaz de prever a existência de linhas espectrais que foram posteriormente observadas experimentalmente.

O modelo de Bohr combina a física clássica e as ideias inovadoras sobre a quantização da energia que surgiram no início do século XX. Levando em conta alguns aspectos da ideia de quantização da energia proposta por Planck em 1900, Bohr postulou que a energia do elétron girando em torno do núcleo deveria ser quantizada a partir de conjunto limitado de órbitas circulares de tamanho definido, em oposição à infinidade de órbitas possíveis segundo a física clássica. Além disso, os processos de emissão e absorção de luz pelo átomo levam em conta a ideia da quantização da luz, proposta por Einstein em 1905. Combinar a física clássica com as ideias da quantização constitui o processo bissociativo da MEIC realizada por Bohr.

Apesar de bem sucedido, o bom desempenho do modelo ocorria apenas dentro de certos limites, indicando a necessidade de adequações. Importantes modificações foram introduzidas por Sommerfeld que, além das órbitas circulares de Bohr, levou em conta a possibilidade dos elétrons moverem-se em órbitas elípticas; adicionalmente incorporou a correção relativística para a massa dos elétrons. Ao proceder deste modo, foi possível obter a correta descrição de certos desdobramentos observados nas linhas espectrais do átomo de hidrogênio. O modelo de Sommerfeld incorpora vários aspectos do modelo de Bohr, mas agrega novos elementos da física clássica – órbitas de diferentes formatos – e aspectos da teoria da relatividade de Einstein (EISBERG; RESNICK, 1985a). Trata-se de um processo bissociativo inédito em alguns aspectos, mas não em todos; contém elementos do processo bissociativo anteriormente proposto por Bohr.

Como veremos, este aspecto cumulativo irá permear a proposição de novas metáforas epistêmicas. Neste sentido, a problemática do efeito Zeeman anômalo estimulou a proposição de inovações cada vez mais complexas e especializadas e, dentre avanços e retrocessos, um certo modo de proceder foi pouco a pouco consolidando-se. O princípio da correspondência, proposto por Bohr em 1923, sintetiza, de certo modo, um conjunto de práticas e procedimentos a ser empregado na descrição dos átomos, tornando-se um importante elemento balizador das metáforas epistêmicas que irão surgir como candidatas à solução do problema relacionado à anomalia Zeeman.

Assim, no processo de construção do conceito de spin do elétron o que se vê é a

sucessiva proposição de MEIC que embora incorporem, em maior ou menor grau, elementos das MEIC antecessoras, são guiadas por um quadro conceitual fortemente demarcado pelo princípio da correspondência. Em suma, isto implica no uso recorrente de imagens de sistemas clássicos para interpretar os sistemas quânticos, culminando com a proposição da metáfora epistêmica do elétron auto rotativo, isto é, conduziu ao conceito do spin do elétron em termos puramente clássicos. No entanto, logo em seguida o spin do elétron veio a ser compreendido como um grau de liberdade de sistemas quânticos sem correspondência com qualquer conceito clássico conhecido, colocando sob suspeita a validade do princípio da correspondência proposto por Bohr (GIULINI, 2008).

A proposição da ideia do spin do elétron foi oficialmente realizada no ano de 1925, com a publicação científica de George Eugene Uhlenbeck (1900-1988) e Samuel Goudsmit (1902-1978), muito embora os eventos científicos que influenciaram as ideias sobre o conceito de spin estejam inicialmente relacionadas ao Efeito Zeeman e a teoria de Bohr para o espectro do átomo de hidrogênio (TOMONAGA, 1997, p. 1).

O átomo de hidrogênio era bem descrito pela teoria de Bohr, mas esta falhava categoricamente, por exemplo, para o elemento hélio que era o átomo mais simples depois do hidrogênio. De acordo com Kragh (1999), no período de 1918 a 1922 vários cientistas – Bohr e Kramers em Copenhague, Edwin Kemble e John Van Vleck em Harvard, Alfred Lande em Frankfurt am Main, e James Franck e Fritz Reiche em Berlim – buscaram soluções para o espectro do hélio empregando a teoria quântica desse período, a partir de diferentes métodos e abordagens, obtendo resultados igualmente decepcionantes; a inadequação tornava-se ainda mais evidente nas tentativas de descrever o efeito Zeeman anômalo, levando paulatinamente ao reconhecimento de que a mecânica quântica, tal como formulada, necessitaria de alguma modificação profunda (KRAGH, 1979), uma vez que nenhum dos cientistas envolvidos foi capaz de justificar seus resultados em termos da teoria quântica vigente. Por fim, a situação de crise tornou-se inevitável:

Em 1924, o acúmulo de anomalias experimentais, juntamente com uma insatisfação generalizada com a estrutura conceitual e lógica da teoria quântica existente, criou uma situação de crise na pequena comunidade de físicos atômicos. Vários físicos concluíram que a teoria quântica de Bohr-Sommerfeld estava irremediavelmente errada e precisava ser substituída por alguma outra teoria. Por outro lado, dados seus muitos sucessos, a “velha” teoria dificilmente poderia estar completamente errada e era geralmente esperado que se relacionasse com a nova teoria quântica, de alguma forma semelhante (KRAGH, 1979, p. 159, grifo do autor).

O desenvolvimento dos estudos relacionados com a física atômica foram predominantemente realizados em três grandes centros, liderados por físicos renomados e seus colaboradores: Munich – Sommerfeld –, Göttingen – Born – e Copenhague – Bohr – (KRAGH, 1979). Deve-se ressaltar que a questão dos multipletos (como era denominado o efeito Zeeman anômalo) envolve também uma disputa no campo das interpretações e representações dos fenômenos quânticos segundo a *velha mecânica quântica*, à qual engloba todas as teorias quânticas anteriores à formulação das mecânicas, matricial (de Heisenberg) e ondulatória (de Schödinger). De um lado, a tradição do instituto de Física teórica em Copenhague, inaugurado em 1921 e liderado por Bohr, cujas descrições para o problema dos multipletos girava em torno do princípio da correspondência; do outro, Sommerfeld “e seus alunos prodígios” – Heisenberg e Pauli – e Landé, cuja metodologia era pautada por regras de seleção (DARRIGOL, 2001, p. 340), o que de certo modo não implicava em conceber imagens sobre a constituição atômica. No entanto, conforme relatado por Forman (1968), nenhuma destas correntes era capaz de, sozinha, dar conta da problemática dos multipletos – cada qual oferecia descrições relativamente boas, onde a outra não era bem sucedida. Neste contexto, por volta de 1925, a espectroscopia experimental ocupava-se de dois grandes problemas: as complexidades envolvidas no fenômeno do efeito Zeeman anômalo e o ordenamento dos espectros de raio-X para explicar o ordenamento periódico dos elementos químicos (BUCHWALD; WARWICK, 2001).

A questão da qual derivou o conceito de spin do elétron estava relacionada à descrição da estrutura complexa, decorrente do efeito Zeeman anômalo, do espectro dos átomos de elementos alcalinos (mas não somente), cuja definição será útil para nossos propósitos: “Um átomo alcalino se constitui, em essência, de um *caroço de gás nobre* inerte mais um único elétron que se move numa subcamada externa” (EISBERG; RESNICK, 1985a, p. 444, grifo nosso). Esta era uma importante analogia à época, visto que todo o conhecimento acumulado sobre o átomo de hidrogênio poderia – assim acreditava-se –, ser empregado para a descrição do espectro óptico dos átomos alcalinos.

De acordo com a teoria de Bohr, os espectros alcalinos se originam por um mecanismo que difere daquele do espectro de hidrogênio essencialmente apenas em um aspecto: o elétron óptico (elétron de valência) se move em um campo que, devido à influência dos elétrons internos ou centrais, é não estritamente coulombiano (JAMMER, 1989, p. 124).

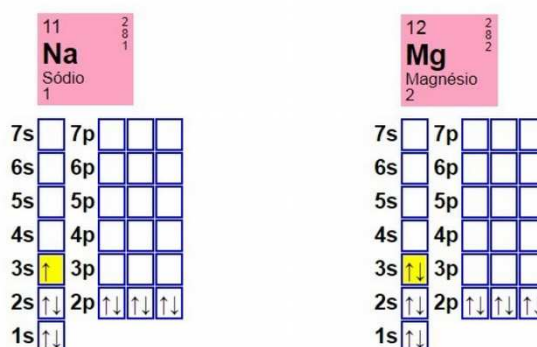
Destacamos aqui um aspecto importante relacionado à terminologia que usaremos em nossa explanação. Várias obras fazem referência ao caroço utilizando o termo em inglês “core” (EISBERG; RESNICK, 1985b, p. 349), cuja tradução livre é núcleo. Porém, este não deve ser confundido com o núcleo atômico, que no contexto histórico de nossa análise diz respeito a configuração de cargas positivas do átomo, segundo a interpretação de E. Rutherford para o experimento de Geiger-Marsden (SANTANA; DOS SANTOS, 2017), para o qual utiliza-se o termo em inglês “nucleus” (EISBERG; RESNICK, 1985b, p. 90), cuja tradução livre também é núcleo. Para evitar a ambiguidade deste termo, em nosso texto empregaremos o termo caroço em referência ao núcleo atômico acrescido das camadas eletrônicas internas totalmente preenchidas – elétrons do núcleo, ou “core electrons” (TOMONAGA, 1997, p. 2), dos átomos de elementos alcalinos.

A Figura 2 ilustra a distribuição eletrônica de dois elementos químicos, um alcalino e outro alcalino terroso. Na figura, cada um dos quadrinhos representa um estado quântico, atualmente definido por quatro números quânticos. Os níveis de energia são identificados de baixo para cima através da sequência numérica crescente; ao lado de cada um deles há uma letra que identifica o orbital em notação espectroscópica. Maiores detalhes acerca desta notação estão indicados nas expressões em (3.1) e em sua respectiva descrição, no parágrafo subsequente.

Considerando apenas as excitações do único elétron na última subcamada dos átomos de elementos alcalinos e alcalinos terrosos ionizados, buscava-se descrever o espectro óptico gerado a partir das transições do referido elétron para as camadas superiores, tomando por base a teoria vigente para o átomo de hidrogênio (TOMONAGA, 1997), cuja descrição era essencialmente baseada na teoria de Bohr e seus aperfeiçoamentos (JAMMER, 1989).

No fenômeno considerado, a aplicação de um campo magnético externo sobre uma amostra atômica ocasionava desdobramentos nas linhas espectrais, configurando o então denominado efeito Zeeman anômalo, que em linhas gerais pode ser entendido como “as anomalias na divisão de linhas espectrais emitidas por átomos colocados em um campo magnético” (FORMAN, 1968, p. 159), o qual constituiu uma importante “peça do quebra cabeça” relacionado ao spin do elétron (cf. MARTIN, 2002, p. 4). O efeito Zeeman trouxe à luz um novo conjunto de fatos que influenciou a Física, a Química e a Astronomia, e seu entendimento teve grandes implicações para o desenvolvimento conceitual da teoria quântica (JAMMER, 1989).

Figura 2 - Distribuição eletrônica do elemento alcalino Sódio-Na (esquerda) e alcalino terroso Magnésio-Mg (direita), pertencentes aos grupos 1 e 2 do terceiro período da tabela periódica.



Fonte: elaborado pelo autor, a partir do sítio <<https://www.ptable.com/?lang=pt>>, em 15/08/2019.

Atribui-se à Michael Faraday (1791-1867) as primeiras tentativas de verificar do efeito de campos magnéticos sobre a luz. Suas primeiras confirmações vieram com o estudo da polarização da luz, que em “1845 o convenceu da existência de uma relação íntima entre fenômenos ópticos e magnéticos” (JAMMER, 1989, p. 118).

Nas décadas seguintes, Faraday e outros cientistas buscaram, sem sucesso, identificar influências de campos magnéticos na formação de linhas espectrais. Apesar do insucesso das investigações iniciais, em 1896 Peter Zeeman (1865-1943) obteve a constatação experimental da influência de campos magnéticos na formação dos espectros (FORMAN, 1970), e assim, “dez anos depois de Hertz demonstrar o papel fundamental das forças elétricas e magnéticas para a propagação da luz, Zeeman estabeleceu seu papel também para a produção de luz” (JAMMER, 1989, p. 119).

A interpretação teórica para os primeiros resultados publicados de Zeeman foi dada pelo físico holandês Hendrik Lorentz (1853-1928), que percebeu a possibilidade de interpretar os dados experimentais a partir de sua teoria do elétron – de acordo com Jammer (1989), os resultados de Lorentz já haviam sido obtidos anteriormente por Joseph Larmor (1857-1942). A descrição de Lorentz para o fenômeno levou à algumas previsões sobre a polarização da luz decorrente do fenômeno em questão, o que foi de fato confirmado por Zeeman em observações posteriores (JAMMER, 1989). Deve-se ressaltar que a teoria de Lorentz considerava “partículas de *ions* carregadas negativamente contidas em átomos” (DUNCAN; JANSSEN, 2019, p. 318, grifo do autor).

Até meados do ano de 1897 pensava-se haver um quadro teórico experimental bem estabelecido para o efeito Zeeman. Contudo, em dezembro do mesmo ano novos resultados experimentais foram publicados e confirmados, respectivamente por Preston e Cornu,

revelando que o padrão inicialmente estabelecido para o efeito Zeeman era incompleto. Conforme Jammer:

A observação de Preston sobre o que foi posteriormente chamado de “efeito Zeeman anômalo” - em contraste com o “efeito normal” que “está de acordo” com a teoria - foi logo confirmada por Cornu, que mostrou que o componente central do “triplete” da linha D_1 no espectro de sódio era realmente um duplete e que cada componente do “triplete” da linha D_2 também era um duplete ou, em outras palavras, que a linha D_1 era um quadruplete e a linha D_2 um sextuplete. De 1898 em diante, quando Lorentz tentou sem sucesso interpretar as observações de Preston e Cornu generalizando sua teoria do efeito normal, até o final da teoria quântica mais antiga, o efeito Zeeman anômalo permaneceu um problema não resolvido (JAMMER, 1989, p. 121, grifos do autor).

Nos primeiros anos do séc. XX o uso de instrumentos ópticos de alta precisão estabeleceu em definitivo que os desdobramentos de linhas espectrais inicialmente observados por Zeeman correspondiam a exceção e não a regra, e muitos dos avanços para compreender as regularidades da anomalia deve-se a atuação de Carl Runge (1856-1927) e Louis Paschen (1865-1947), no período de 1900 a 1902, com destaque para o que é conhecido como regra de Preston: “todas as linhas de uma determinada série e das séries correspondentes em elementos com espectros análogos, mostram o mesmo padrão de divisão” (FORMAN, 1970, p. 179).

Até meados da década de 1910 uma grande quantidade de dados espectrais permitiu estabelecer um conjunto de padrões para os desdobramentos das linhas espectrais para diversos elementos da tabela periódica. A medida que as técnicas foram aprimoradas e os espectros eram observados com maior resolução e para uma quantidade cada vez maior de elementos químicos, ficou claro que a explicação clássica de Lorentz para o efeito Zeeman era bastante limitada (DUNCAN; JANSSEN, 2019). Estes padrões de divisão, de um modo geral denominados de multipletos, apresentavam determinadas regularidades dependendo da família a qual os elementos em questão pertenciam, dentre os quais destacamos os dupletos obtidos a partir dos elementos alcalinos e os tripletos obtidos a partir dos alcalinos terrosos, tal como ilustrado na Figura 4.

Este período também é marcado pelos avanços no estudo de modelos atômicos, com destaque para a teoria de Niels Bohr (1885-1962), o qual é acompanhada pela proposição de um novo quadro teórico conceitual, precursor na mecânica quântica. A este respeito levantou-se a questão “se o novo arsenal de conceitos também poderia ser aplicado ao efeito Zeeman e, em caso afirmativo, se o esclarecimento completo poderia então ser alcançado” (JAMMER,

1989, p. 122), mas “nem o tratamento relativista de Sommerfeld do efeito Zeeman melhorou a situação” (JAMMER, 1989, p. 123).

O envolvimento de Arnold Sommerfeld (1868-1951) tornou-se substancial logo após a descoberta do efeito Paschen-Back, em 1912. Neste fenômeno, as linhas espectrais que se obtém no efeito Zeeman anômalo apresentam então um novo padrão de divisão, reduzindo-se à tripletos normais, descritos pela teoria de Lorentz (BUCHWALD; WARWICK, 2001).

O efeito Paschen-Back consiste na aplicação de um campo magnético suficientemente intenso para produzir o desacoplamento entre o momento angular orbital e o momento angular de spin dos elétrons. Desacoplados, a quantidade de estados de energia possíveis apresenta-se em menor número. No efeito Zeeman anômalo, o campo magnético aplicado não é suficientemente intenso, de modo que o momento angular orbital permanece acoplado ao momento angular de spin, resultando em uma quantidade maior de estados de energia possíveis, isto é, uma quantidade maior de desdobramentos das linhas espectrais (EISBERG; RESNICK, 1985a). A Figura 3 ilustra a representação vetorial para os dois efeitos, Zeeman e Paschen-Back, onde \vec{J} representa o momento angular total e \vec{B} o campo magnético aplicado.

O efeito Paschen-Back foi amplamente observado e documentado por Paschen e Ernest Back (1881-1959) por meio de dois artigos publicados em 1912 e 1913 (DUNCAN; JANSSEN, 2019), fornecendo uma nova e importante informação: a intensidade necessária ao campo magnético aplicado para que reduzisse a estrutura de multiplete ao comportamento normal (triplete) era inteiramente dependente da separação de energia do multiplete original na ausência de campo magnético.

Até o surgimento da equação proposta por Erwin Schrödinger (1887-1961), em 1925, os sistemas atômicos eram ainda tratados em um quadro clássico suplementado pelas regras de quantização estabelecidas segundo o modelo de Bohr-Sommerfeld (COMMINS, 2012), que para o átomo de hidrogênio era capaz de fornecer resultados em boa concordância com vários dados experimentais, incluindo a estrutura fina do átomo de hidrogênio (SETH, 2013), sem que se soubesse ser esta concordância acidental (EISBERG; RESNICK, 1985a).

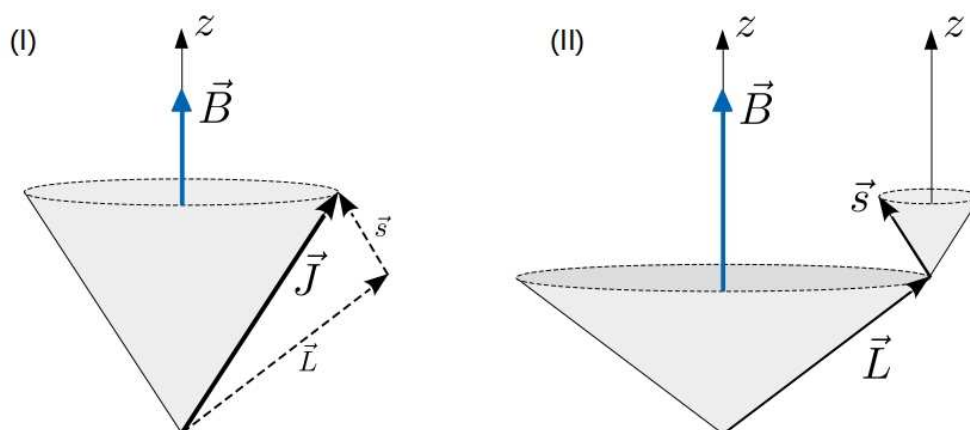
De acordo com a teoria de Bohr, os estados de energia do átomo de hidrogênio, ou seja, suas linhas espectrais, poderiam ser descritas a partir de três números quânticos¹³: o número quântico principal n ; o número quântico de momento angular k (em unidades de \hbar) e; o número quântico magnético m (TOMONAGA, 1997). Os números quânticos, todos inteiros, obedeciam as seguintes regras de subordinação:

¹³ De acordo com Tomonaga (1997, p. 1) o número quântico n era empregado por Bohr e os números quânticos k e m foram introduzidos por Sommerfeld; de acordo com Martin (2002, p. 3) atualmente utiliza-se a notação ℓ ao invés de k ; ao longo do texto manteremos a notação utilizada por Tomonaga (1997).

$$\begin{aligned}
 n &= 1, 2, 3, 4, 5\dots \\
 k &\leq n \\
 -k &\leq m \leq +k
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Como já mencionado, “foi descoberto, entretanto, que os termos determinados por n e k não são únicos, mas são compostos de muitos níveis espaçados próximos; em outras palavras, eles têm estrutura de multipletos” (TOMONAGA, 1997, p. 2).

Figura 3 - (I) Efeito Zeeman: campo magnético de baixa intensidade, insuficiente para desacoplar os momentos angulares orbital, \vec{L} , e de spin, \vec{s} ; o momento angular total, \vec{J} , precessiona em torno da direção de \vec{B} ; (II) efeito Paschen-Back: campo magnético suficientemente intenso para desacoplar os momentos orbitais angular e de spin; desacoplados, cada um dos momentos angulares irá precessionar em torno da direção de \vec{B} .



Fonte: elaborado pelo autor, com base em “Paschen-Back Effect” (HYPERPHYSICS, 2021). Disponível em: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/paschen.html>>. Acesso em: 03/11/2021.

A título de ilustração do problema, tomemos os exemplos citados por Tomonaga (1997), para o Sódio (Na) e o Manganês (Mg), os quais ilustramos na Figura 4. Para o caso dos átomos alcalinos, os orbitais P , D , e F são todos dupletos; já o orbital S , embora seja um singlete, quando sujeito a um campo magnético externo, a correspondente linha espectral exibe um comportamento de duplete – este potencial comportamento de duplete é indicado pelo valor “2” subscrito, presente na nomenclatura dos orbitais, o qual especifica, nesta notação, tal multiplicidade.

Para o caso dos átomos alcalinos terrosos, mais especificamente para o elemento Mg, pode-se verificar um grupo de orbitais que não apresenta espaçamentos entre os níveis, mesmo na presença de campos magnéticos – um autêntico singlete – e outro grupo que apresenta espaçamentos entre as linhas espectrais, configurando um grupo de tripletos. O

orbital S pertencente ao grupo dos tripletos somente apresenta este comportamento quando sujeito a ação de um campo magnético aplicado. O potencial comportamento de tripleto da camada S deste grupo é indicado pela sua multiplicidade, dada pelo valor “3” subscripto.

No modelo atômico de Bohr-Sommerfeld o número quântico n determina o tamanho da órbita do elétron e o número quântico k determina a forma da órbita (em unidades de \hbar) (TOMONAGA, 1997); o número quântico m indica a componente do vetor momento angular \mathbf{k} ao longo de uma direção arbitrária, comumente definida ao longo do eixo vertical z (MARTIN, 2002). De (3.1) segue-se que para um dado valor de k haverá $2k + 1$ valores para m ¹⁴, sendo este o número de direções possíveis ao vetor momento angular \mathbf{k} (e para sua projeção ao longo do eixo vertical z), fato este que ficou conhecido à época como a *quantização espacial do momento angular*¹⁵ (BUSCH; SCHROECK, 1989; EISBERG; RESNICK, 1985b; JAMMER, 1989, grifo nosso).

A formação de multipletos nos espectros dos átomos alcalinos evidenciou a necessidade de um quarto número quântico. Diante do quadro teórico experimental constituído para o átomo de hidrogênio e para a estrutura complexa dos espectros decorrente do efeito Zeeman anômalo, terá início o processo que culminará, como veremos, com a conceituação do spin do elétron.

Um aspecto importante a ser destacado diz respeito às contribuições de Sommerfeld ao modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio, que levava em conta correções relativísticas para a massa do elétron. A inclusão de elementos da Teoria da Relatividade Restrita na descrição do átomo constituiu uma MEIC que alterou o quadro da experiência disponível, tornando-se uma influência imprescindível para a construção do conceito de spin do elétron, como mostraremos em breve.

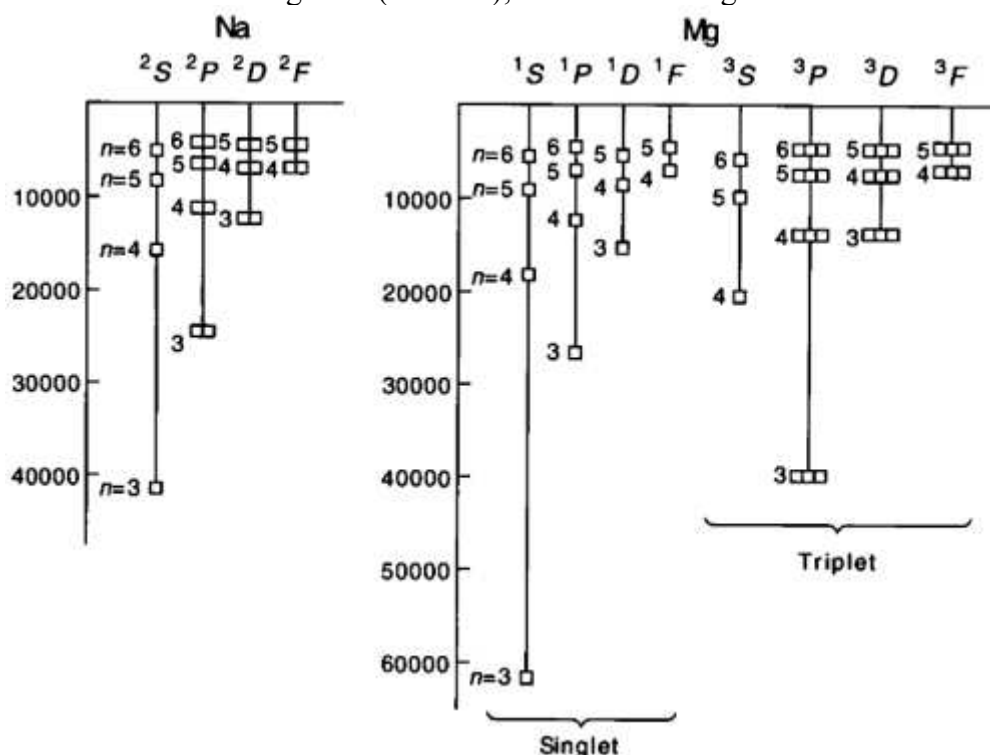
No campo da espectroscopia, os avanços técnicos permitiram colocar a fenomenologia do efeito Zeeman sob um conjunto de dados experimentais abrangente e bem estabelecido. Contudo, conforme relata Forman (1970), o conhecimento empírico do fenômeno dos multipletos somente se consolidaria ao final segunda década do séc. XX, período no qual sucessivos avanços observacionais, acompanhados de pequenos e sucessivos avanços descritivos, iriam colocar o fenômeno em um quadro experimental completo, descrito por um conjunto de regras empiricamente estabelecidas, mas sem uma derivação teórica – não se “sabia realmente a que fenômeno físico atribuir a presença de estrutura complexa”

14 Considerando $n = 2$, tem-se $k = 0, 1, 2$ e para um dado valor de k , digamos 2, segue-se que $m = -2, -1, 0, +1, +2$.

15 O experimento de Stern-Gerlach foi originalmente proposto para verificar a quantização espacial do momento angular. Posteriormente este experimento foi reinterpretado e apenas então foi devidamente relacionado com a questão do spin do elétron. Para uma descrição completa, ver Weinert (1995).

(FORMAN, 1970, p. 185) dos multipletos decorrentes do efeito Zeeman anômalo.

Figura 4 - Termos espectrais para o elemento alcalino Sódio (à esquerda) e para o elemento alcalino terroso Magnésio (à direita); a escala de energia adotada é cm^{-1} .



Fonte: tal como apresentado por Tomonaga (1997, p. 3).

A proposição de regras de seleção como tentativa de generalizar e padronizar os multipletos recebeu contribuições de vários cientistas, dentre as quais, algumas produziram avanços marcantes. Merecem destaque as contribuições de Sommerfeld, que originalmente propôs a adoção de “um número quântico interno, talvez correspondendo a uma rotação oculta” (Sommerfeld apud FORMAN, 1970, p. 191) – Sommerfeld reconhece um completo desconhecimento à respeito da interpretação geométrica para este novo número quântico (cf. BUCHWALD; WARWICK, 2001) e a este respeito, Jammer relata que:

A evidência espectroscópica agora mostra que em tais multipletos nem todas as linhas estão presentes [...]. Esse não aparecimento de certas linhas foi para Sommerfeld uma pista importante. Pois isso sugeria a ele a operação de um princípio de seleção ainda indeterminado, que proíbe o aparecimento de linhas de outra forma permissíveis. A fim de descobrir esse princípio de seleção, ele atribuiu provisoriamente a cada termo espectral um número de qualificação [...] que chamou de “número quântico interno” [...] (JAMMER, 1989, p. 125, grifos do autor).

(1)

Neste SA, Jammer relata a origem da proposição do quarto número quântico – e uma possível interpretação para ele –, a respeito do qual será necessário estabelecer o significado

físico. Importa ressaltar que a proposição de mais um número quântico é orientada pelo quadro fenomenológico, ou seja, pelas dados experimentais. Como veremos, a proposição de um quarto número quântico irá orientar a comunidade científica – em especial, Landé e Back – na busca pela solução do quebra-cabeças dos multipletos. Desse modo, o referido SA evidencia que há um contexto teórico experimental no qual a comunidade científica está inserida e que à influencia. Deste modo, pode ser classificado na categoria da *Experiência disponível*.

Nos trabalhos de Sommerfeld há uma mudança de postura importante a ser considerada. Antes do advento da mecânica ondulatória de Schrödinger e da mecânica matricial de Heisenberg, os procedimentos para tratar quanticamente sistemas de interesse – dentre estes, os átomos – consistia em aplicar a mecânica clássica e um conjunto de regras de quantização. No entanto, esta forma de proceder começou a apresentar algumas limitações.

Em 1919, entretanto, Sommerfeld estava ficando desanimado com a falta de progresso que ele e seus alunos estavam fazendo, usando o que podemos chamar de abordagem *a priori* para explicar os espectros de átomos e moléculas. Nessa abordagem, iniciava-se com um modelo definido do sistema atômico, em seguida, aplicando a mecânica clássica e as regras de quantização, calculava-se os estados estacionários. Só no final se tentou identificar as diferenças de energia e permitir as transições entre esses estados com as linhas espectrais observadas. [...] Evidentemente, Sommerfeld se convenceu de que, se o teórico quisesse voltar aos trilhos, além de restabelecer o contato próximo com o experimento, ele teria de adotar uma abordagem diferente. Essa nova abordagem, que Sommerfeld e seus alunos começaram a aplicar aos espectros ópticos e de raios-X em 1919, 1920 e 1921, podemos chamar de *a posteriori*. Tudo começou com as linhas espectrais observadas e voltou aos níveis de energia. Esses níveis foram então caracterizados por números quânticos e regras de seleção - inventadas *ad hoc*, se necessário (FORMAN, 1970, p. 186, grifos do autor). (2)

Como vemos, o SA (2) evidencia uma mudança de postura iniciada por Sommerfeld no que diz respeito à forma de descrever os sistemas quânticos. Conforme já mencionado anteriormente, a descrição destes sistemas era amplamente pautada pela aplicação da mecânica clássica associada a um conjunto de regras de quantização, uma forma de proceder que se inicia com Bohr, na elaboração de seu modelo para o átomo de hidrogênio, e deste então vinha se firmando como um modo padrão de proceder, que viria a tomar-se ainda mais proeminente na forma do princípio da correspondência. Desse modo, a mudança assumida por Sommerfeld e seu grupo é um movimento que vai em direção a uma ruptura com esta forma de proceder. Assim, o referido SA pode ser classificado na categoria da Experiência disponível, já que o mesmo evidencia aspectos relacionados ao estado do conhecimento num dado momento.

Sommerfeld buscou estabelecer as regras empíricas para enquadrar os multipletos,

mas a partir delas não era possível uma descrição completa das linhas. Contudo, a ideia proposta por Sommerfeld de um número quântico interno irá atrair a atenção de Back e Alfred Landé (1888-1976). O experimentalista Back e o teórico Landé irão propor, cada qual e de maneira independente, um conjunto de regras empíricas para descrever a complexidade do efeito Zeeman anômalo. Apesar de uma breve e silenciosa disputa de bastidores pela prioridade na publicação, por fim foram as regras empíricas de Landé, “desvinculadas de quaisquer perspectivas teóricas” (FORMAN, 1970, p. 198), “uma série de regras empíricas, cuja interpretação geométrica ou dinâmica lhe escapa completamente” (FORMAN, 1970, p. 197), que ofereceram a correta descrição dos multipletos. Além das regras empíricas, Landé apresenta também uma interpretação teórica especulativa, a partir da qual irá sugerir que o número quântico interno proposto por Sommerfeld (DUNCAN; JANSSEN, 2019) corresponda ao momento angular total do átomo:

Os diferentes números quânticos “internos” de um termo [multiplete] provavelmente significarão simplesmente os números quânticos totais do átomo sobre seu eixo invariável para a orientação espacial diferente dos elétrons de valência ao redor do núcleo atômico, e a presença de vários grupos [...] em um padrão Zeeman significa, presumivelmente, várias orientações desse eixo invariável do átomo em relação ao campo magnético (LANDÉ apud FORMAN, 1970, p. 202). (3)

Ainda que tenha um caráter especulativo, a proposição de Landé implicará na adoção explícita de um modelo que lhe permitirá derivar uma equação para obter os desvios de energia relacionados aos dupletos dos átomos alcalinos – o modelo ERSATZ, como veremos adiante.

Devemos destacar que, em parte, Landé é influenciado por um artigo de Werner Heisenberg (1901-1976) publicado em 1922, onde este introduz um modelo mecânico que explicava os multipletos “com base em uma interação magnética entre o momento magnético produzido por um momento angular médio líquido do núcleo do átomo (ou seja, o átomo menos os elétrons de valência [o *caroço*]), e o campo magnético *interno* devido ao movimento orbital dos próprios elétrons de valência” (DUNCAN; JANSSEN, 2019, p. 346, grifos dos autores). O modelo aplicava-se satisfatoriamente para o caso mais simples dos multipletos, os dupletos alcalinos.

Adicionalmente, o aperfeiçoamento das regras de Landé indicavam linhas espectrais adicionais, que foram suprimidas por regras de seleção apropriadas, uma vez que não eram observadas experimentalmente. Contudo, este quadro mudou abruptamente, quando Paschen testava as regras empíricas de Landé e, na primavera de 1921, constatou que na presença de um campo magnético com intensidade adequada, até mesmo aquelas linhas propositalmente

excluídas pelas regras de seleção de Landé, apareciam (FORMAN, 1970). Estas observações experimentais conferiram à Landé, e posteriormente ao seu modelo ERSATZ, grande credibilidade; mas não unanimidade

Neste sentido, o SA (3) pode ser classificado na categoria da Experiência disponível, uma vez que estabelece um novo elemento conceitual – número quântico interno decorrente da adição de outros números quânticos. Além disso, como descrito, relaciona-se com dois aspectos importantes à respeito do estado do saber no interior da referida comunidade científica: os fatos empíricos estabelecidos e aceitos pela comunidade e o prestígio de Landé, que se estenderá ao modelo que irá propor.

Apesar da insistência de Paschen, Sommerfeld mostra-se resistente em aceitar as regras empíricas e as especulações teóricas de Landé, uma vez que isto implicaria inevitavelmente no abandono de certas regras empíricas bem sucedidas – antecedentes às de Landé – e no abandono das próprias regras de Sommerfeld (FORMAN, 1970). Assim, terá início a competição entre Landé e Sommerfeld pela correta descrição dos multipletos decorrentes do efeito Zeeman anômalo. Como veremos, um terceiro personagem terá importante papel nessa controvérsia, o físico austríaco Wolfgang Pauli (1900-1958). De acordo com Tomonaga:

No período compreendido entre 1922 e 1925 Sommerfeld, Landé e Pauli travaram uma disputa acirrada para explicar a multiplicidade do espectro óptico dos átomos alcalinos (e alcalinos terrosos ionizados) e o efeito Zeeman (TOMONAGA, 1997, p. 6) (4)

Neste SA, Tomonaga faz referência a base empírica e a controvérsia em torno do espectro óptico dos átomos de elementos alcalinos e do entendimento do fenomenológico do efeito Zeeman. Por mencionar a controvérsia e as discordâncias em relação a base empírica, o SA (4) pode ser classificado na categoria *Experiência disponível*.

A participação de Pauli, como veremos, é marcante para o episódio do spin do elétron, sobretudo pela sua grande imersão nos âmbitos teórico e experimental relacionados ao problema do spin. Trata-se de um especialista nos assuntos teóricos que serão mobilizados para resolver o quebra-cabeça do efeito Zeeman anômalo, dentre os quais, a relatividade e a velha mecânica quântica (cf. VON MEYENN; SCHUCKING, 2001). Além disso, o Princípio da Exclusão, originalmente enunciado por Pauli em 1925, “demonstrou uma conexão íntima entre a estrutura complexa dos espectros e a composição dos átomos” (BUCHWALD; WARWICK, 2001, p. 830).

Estes dois - Pauli e Heisenberg - foram os fenomenologistas por excelência no labirinto da espectroscopia (VON MEYENN; SCHUCKING, 2001, p. 46–47). (5)

O SA (5) evidencia as habilidades de Pauli e Heisenberg com relação a fenomenologia. Nota-se, portanto, certo reconhecimento e valorização do quadro empírico para a compreensão do problema relacionado ao spin, ali referido como o *labirinto da espectroscopia*. Neste sentido, o SA pode ser classificado na categoria da *Experiência disponível*.

Uma visão sobre as primeiras tentativas de modelar os átomos alcalinos é apresentada por Tomonaga:

[...] mesmo para átomos diferentes de H [hidrogênio], muitos termos espectrais correspondem a um estado excitado de apenas um elétron na órbita mais externa, que chamaremos de elétron radiante. (É claro que existem outros estados nos quais mais de um elétron está excitado, mas eles não serão discutidos aqui.) Agora podemos considerar aproximadamente que o elétron radiante está movendo-se em um campo elétrico criado pelos outros elétrons, que chamaremos elétrons do [*caroço*], e o núcleo atômico; portanto, podemos considerar provisoriamente o campo como esférico simétrico (TOMONAGA, 1997, p. 2). (6)

Notemos que Tomonaga faz referência a uma modelização útil para tratar os átomos de elementos alcalinos, embora limitada ao espectro produzido apenas a partir de transições do elétron da última camada para camadas superiores. Assim, o SA (6) pode ser classificado na categoria *Experiência disponível*, pois implicitamente leva em conta o que estava estabelecido para o átomo de hidrogênio, ou seja, o modelo de Bohr-Sommerfeld como já destacado anteriormente.

Em relação à modelização dos átomos de elementos alcalinos, conforme Tomonaga (1997, p. 9), caso o caroço não apresentasse uma simetria esférica, um eventual momento magnético associado a um momento angular do caroço poderia interagir com momento magnético do elétron na última camada, derivando dessa interação uma possível explicação para os desdobramentos observados nas linhas espectrais; algo como um efeito Zeeman interno, inerente ao átomo. Conforme relatado por Martin (2002), os físicos alemães Sommerfeld e Landé atribuíram o quarto número quântico ao caroço do átomo, ao passo que Pauli o atribuiu ao elétron radiante.

É importante ressaltar que a modelização do problema a partir de um efeito Zeeman interno já ocorrera anteriormente a proposição de Sommerfeld e Landé.

[...] uma interpretação de dupletos e tripletos devido a um efeito Zeeman interno já havia sido proposta em 1919 por Roschdestwensky. Com base em uma teoria, especialmente construída para esse fim, Roschdestwensky calculou a separação em duplete da primeira linha na série principal do lítio e encontrou um valor cerca de cinco vezes maior. Sua teoria, como ele mesmo mais tarde percebeu, era incompatível com o princípio da correspondência de Bohr, do qual ele nada sabia por causa da situação política da época (JAMMER, 1989, p. 126). (7)

A importância deste SA, mais do que evidenciar aspectos teórico conceituais para a descrição do problema, consiste em apontar a pertinência de aspectos sócio históricos. Como indicado, a “situação política da época” impediu que Roschdestwensky tivesse conhecimento do princípio da correspondência de Bohr, o qual desempenhou papel central para o desenvolvimento e formulação da mecânica quântica. Neste sentido, o SA pode ser classificado na categoria *Contextualização*.

As tentativas de derivar os multipletos atribuindo ao *caroço* um quarto número quântico não foram bem sucedidas, conforme narrado por Tomonaga:

No entanto, o efeito Zeeman interno [...] difere do efeito Zeeman de um campo magnético externo em um ponto essencial. Para o efeito Zeeman externo do nível com número quântico subordinado k , o momento angular é quantizado com $2k + 1$ valores, e o termo sempre se divide de $2k + 1$ termos. No entanto, para o efeito Zeeman interno, o número de níveis divididos nem sempre alcança $2k + 1$. [...] Por essas razões, não se pode persistir em pensar que o momento angular do [*caroço*] está causando os termos do multiplete (TOMONAGA, 1997, p. 10–11). (8)

Notemos que Tomonaga está relatando sobre condições empíricas que colocam em dificuldades a proposição de ideias que atribuam ao caroço a origem do efeito dos multipletos. Embora não haja ainda nenhuma bissociação explicitamente proposta, o SA (8) expressa um critério de rejeição para todas as pretensas bissociações que venham a atribuir ao caroço um papel central nas descrições para o fenômeno dos multipletos em átomos de elementos alcalinos. Desse modo, o SA (8) pode ser classificado na categoria analítica *Experiência disponível*.

Conforme Jammer (1989, p. 126), Landé adota, “em analogia com a representação vetorial do momento angular clássico” que o momento angular do elétron óptico, \mathbf{K} , de um elemento alcalino – fora do caroço – deve ser adicionado ao vetor momento angular do caroço, \mathbf{R} , resultando em um momento angular total, \mathbf{J} , para o átomo¹⁶. Desse modo, as possíveis orientações relativas entre \mathbf{K} e \mathbf{R} permitiu a Landé interpretar qualitativamente os multipletos.

Diante das dificuldades em atribuir o quarto número quântico ao caroço surgem

16 Adotamos aqui a notação vetorial de Jammer.

diferentes proposições para modelizar os átomos alcalinos (TOMONAGA, 1997). A modelização dos átomos alcalinos recebeu o qualificador “Ersatz model”, cujo significado traz consigo um importante aspecto:

Entre os principais protagonistas estavam Landé, Pauli e Sommerfeld. [...] Seus modelos ajustaram os dados, mas eles sabiam que eram apenas modelos. Eles foram chamados de modelos “ERSATZ”. Aqueles que viveram na Europa ocupada durante a guerra sabem o que um ersatz é. É um mau substituto para algo muito melhor. No entanto, neste caso, o ERSATZ estava substituindo algo que ainda não existia (MARTIN, 2002, p. 5, grifo do autor). (9)

Notamos no SA (9) a presença de um elemento sócio histórico. A presença do termo “ERSATZ”, dado seu significado, mostra que os cientistas, no exercício de suas atividades, não estavam alheios ao contexto sócio histórico, aspecto este, também apontado por Palma (2015). As influências do contexto da 1ª Guerra Mundial para o desenvolvimento da Mecânica Quântica na Europa foram identificadas em outras fontes, as quais iremos explicitar oportunamente. Desse modo, o SA (9) pode ser classificado na categoria *Contextualização*.

Ainda em relação ao uso de modelos na descrição dos espectros dos elementos alcalinos, podemos constatar diferentes posições epistêmicas frente a esta prática. Segundo Tomonaga (1997), Landé e Sommerfeld eram mais inclinados ao uso dos modelos, enquanto Pauli era mais reticente e por vezes mostrava-se até mesmo contrário à essa prática:

Mal posso acreditar nos modelos que estão sendo considerados no momento. Por que não estudamos as regras dos termos do multipletto apenas a partir de resultados experimentais? (PAULI, apud TOMONAGA, 1997, p. 22). (10)

O SA (10) pode ser classificado na categoria *Manifestação de rejeição*, evidenciando a importância dada por Pauli a critérios de valor epistêmico – a importância da fenomenologia é para Pauli um aspecto muito importante; de acordo com Enz (1973, p. 768), em relação ao “credo de que a física deve ser formulada inteiramente em termos de quantidades observáveis, a influência do padrinho de Pauli, Ernst Mach, é inegável”. Como se vê, não é um critério compartilhado por toda a comunidade científica, afinal, Pauli, Landé e Sommerfeld empregam modelos, mas Pauli mostra-se reticente. Tal posicionamento estende-se para as publicações de Pauli, nas quais ele “evita consistentemente termos como *momento angular orbital*, *momento angular nuclear* [em referência ao *caroço*] e *momento angular total*, os quais implicam modelos” (TOMONAGA, 1997, p. 22, grifos do autor). Pauli substitui nestas nomenclaturas o termo “número quântico” no lugar de “momento angular”, evitando assim assumir vínculos conceituais com tais expressões, empregadas no contexto dos modelos ERSATZ. Cabe destacar que apenas Landé estava avançado cada vez mais nesta direção. Em

1923 Sommerfeld declara seu abandono ao uso de modelos em uma publicação na revista *Atombau*, passando então a buscar uma abordagem mais fenomenológica para os problemas quânticos. Em resposta a esta publicação, Pauli em carta à Sommerfeld afirma:

Achei particularmente bonito, na apresentação da estrutura complexa, que você deixou todas as considerações baseadas no modelo de lado (PAULI apud BUCHWALD; WARWICK, 2001, p. 831). (11)

Agora se tem a impressão com todos os modelos, de que falamos ali uma linguagem que não é suficientemente adequada para a simplicidade e beleza do mundo quântico. Por essa razão, achei tão bonito que sua apresentação da estrutura complexa seja completamente livre de [todas as pré concepções] de modelo (PAULI apud BUCHWALD; WARWICK, 2001, p. 831) (12)

Conforme exposto, o SA (11) evidencia uma *Manifestação de rejeição* ao uso de modelos. Enfatizamos também que este critério de valor não está sendo aplicado como meio de aceitação/rejeição de qualquer ME, pois nenhuma manifestação dessa natureza fora feita explicitamente no referido SA. Contudo, indica a presença de critérios de valor assumidos por Pauli – ainda que não explicitados no SA – e estes desempenharão um papel decisivo no julgamento de futuras proposições de MEs, como veremos. De modo complementar, o SA (12) evidencia, este sim, o *Critério de rejeição*, pois através dele fica explícito que, para Pauli, o uso de modelos implica no uso de uma linguagem “que não é suficientemente adequada” para o fim desejado. É importante ressaltar que, apesar de Pauli considerar o uso de modelos como um expediente ocasional, uma necessidade transitória (contudo, inadequada), a não adoção de modelos não era uma concepção largamente compartilhada, dada a dificuldade recorrente, enfrentada pelos cientistas, em construir imagens para os fenômenos quânticos. Tal como relatado por Pauli em sua Nobel Lecture, “[...] os físicos acharam difícil entender o princípio da exclusão, uma vez que nenhum significado em termos de um modelo foi dado ao quarto grau de liberdade do elétron” (PAULI, 1946, p. 29).

Por volta de 1916, Sommerfeld incorporou elementos da relatividade restrita ao modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio. A variação relativística da massa do elétron mostrava-se significativa para os diferentes orbitais, *S*, *P* e *D*. É conveniente mencionar a convenção adotada para os orbitais:

$$\begin{aligned} k = 1 &\rightarrow S \\ k = 2 &\rightarrow P \\ k = 3 &\rightarrow D \end{aligned} \quad (3.2)$$

De acordo com Tomonaga (1997, p. 24–25), Sommerfeld foi capaz de descrever corretamente a separação de linhas observadas para o átomo de hidrogênio, denominada de estrutura fina. De igual forma, a descrição do fenômeno a partir desse modelo aplicava-se muito bem aos íons He^+ , Li^{++} e Be^{+++} . Não por acaso, afinal, estes elementos uma vez ionizados como indicado, constituem-se de um núcleo positivamente carregado mais um único elétron na camada de valência.

A estrutura fina do átomo de hidrogênio corresponde a separação entre linhas espectrais que somente são visíveis a partir de equipamentos de grande resolução. A superação deste detalhe técnico acabou por revelar que os níveis de energia previstos pela teoria de Bohr para o átomo de hidrogênio na verdade apresentavam desdobramentos, ou seja, onde se pensava haver um nível de energia, haviam na verdade um número maior de níveis, separados por uma pequena diferença de energia (EISBERG; RESNICK, 1985b). Lembremos que a superação de limitações técnicas pode alterar o estado da experiência disponível, conforme mencionado por Palma (PALMA, 2015).

A correção empreendida por Sommerfeld ao modelo de Bohr resulta na equação (3.3), a qual fornece a separação de energia, ΔW , entre os estados quânticos denotados por k e $k - 1$, para um determinado nível n .

$$\Delta W_S = +2 \left(\frac{e\hbar}{2mc} \right)^2 \frac{1}{a_H^3} \frac{Z^4}{n^3 k(k-1)}. \quad (3.3)$$

Nesta expressão, n corresponde ao número quântico principal e a_H é o raio de Bohr, definido por:

$$a_H = \frac{\hbar^2}{me^2}. \quad (3.4)$$

Os demais termos representam constantes físicas: a carga elementar, e ; a massa do elétron, m ; a velocidade da luz, c . Deve-se ter o cuidado em não confundir a massa do elétron com o número quântico magnético, ambos representados pelo mesmo símbolo – a ambiguidade não está presente na equação (3.3). Por fim, deve-se ressaltar que na referida equação consta, originalmente, o termo e^4 no lugar de Z^4 , este último mais apropriado para os propósitos considerados, como veremos a seguir.

Em 1922 a equação de Sommerfeld para a estrutura fina do átomo de hidrogênio foi tomada em analogia por Landé, a fim de obter uma equação equivalente para aos átomos de elementos alcalinos (TOMONAGA, 1997). Ressaltamos que os elementos alcalinos constituem, dentre todos os elementos, o sistema mais simples para se tratar o fenômeno dos multipletos, uma vez que, para estes elementos, os multipletos são todos na forma de dupletos (FORMAN, 1968). A expressão de Landé – que será por ele testada empiricamente – assume a forma:

$$\Delta W_{L(emp)} = +2 \left(\frac{e\hbar}{2mc} \right)^2 \frac{1}{a_H^3} \frac{(Z-s)^4}{n^3 k (k-1)}. \quad (3.5)$$

O termo $(Z - s)$ corresponde a carga nuclear positiva, Z , subtraída da carga negativa, s , devido aos elétrons das camadas fechadas internas, constituindo assim a carga do caroço. Segundo Tomonaga (1997), a validade da equação (3.5) foi verificada por Landé, substituindo $\Delta W_{L(emp)}$ por valores advindos dos dados experimentais e calculando os valores de s correspondentes, obtendo para estes últimos uma boa concordância com os valores conhecidos para vários elementos alcalinos. Diante deste quadro, a equação (3.5) foi tomada como uma fórmula empírica válida, e o passo seguinte seria encontrar um meio de derivá-la a partir de alguma teoria. É na busca desta derivação que serão propostas diferentes bissociações, que irão culminar com o conceito de spin do elétron.

Este é um momento apropriado para retomarmos um ponto já abordado no início da análise. Estamos considerando como MEIC, bissociações que associem teorias de diferentes campos fenomenológicos, mas que pertencem a um mesmo campo científico. Notemos que Landé está empregando o modelo de Bohr-Sommerfeld aos átomos alcalinos. Como já descrevemos, estes átomos tem uma distribuição eletrônica tal que é possível atribuir ao sistema um caroço com uma carga elementar positiva e um único elétron na camada de valência – são denominados átomos hidrogenóides. Em suma, Landé está combinando dois campos conceituais distintos – eletromagnetismo e átomo de hidrogênio – para descrever um átomo alcalino. É neste sentido que estamos considerando este movimento como uma bissociação. Como veremos, serão propostas diferentes maneiras de modelar a interação entre o caroço e o elétron radiante na busca pela correta descrição da anomalia Zeeman.

Neste sentido, consideramos que o modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio estabelece um modo de proceder: um tratamento semiclassico que pauta-se na mecânica clássica e nas ideias da quantização de Planck e Einstein. O modelo de Bohr para o átomo de

hidrogênio é como uma bissociação mais geral, que estabelece um quadro metafórico de referência, a partir do qual novas tentativas/estratégias serão propostas.

O ponto a ser colocado é que o ato inaugural, individual, sincrônico, não esgota a proposição da MEIC. São necessárias outras contribuições para estabelecer a matriz de pensamento, as estratégias, enfim, a estrutura interna do processo bissociativo. O que se vê, portanto, são contribuições pontuais, sincrônicas, buscando estruturar a bissociação inicialmente proposta.

A tentativa de Landé em derivar a sua fórmula empírica considerava que o elétron radiante de um elemento alcalino gira em torno de um caroço positivo. O modelo de Landé atribuía a origem da estrutura complexa decorrente do efeito Zeeman anômalo à interação entre os momentos magnéticos do caroço e do elétron radiante. Tal interação conferia ao átomo um pequeno número de estados distintos, com energias ligeiramente diferentes.

Supunha-se que esses estados eram distinguidos pela orientação relativa do momento angular [do caroço] r e do momento angular do movimento orbital do elétron radiante l . As poucas orientações permitidas foram determinadas pelas regras de quantização, $\int p_i \cdot dq_i = n_i h$, que restringiu r , l , e sua soma j , o momento angular total do átomo, a múltiplos inteiros de $h/2\pi$ (FORMAN, 1968, p. 159).

É importante salientar como Landé explica, a partir de seu modelo, a estrutura complexa do espectro dos multipletos. Uma vez que a interação entre o elétron radiante e o caroço apresenta uma natureza puramente magnética o movimento do elétron radiante gera um efeito magnético sobre o momento magnético do caroço, fazendo assim emergir as linhas da estrutura complexa – uma espécie de “efeito Zeeman interno” (TOMONAGA, 1997, p. 9). De modo similar, o efeito decorrente da aplicação de um campo magnético externo sobre o átomo produziria diferentes níveis de energia em virtude da interação entre o campo aplicado e o momento magnético total do átomo, oriundo do acoplamento entre os momentos magnéticos do caroço e do elétron radiante. As possíveis orientações teoricamente permitidas para o momento magnético total, em relação a direção do campo aplicado, explicaria os níveis de energia observados no efeito Zeeman anômalo (FORMAN, 1968).

Considerando que o movimento do elétron radiante origina um campo magnético, da mesma forma que um campo magnético é gerado por cargas elétricas ao longo de uma espira circular, a interação entre o campo magnético criado pelo elétron radiante e um suposto campo magnético inerente ao caroço, este último assumido por Landé como uma hipótese,

seria a origem dos multipletos. Nas palavras de Tomonaga:

Em vez do campo magnético devido ao [caroço] que atua no elétron radiante, consideramos o campo magnético do elétron radiante que atua no [caroço]. Tomemos o centro do átomo como a origem [...]. Então, de acordo com a lei de Biot-Savart, [...] um campo magnético é gerado [sobre o caroço] (TOMONAGA, 1997, p. 26). (13)

No SA (13) Tomonaga relata explicitamente a bissociação empreendida por Landé para derivar a sua fórmula empírica, dada pela expressão (3.5). Desse modo, o referido SA pode ser classificado na categoria *Bissociação qualitativa*. Trata-se de uma bissociação por que temos aqui duas matrizes formais que compõem diferentes ramos sendo relacionadas: a matriz da teoria eletromagnética, pelo emprego da lei de Bio-Savart e a matriz da teoria de Bohr-Sommerfeld, pelo emprego do modelo do átomo de hidrogênio, neste caso tomado em analogia para os átomos de elementos alcalinos. Uma vez que o SA não contém nenhuma simbologia matemática, ou seja, está em uso apenas a linguagem não matemática, este SA pode ser classificado na categoria *Bissociação qualitativa*. Ao desenvolver a ideia encapsulada pela bissociação qualitativa indicada, Landé deriva a expressão (3.6), conforme relatado por Tomonaga (1997):

$$\Delta W_L = -2g_0 \left(\frac{e\hbar}{2mc} \right)^2 \frac{1}{a_H^3} \frac{(Z-s)^3}{n^3 k(k-1)}. \quad (3.6)$$

O SA dado pela expressão (3.6), por sua vez, pode ser classificado na categoria *Bissociação quantitativa*, uma vez que exprime a realização matemática de uma bissociação qualitativa. Aqui ressaltamos um aspecto fundamental das MEIC no campo da Física. Como já colocado anteriormente, as relações de coerência lógica entre as ideias científicas, a representação matemática e a representação/interpretação de experimentos constituem um aspecto inerente ao campo científico que estamos considerando.

A expressões (3.5) e (3.6) não são equivalentes, como pode ser observado. Isso significa que a bissociação proposta por Landé não será exitosa, o que não pode ser constatado prontamente pelo conteúdo da bissociação qualitativa que a originou. Neste sentido, torna-se evidente – para o campo científico que estamos considerando – a necessidade de haver para toda bissociação qualitativa, sua correspondente bissociação quantitativa. Notemos que embora a coerência lógica entre as ideias e a representação matemática tenha sido satisfeita, afinal o rigor matemático foi empregado corretamente, os resultados decorrentes de (3.5) não são coerentes com os dados experimentais. Desse modo,

fica evidente que a coerência lógica entre as ideias, a representação matemática e a representação/interpretação dos experimentos cumpre um papel regulador imprescindível no campo da Física como critério de aceitação/rejeição de ME.

Uma breve análise permite constatar as seguintes diferenças entre a equação derivada por Landé, (3.6), e sua fórmula empírica, (3.5). Na equação derivada podemos apontar as seguintes discrepâncias: 1) a carga do caroço elevada a terceira potência; 2) a presença do sinal negativo; 3) o fator g_0 ($= 2$). O termo g_0 é a razão entre o momento magnético e o momento angular orbital, referentes ao caroço (no modelo de Landé) e tomado como 2 para se ajustar aos dados experimentais (TOMONAGA, 1997). O valor 2 para o fator giromagnético, que está intimamente relacionado com a formação dos dupletos dos elementos alcalinos, só viria a ser esclarecido com a formulação da Mecânica Quântica Relativística de Dirac (DUNCAN; JANSSEN, 2019).

Cabe aqui uma breve digressão à respeito do fator g_0 . Por volta de 1920 Landé incorporou, com algumas alterações, a ideia de Sommerfeld do número quântico interno, buscando descrever a separação de linhas do efeito Zeeman anômalo. Classicamente, o efeito de um campo magnético sobre uma carga elétrica movendo-se sobre uma trajetória fechada foi descrito pelo físico Joseph Larmor (1857-1942) em 1897. Para o caso clássico, o resultado da ação do campo magnético uniforme atuando perpendicularmente sobre o plano definido pela trajetória fechada descrita por uma carga elétrica, produzia um movimento de precessão do vetor de momento magnético em torno da direção do campo magnético aplicado; a frequência, ω , desse movimento de precessão é conhecida como frequência de Larmor. Na descrição clássica, outro resultado é bastante conhecido: a razão entre o momento magnético, μ , e o momento angular, L , da carga elétrica no movimento considerado é unitário ($\mu/L = 1$).

Esta descrição, ao ser aplicada ao modelo atômico planetário de Bohr, deveria levar a uma separação nos níveis de energia proporcional a frequência de Larmor, tal que: $\Delta E = m\omega h$, onde m é um número inteiro e h , a constante de Planck. No caso quântico, contudo, Landé observou que os resultados empíricos indicavam “que a separação de energia foi dada pelo valor clássico multiplicado por outro termo, o chamado fator g (i.e. $\Delta E = g \cdot m\omega h$)” (BUCHWALD; WARWICK, 2001, p. 832), configurando assim, uma violação do teorema de Larmor. O fator g foi oficialmente introduzido por Landé em 1921, mas “ele não podia oferecer nenhuma interpretação física de seu significado, a não ser que estava relacionado com J , agora entendido como o momento angular total do átomo – [a soma entre momento angular orbital e o ‘momento oculto’ de Sommerfeld]” (BUCHWALD; WARWICK, 2001, p. 832).

A busca por uma fórmula empírica capaz de fornecer corretamente o fator g a partir de números quânticos foi um esforço empreendido por vários cientistas, dentre os quais destacam-se Heisenberg, Landé e Pauli, e a busca por justificativas teóricas foi de grande importância “para uma tentativa renovada de construir um modelo físico explícito para o comportamento do núcleo e dos componentes de valência” (DUNCAN; JANSSEN, 2019, p. 357) de sistemas atômicos submetidos a campos magnéticos, muito embora uma explicação teórica definitiva somente foi possível com a teoria relativística do elétron proposta por Dirac (DUNCAN; JANSSEN, 2019).

Além do problema relacionado com a adição do fator g , o modelo de Landé implicava em admitir valores semi-inteiros para a componente do momento magnético angular total na direção do campo, para os estados de dupletos, uma clara violação das regras de quantização (FORMAN, 1968).

A expressão derivada por Landé, embora não condizente com os dados experimentais, desempenhou um importante papel no problema da estrutura complexa dos espectros ópticos. Conforme relatado por Forman (1968), desde 1916 a estrutura fina do espectro de Raios-X do átomo de hidrogênio era corretamente descrita pela teoria de Bohr-Sommerfeld, que derivava os desdobramentos nos níveis de energia a partir da correção relativística da massa do elétron, como já indicamos. No entanto, não havia qualquer relação, teórica ou empírica, entre a estrutura fina e a estrutura complexa dos espectros alcalinos. A conexão destes dois fenômenos ganha importante evidência na virada de 1923 para 1924, quando resultados experimentais indicavam que “não havia diferença, em princípio, entre a estrutura fina dos espectros de raios-X e os dupletos do sistema óptico dos espectros alcalinos” (FORMAN, 1968, p. 169). Landé, então, assume a tarefa de provar que a estrutura fina era originária da interação magnética. Como vimos, a derivação conduziu a uma equação incorreta, mas há um aspecto muito importante: “a interação magnética produziu precisamente a constante de proporcionalidade da teoria relativística” (FORMAN, 1968, p. 169) para a estrutura fina. Este resultado lançou dúvidas sobre a legitimidade da teoria de Bohr-Sommerfeld, que invariavelmente não era bem sucedida quando aplicada a sistemas multieletrônicos, e também sobre o modelo ERSATZ, por não descrever corretamente a estrutura complexa dos espectros alcalinos. Esta situação paradoxal – o enigma dos dupletos – é publicada por Landé em um artigo, atraindo rapidamente a atenção de Físicos e provocando várias reações otimistas, dentre os quais Heisenberg e Pauli. Sommerfeld, no entanto, reagiu de forma diferente:

Sommerfeld não ficou totalmente satisfeito com os artigos de Landé. Além de seu interesse pessoal na estrutura fina relativística, Sommerfeld tinha a tarefa de defender a teoria da relatividade contra a ala direita da física alemã (FORMAN, 1968, p. 171). (14)

De acordo com o relato de Forman, podemos constatar no SA (14) certa influência política nas decisões científicas de Sommerfeld. Embora maiores detalhes não tenham sido mencionados pelo autor do SA, fica evidenciado que há um contexto político envolvido na rejeição do processo bissociativo proposto por Landé, e desse modo, o referido SA pode ser classificado na categoria *Contextualização*.

O enigma dos dupletos acabou por fomentar a controvérsia sobre a origem da interação responsável pelo fenômeno:

Os extremos dessa gama de opiniões foram ocupados pelos relativistas da escola de Munique (principalmente Sommerfeld, Wentzel e Pauli) e pelos magnetistas da América (Urey, Slater, Ruark, Houston, Millikan e Bowen). Adjacente aos magnetistas estavam Goudsmit, Lande e Heisenberg, aproximadamente nessa ordem, mantendo o modelo [ERSATZ], mas simplesmente recusando-se a se declarar sobre o mecanismo de interação entre o elétron externo e o restante do átomo (FORMAN, 1968, p. 172).

Como indicado anteriormente, a expressão derivada por Landé não foi capaz de reproduzir os dados experimentais, pois sua estrutura matemática difere explicitamente da fórmula empírica por ele sugerida. Levando em conta as três diferenças anteriormente apontadas entre as equações, empírica e derivada, Tomonaga relata:

Dessas três diferenças, a primeira é fatal, e se você determinar s a partir de resultados experimentais usando [3.6], obterá valores inteiramente diferentes [daqueles previstos por 3.5] (TOMONAGA, 1997, p. 28). (15)

Assim, Landé foi forçado a admitir a falha de sua ideia de que termos multipletos são causados por interação magnética. (TOMONAGA, 1997, p. 28). (16)

O SA (15) exprime um *Critério de rejeição*, uma vez que Tomonaga faz referência a base empírica vigente como fator decisivo para rejeição da bissociação proposta por Landé. No SA (16), por sua vez, Tomonaga faz referência a uma manifestação de rejeição – não aos motivos para tal – e portanto pode ser classificado na categoria *Manifestação de rejeição*.

De acordo com Enz (1973), Pauli trabalhou como assistente de Max Born no semestre de inverno – 1921/1922 – em Göttingen. Ainda em Göttingen, conheceu Niels Bohr que o

convidou para ir a Copenhagen por um ano, o que ocorreu no outono de 1922, onde publicou um artigo em colaboração com H. A. Kramers sobre teoria de bandas espectrais. Uma vez inserido no contexto do efeito Zeeman anômalo, Pauli passou a concentrar seus esforços neste problema, tornando explícito seu criticismo.

Enquanto o modelo Ersatz ainda era popular por volta de 1923, muitas pessoas acreditavam que o [caroço] estava na camada K (TOMONAGA, 1997, p. 29). (17)

[...] em dezembro de 1924 [Pauli] finalmente terminou outro artigo. Neste artigo, ele apresentou suas críticas à suposição prevalecente de que o [caroço] atômico está na camada K, e ele mergulhou, insistindo pela primeira vez que o multipletto não se deve a uma interação entre o [caroço] e o elétron radiante, mas a uma característica do próprio elétron (TOMONAGA, 1997, p. 29). (18)

Segundo Tomonaga (1997), a proposição da fórmula empírica por Landé e sua tentativa em derivá-la ocorreram em 1922. Desse modo, como indicado no SA (17), se o modelo ERSATZ *ainda era popular por volta de 1923* apesar do insucesso da bissociação empreendida por Landé, podemos inferir que esta bissociação reconfigurou o quadro da experiência disponível, uma vez que foi capaz de captar a atenção de uma parte da comunidade científica e mantê-la orientada nesta direção. Por outro lado, o SA (18) evidencia o criticismo de Pauli em relação ao modelo ERSATZ. Suas ideias, publicadas em um artigo – (PAULI, 1925) – irão deslocar o foco das atenções para o elétron, o que também caracteriza uma reconfiguração da experiência disponível, pois irá orientar outra parte da comunidade científica nesta direção. Assim sendo, os SA (17) e (18) podem ser classificados na categoria *Reconfiguração*. Notemos que Landé propõe uma bissociação, ao passo que Pauli não. Contudo, Pauli está atuando em resposta a bissociação de Landé.

Conforme indicado, a proposição de que o momento magnético do caroço tinha origem apenas nos elétrons da camada *K* passa a ser explicitamente criticada por Pauli. Este sugere uma outra forma de considerar o problema dos multipletos nos átomos de elementos alcalinos. Considerando alguns dos resultados apresentados em seu artigo, Pauli conclui:

As configurações eletrônicas completas não devem contribuir em nada para o momento magnético e para o momento do átomo. Em particular, no caso dos alcalinos, os valores de momento do átomo e suas mudanças na energia em um campo magnético externo são considerados essencialmente como efeito do único elétron luminoso, que também é considerado como a origem da anomalia magneto mecânica. De acordo com esse ponto de vista, a estrutura em duplete dos espectros alcalinos, assim como a violação do teorema de Larmor, ocorre por meio de um tipo de duplo valor peculiar e classicamente indescritível nas propriedades teórico quânticas do elétron luminoso (PAULI, 1925, p. 385). (19)

O SA (19) corresponde ao penúltimo parágrafo do artigo de Pauli. Nele notamos

claramente sua sugestão de que os efeitos de multipletos sejam decorrentes de uma propriedade – um *duplo valor peculiar e classicamente indescritível* – atribuída ao *elétron luminoso*, ou seja, ao elétron de valência externo ao caroço. O que Pauli está propondo corresponde não apenas a uma mudança de concepção e de percepção do problema dos multipletos, mas também aspectos relacionados ao quarto número quântico e sua atribuição ao elétron de valência. A partir desta ideia outros cientistas irão propor, como veremos adiante, uma nova bissociação. Por inaugurar uma nova perspectiva sobre o quadro teórico empírico relacionado à problemática dos multipletos, podemos classificar este SA como uma evidência da *Reconfiguração* decorrente pela bissociação de Landé.

Outro aspecto muito importante que aqui ressaltamos diz respeito às implicações decorrentes da proposição de Pauli acerca de um número quântico *classicamente indescritível*. Tal proposição implica na ruptura com a bissociação mais ampla que fora iniciada com Bohr, qual seja, a de ter como pano de fundo todo o arcabouço conceitual clássico para a descrição dos sistemas quânticos, cuja expressão máxima é o *princípio da correspondência*. Como veremos, mais adiante, Bohr irá empenhar-se arduamente para conciliar a proposta de um quarto número quântico, atribuído ao elétron, com o princípio da correspondência.

É importante salientar que a insistência de Pauli em considerar o quarto número quântico como classicamente indescritível decorre da inadequação dos métodos clássicos para descrever as divisões anômalas no espectros dos elementos alcalinos:

[...] a divisão anômala era dificilmente compreensível do ponto de vista do modelo mecânico do átomo, uma vez que suposições muito gerais a respeito do elétron, tanto usando a teoria clássica quanto a quântica, sempre levavam ao mesmo tripleto (PAULI, 1994, p. 167). (20)

A argumentação de Pauli, expressa no SA (20), evidencia indiretamente a importância dos resultados experimentais como elementos decisórios. Conforme relatado, podemos notar que os métodos empregados, clássicos ou quânticos (vigentes naquele período), sempre levavam ao mesmo resultado teórico inválido – a formação de tripletos –, enquanto os experimentos mostravam outros padrões de multiplicidade. Vale ressaltar que esta argumentação está muito mais relacionada com a intuição de Pauli do que com alguma argumentação fundamentada – somente desenvolvimentos posteriores levaram Bohr a mostrar “que o spin do elétron não pode ser medido por experimentos classicamente descritíveis [...] e deve, portanto, ser considerado como uma propriedade essencialmente mecânica quântica do elétron” (PAULI, 1994, p. 169).

No SA (20) constamos, portanto, aspectos da *Experiência disponível*, uma vez que a

intuição de Pauli está sendo pautada, em parte, pelo insucesso das teorias clássicas frente aos resultados experimentais. Como veremos, a tendência de Pauli em considerar um quarto número quântico como classicamente indescritível será empregado como um critério de rejeição ao uso de modelos mecânicos para derivar o novo número quântico.

Em relação à afirmação de Pauli de que a origem dos multipletos estaria relacionada ao elétron, Tomonaga relata:

[...] Pauli declarou pela primeira vez que todos [os número quânticos] pertencem ao próprio elétron. No entanto, mesmo aqui, ele tentou evitar a imagem de um modelo por trás desses números quânticos e simplesmente disse “duplo-valor [sic] classicamente indescritível” (TOMONAGA, 1997, p. 30, grifo do autor). (21)

O SA (21) exprime uma postura epistêmica de Pauli, a saber, o seu compromisso em não aderir ao uso de modelos. Além disso, Pauli se apoia nesta concepção para manifestar sua rejeição a bissociação proposta por Landé, uma vez que ela carrega em sua essência o uso do modelo ERSATZ. Desse modo, o SA (21) exprime uma *Manifestação de rejeição*.

Para Pauli, atribuir ao caroço a origem do fenômeno dos multipletos apresentava uma série de problemas, tanto empíricos, por não reproduzir os dados experimentais, quanto de ordem conceitual, por ser difícil descrever matematicamente o *caroço* sem recorrer ao uso de modelos. Uma destas dificuldades é assim relatada por Tomonaga:

[...] se você adotar o conceito de [caroço], alguma propriedade do [caroço] deve mudar repentinamente quando um elétron é adicionado ao [caroço]. Esse absurdo não aparece na nova maneira de pensar de Pauli. Além disso, em sua nova ideia, todos os elétrons têm um “duplo-valor classicamente indescritível” e, portanto, não há diferença entre os elétrons do [caroço] e os outros elétrons (TOMONAGA, 1997, p. 30). (22)

Notemos no SA (22) o uso da expressão *a nova maneira de pensar*, empregada por Tomonaga. Tal expressão denota que Pauli está introduzindo um novo modo de considerar o problema dos multipletos, que embora não seja ainda uma bissociação propriamente dita, coloca-se como uma alternativa frente a proposição infrutífera da bissociação de Landé. Desse modo, a ideia que Pauli está defendendo irá motivar, como veremos, a proposição de novas bissociações. Tal como apontado por Palma, lembremos aqui que a base empírica, a experiência disponível, se “enriquece e se reconfigura mediante novas ME” (PALMA, 2015, p. 45), sejam elas exitosas ou não. Portanto, o SA (22) pode ser classificado na categoria *Reconfiguração*, uma vez que *a nova maneira de pensar* que Pauli constituirá um novo olhar sobre o fenômeno, em resposta a bissociação de Landé.

Ainda em relação as objeções apresentadas por Pauli (1925), Jammer (1989) relata, sobre os cálculos efetuados pelo cientista, alguns dos resultados e conclusões obtidas:

[1] De fato, no outono de 1924, Pauli apresentou alguns argumentos notáveis contra essa teoria “ortodoxa” ou, como a chamamos, a teoria do [caroço] magnético, [2] e mostrou sua inconsistência com a experiência (JAMMER, 1989, p. 133). (23)

Calculando a variação relativística da massa dos elétrons da camada K em elementos homólogos, Pauli descobriu que a razão entre o momento magnético e o momento angular, conforme obtido com base na teoria do [caroço], tinha que ser multiplicada por um fator de correção γ , ou seja, o valor médio no tempo de $(1 - v^2/c^2)^{\frac{1}{2}}$ tomado em uma órbita completa do elétron. Ele descobriu que para $Ba (Z = 56)$ $\gamma = 0,924$, para $Hg (Z = 80)$ $\gamma = 0,817$, para $Tl (Z = 81)$ $\gamma = 0,812$. Como estes resultados exemplificam, a razão acima mencionada (isto é, a razão giromagnética inversa), de acordo com a teoria do [caroço], tinha que ser uma função que diminui lentamente com o número atômico; portanto, o fator g de Landé e a separação Zeeman teriam que depender do número atômico, um resultado contrário à experiência (JAMMER, 1989, p. 133–134). (24)

[...] em vista da posição excepcional completamente inexplicada da casca K, que a teoria do [caroço] considerava possuindo um momento diferente de zero em contraste com todas as outras cascas fechadas, Pauli rejeitou a suposição de que uma casca fechada interna participa em absoluto, por meio de sua contribuição para o momento do [caroço], na formação da estrutura multiplete dos espectros ópticos e suas separações Zeeman (JAMMER, 1989, p. 134). (25)

No SA (23) Jammer evidencia que Pauli está se opondo ao modelo ERSATZ por meio de *argumentos notáveis*. Além disso, também podemos observar que o autor indica um dos motivos para este posicionamento de Pauli, qual seja, a inconsistência desse modelo com os dados experimentais. Assim, o trecho [1] deste SA pode ser classificado na categoria *Manifestação de rejeição* e o trecho [2], na categoria *Critério de rejeição*.

No SA (24), por sua vez, Jammer relata alguns dos resultados obtidos por Pauli (1925) bem como a inconsistência destes resultados com os dados experimentais. Notemos que este SA apresenta aspectos qualitativos e quantitativos, mas não há qualquer referência à aceitação ou rejeição, o que pode, contudo, ser observado no conjunto do texto no qual o referido SA está inserido – os resultados ali presentes irão compor a argumentação de Pauli, manifesta em seu artigo (PAULI, 1925). Assim sendo, por evidenciar o conflito dos resultados obtidos a partir do modelo ERSATZ com os dados empíricos, podemos classificar este SA na categoria *Critério de rejeição*.

No SA (25), agora sim, notamos claramente que Jammer evidencia a rejeição de Pauli ao modelo ERSATZ, sendo portanto, classificado na categoria *Manifestação de rejeição*. Enfatizamos que a primeira parte deste SA consiste apenas na reafirmação qualitativa de alguns critérios de rejeição adotados por Pauli (1925), o que dispensa a sua categorização.

Como indicado por Jammer – SA (24) –, *a razão entre o momento magnético e o momento angular* correspondia a uma inconsistência quantitativamente determinada por Pauli

(1925), que, em relação a este aspecto, argumenta:

Podemos, portanto, resumir nosso resultado da seguinte forma: se alguém quiser aderir à suposição de que também grupos de elétrons fechados e, em particular, a camada K são a origem da anomalia magneto mecânica, então nem sempre é necessário dobrar o quociente do momento magnético e o momento deste grupo de momentos em relação ao seu valor clássico [fator g], mas também aceitam uma compensação para a correção relativística (PAULI, 1925, p. 383). (26)

No entanto, parece-nos que este ponto de vista é extremamente insatisfatório. Estamos muito mais inclinados a duvidar da exatidão da suposição de que as configurações de gases nobres no átomo desempenham um papel essencial na estrutura complexa e no efeito Zeeman anômalo, na forma de pulsos de núcleo com magnetismo anômalo. Outros argumentos podem ser apresentados contra essa suposição [...] (PAULI, 1925, p. 383). (27)

No SA (26), Pauli resume qualitativamente algumas consequências decorrentes do modelo ERSATZ, as quais são por ele obtidas a partir de considerações teóricas aplicadas ao modelo. Pauli evidencia, portanto, que a bissociação de Landé apresenta dificuldades quando associada à experiência disponível, e em decorrência disso, no SA (27) Pauli irá manifestar sua rejeição ao modelo em questão. Assim, o SA (26) pode ser classificado na categoria *Critério de rejeição* e o SA (27) na categoria *Manifestação de rejeição*. Vale ressaltar que *as configurações de gases nobres* à que Pauli se refere corresponde ao corço do modelo ERSATZ, o qual apresenta todas as camadas eletrônicas preenchidas, tal como um gás nobre.

Jammer (1989) relata um aspecto particularmente importante acerca do trabalho de Pauli (1925): o refinamento relativístico adicionado ao modelo ERSATZ levava a uma incompatibilidade com a experiência.

Nesse contexto, talvez devamos lembrar que, desde que Pauli escreveu, aos 20 anos, a pedido de Sommerfeld, seu abrangente artigo sobre a teoria da relatividade para a *Encyklopadie der mathematischen Wissenschaften*, ele não era apenas um especialista na teoria e um mestre de sua técnica, mas também um fervoroso defensor de seus princípios fundamentais, que ele defendeu sem hesitação (JAMMER, 1989, p. 134). (28)

Na verdade, foi a forte convicção de Pauli na validade absoluta da teoria da relatividade que o fez rejeitar a teoria central “ortodoxa” e, assim, preparou o caminho para a concepção do spin (JAMMER, 1989, p. 134, grifo do autor). (29)

O trabalho sobre relatividade a que Jammer se refere é reconhecido, à sua época, como um dos melhores tratados sobre a teoria da relatividade (VON MEYENN; SCHUCKING, 2001). A magnitude deste trabalho foi assim caracterizado por Einstein:

Quem quer que estude esta obra madura e rudimentar não acreditaria que o autor é um homem de vinte e um anos. Você não sabe o que mais admirar, a compreensão psicológica do desenvolvimento de ideias, a certeza da dedução matemática, a visão física profunda, a capacidade de apresentação claramente sistemática, o conhecimento da literatura, a honestidade factual, o rigor da crítica (EINSTEIN; BORN; KOPFF, 1922, p. 184).

A apropriação da teoria da relatividade e a propensão ao seu uso era fortemente indicada nas décadas seguintes a sua proposição (DIRAC, 1990). Assim, o SA (28) evidencia, portanto, aspectos do quadro teórico conceitual vigente, o que permite classificá-lo na categoria da *Experiência disponível*.

O SA (29), por sua vez, evidencia que a *forte convicção de Pauli* na teoria da relatividade foi um fator decisivo para sua rejeição ao modelo ERSATZ, visto que a introdução de aspectos relativísticos neste modelo resultava em inconsistências com a base experimental. Este SA pode, então, ser classificado na categoria *Critério de rejeição*.

A importância dada a teoria da relatividade nos anos de 1920 não era uma característica exclusiva da personalidade científica de Pauli. De acordo com Dirac:

Para entender a atmosfera em que os físicos teóricos estavam trabalhando, deve-se avaliar a enorme influência da relatividade. A relatividade havia irrompido no mundo do pensamento científico com um impacto tremendo, no final de uma guerra longa e difícil. Todos queriam fugir da tensão da guerra e agarraram-se avidamente ao novo modo de pensamento e à nova filosofia. A empolgação não tinha precedentes na história da ciência (DIRAC, 1990, p. 131). (30)

Notemos que Dirac não está apenas afirmando a grande importância científica da teoria da relatividade, mas também aponta elementos sócio históricos – os efeitos da I Guerra Mundial, *uma guerra longa e difícil* – como fatores decisivos para a adoção de um *novo modo de pensamento* e a adesão a uma *nova filosofia*. Dirac, assim, nos fornece uma perspectiva que evidencia a influência do contexto sócio histórico na atividade científica e desse modo, o SA (30) pode ser classificado na categoria *Contextualização*.

Para sustentar sua ideia de que o quarto número quântico deveria ser atribuído ao elétron e não ao caroço, Pauli buscou usá-la “para interpretar uma variedade de coisas” (TOMONAGA, 1997, p. 30). De imediato, elimina-se a necessidade de tratar o elétron radiante de um modo particular em relação aos elétrons do caroço. Além disso, atribuir ao elétron um número quântico com apenas dois possíveis valores permitia explicar algumas peculiaridades na formação dos dupletos, para o caso dos elementos alcalinos, e singletos e tripletos, para o dos alcalinos terrosos (TOMONAGA, 1997). Por exemplo, para o caso do

alcalino terroso Mg^+ , a formação de seu multipletto era abruptamente alterada pela adição de um elétron, o que de acordo com o modelo ERSATZ não deveria ocorrer, uma vez que o corço permanecera inalterado. Para Bohr, tratava-se de uma “restrição mecânica”, uma vez que não havia “como explicar isso com a mecânica clássica e o princípio da correspondência” (TOMONAGA, 1997, p. 31).

Além de permitir uma reinterpretação para o efeito Zeeman, a ideia de Pauli em atribuir o quarto número quântico ao elétron permitia explicar outros aspectos fenomenológicos ainda em não totalmente compreendidos. Embora não houvesse uma justificativa teórica para atribuir um número quântico ao elétron, deriva-se dessa ideia uma explicação simples para o notável fato, muito bem estabelecido no contexto experimental, de que as camadas K , L , M tornam-se fechadas a partir de uma quantidade bem específica de elétrons (2, 8, 18, respectivamente). Nas palavras de Tomonaga:

Uma vez que especificamos os valores dos números quânticos n, k, j e m não mais de um elétron com esses números quânticos pode existir dentro de um átomo. Esta regra pode ser interpretada como dizendo que uma vez que um elétron entra em um estado especificado por n, k, j, m esse elétron impede que os outros elétrons entrem no mesmo estado e, nesse sentido, passou a ser chamado de *princípio da exclusão de Pauli*. A partir dessa regra, Pauli mostrou que é possível derivar o resultado de que a camada K fecha com 2 elétrons, a camada L fecha com 8 elétrons e a camada M fecha com 18 elétrons, dando forte apoio à sua nova teoria. A regra acima mencionada é possível apenas quando n, k, j e m estão relacionados a um elétron (TOMONAGA, 1997, p. 32).

A ideia de Pauli, contudo, requeria alguma base de sustentação. Ainda em estado incipiente, não havia nenhuma maneira de derivar suas ideias a partir de uma teoria do elétron. Desse modo, buscou apoio nos dados experimentais.

Pauli viajou até o laboratório de Landé e tentou encontrar entre os muitos dados que Landé acumulou, qualquer caso que violasse a sua regra (TOMONAGA, 1997, p. 32). (31)

A partir do SA (31) notamos que Pauli está buscando uma confirmação empírica para suas ideias. Uma vez mais ressaltamos a importância da coerência lógica entre as ideias científicas, o formalismo e a base empírica. Bem verdade que ainda não há um formalismo que permita derivar as ideias de Pauli, mas a construção de um quadro completo, em termos de coerência lógica e base empírica, não se dá necessariamente de modo concomitante. Além disso, a coerência entre as ideias de Pauli e a base empírica motivará outros cientistas,

fornecendo uma nova percepção do quadro empírico do efeito Zeeman. Por esta razão o SA (31) pode ser classificado na categoria *Reconfiguração*, pois para empreender uma oposição à bissociação de Landé, Pauli necessita que suas ideias tenham alguma consistência, oferecendo assim uma nova interpretação para a base empírica.

Em visita ao laboratório de Landé, Pauli foi apresentado ao jovem Ralph de Laer Kronig (1904-1995), vindo dos Estados Unidos e interessado na multiplicidade e no efeito Zeeman. Em 1925, Kronig teve seu primeiro contato com as ideias de Pauli, mencionadas na carta que enviara à Landé. De acordo com Tomonaga:

Landé mostrou a ele [Kronig] uma carta de Pauli na qual “o duplo-valor indescritível classicamente” foi mencionado. Depois de ler isso, Kronig pensou imediatamente em um elétron auto rotativo, ou seja, um elétron girando em torno de seu próprio eixo com um momento angular de autorrotação de $1/2$ e um fator de $g_0 = 2$ (TOMONAGA, 1997, p. 33). (32)

[1] A partir dessa suposição, ele [Kronig] poderia explicar a aparência dos dupletos alcalinos, o efeito Zeeman e o efeito Paschen-Back [...]. [2] Além disso, ele antecipou que a interação entre o momento magnético da autorrotação e o movimento orbital poderia ser derivada através da relatividade e, [3] usando isso, ele foi capaz de calcular o intervalo entre os termos de duplete (TOMONAGA, 1997, p. 33). (33)

Conforme relatado por Tomonaga, no SA (32) fica evidenciado que as ideias de Pauli reconfiguraram a base empírica, como afirmamos anteriormente. A reconfiguração reside no fato de que as ideias de Pauli estimularam novas interpretações da experiência disponível, tal como Kronig irá propor. Além disso, este SA pode ser classificado na categoria *Bissociação qualitativa*, uma vez que exprime a ideia da autorrotação do elétron. Trata-se de uma ideia inovadora, trazendo aspectos da relatividade e da dinâmica de corpo rígido para os fenômenos atômicos, ou seja, relaciona duas matrizes de pensamento até então desconectadas.

Contudo, a bissociação proposta por Kronig enfrentará resistência por duas razões. Primeiro porque contraria a ideia de Pauli de que o quarto número quântico seria classicamente indescritível; a ideia da autorrotação do elétron seria, portanto, incompatível com esta condição. Apensar de ser possível uma descrição qualitativa da formação dos multipletos relacionados ao efeito Zeeman anômalo, os resultados quantitativos obtidos por Kronig apresentavam discrepâncias com os resultados experimentais (COMMINS, 2012). Em segundo lugar, a autorrotação implicaria em atribuir uma geometria para o elétron – a dinâmica de corpo rígido aplicada ao elétron mostrar-se-á incompatível. Estes dois aspectos irão deflagrar uma série de objeções à ideia da autorrotação do elétron.

Nos trechos [1] e [3] do SA (33), Tomonaga exprime qualitativamente o modo como

Kronig almeja obter a coerência lógica entre suas ideias, o formalismo e a base empírica. Estes trechos exprimem, portanto, alguns *Crítérios de aceitação* referentes à *Bissociação qualitativa*, reafirmada no trecho [2] deste mesmo SA. Neste sentido, consideramos que o referido segmento analítico pode ser classificado nas duas categorias que destacamos neste parágrafo.

A inserção da relatividade na descrição do átomo já fora empreendida por Sommerfeld, como relatamos, e dela deriva-se a expressão (3.3), tomada em analogia por Landé para obter sua fórmula empírica, dada por (3.5). No entanto, a proposição de Kronig considera a relatividade de um modo diferente, sendo de grande importância esclarecer este aspecto. Os elétrons de um átomo estão sujeitos a um campo elétrico gerado pelo núcleo atômico positivo. Tal campo elétrico, por sua vez, não produziria nenhum efeito direto sobre o momento magnético decorrente de um elétron em autorrotação. Kronig irá sustentar que, tomando um referencial fixado no elétron – este em repouso, portanto – o campo elétrico do núcleo atômico – este em movimento relativo em torno do elétron – seria percebido pelo elétron como um campo magnético. Assim explica Tomonaga:

[...] se um elétron está em movimento, então um campo magnético o qual não existe no referencial do laboratório aparece no referencial de repouso do elétron através da transformação de Lorentz (TOMONAGA, 1997, p. 34).

A percepção de um campo elétrico como um campo magnético devido ao movimento relativo é um resultado da teoria da relatividade restrita de Albert Einstein (1879-1955), dado pela seguinte equação:

$$\mathring{\mathbf{H}} = \frac{1}{c} \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} . \quad (3.7)$$

Nesta equação, o vetor campo magnético interno ao átomo, $\mathring{\mathbf{H}}$, atuante sobre o elétron radiante tomado em repouso, resulta do produto vetorial entre o vetor campo elétrico, \mathbf{E} , e o vetor velocidade, \mathbf{v} , ambos relacionados ao caroço positivo, tomado em movimento relativo em torno do elétron radiante. Conforme relatado por Tomonaga, a equação para os desvios de energia derivada por Kronig assume a seguinte forma:

$$\Delta W_K = +2g_0 \left(\frac{e\hbar}{2mc} \right)^2 \frac{1}{a_H^3} \frac{(Z-s)^4}{n^3 k(k-1)}. \quad (3.8)$$

A representação matemática das ideias de Kronig, sintetizadas através da equação (3.8), caracteriza uma *Bissociação quantitativa*. Novamente constatamos o aspecto associativo entre uma *Bissociação qualitativa*, evidenciada nos SA (32) e (33), e sua correspondente *Bissociação quantitativa*, evidenciada no SA correspondente a equação (3.8). Novamente podemos notar o caráter incompleto inerente a uma bissociação apenas em nível da linguagem não matemática.

É importante salientar que Kronig também está considerando a Lei de Bio-Savart. No referencial adotado, o caroço positivo gira na forma de uma espira circular em torno do elétron radiante. Estando imóvel no centro da trajetória, devido ao movimento relativo o elétron percebe o campo elétrico do caroço como um campo magnético. Porém, uma vez que no contexto deste problema tem-se que $v^2/c^2 \ll 1$, segue-se que $\sqrt{1 - v^2/c^2} \approx 1$. Dessa forma a derivação da equação (3.8), no limite clássico, recai na aplicação da Lei de Bio-Savart (TOMONAGA, 1997).

Salientamos, contudo, uma diferença crucial na proposição de Kronig. Como vimos, Landé emprega a Lei de Bio-Savart para calcular o momento magnético do elétron radiante decorrente de seu movimento orbital em torno do caroço; o momento magnético do elétron em interação com um suposto momento magnético do caroço seria, então, a causa dos multipletos. Notemos que Landé está modelando o caroço, o que implica em assumir hipóteses sobre o mesmo. Kronig, por outro lado, está empregando a Lei de Bio-Savart para calcular a interação entre o momento magnético do elétron decorrente de sua autorrotação – esta é a sua hipótese – em interação com um campo magnético proveniente do caroço, este de natureza relativística, que no limite clássico recai na Lei de Bio-Savart devido à simplificações inerentes ao contexto do problema, e portanto, sem qualquer relação com a estrutura do caroço. Lembremos: a hipótese defendida por Pauli implica em atribuir ao elétron um quarto número quântico, *um duplo-valor classicamente indescritível*. Kronig implementa a hipótese defendida por Pauli atribuindo ao elétron a autorrotação, evitando, assim, ter de considerar hipóteses acerca do caroço, não recorrendo, portanto, a modelização do mesmo.

Analizando a equação (3.8) derivada por Kronig, notamos que ela resolve dois dos três problemas contidos na derivação de Landé, em (3.6). Quando comparada com a fórmula empírica, (3.5), a derivação de Kronig está correta em relação ao expoente do termo $(Z - s)$ e também em relação ao sinal positivo na frente da expressão. Para efeitos de comparação,

apresentamos abaixo a fórmula empírica de Landé, a derivação por ele empreendida por meio da lei de Bio-Savart e a derivação de Kronig, expressa por (3.9), que leva em conta uma interação magnética de natureza relativística. Respectivamente:

$$\begin{aligned}\Delta W_{L(emp)} &= +2 \left(\frac{e\hbar}{2mc} \right)^2 \frac{1}{a_H^3} \frac{(Z-s)^4}{n^3 k(k-1)}, \\ \Delta W_L &= -2g_0 \left(\frac{e\hbar}{2mc} \right)^2 \frac{1}{a_H^3} \frac{(Z-s)^3}{n^3 k(k-1)}, \\ \Delta W_K &= +2g_0 \left(\frac{e\hbar}{2mc} \right)^2 \frac{1}{a_H^3} \frac{(Z-s)^4}{n^3 k(k-1)}.\end{aligned}\tag{3.9}$$

Contudo, da mesma forma que na derivação de Landé, a derivação de Kronig contém o fator g_0 , cuja valor dever ser assumido como 2 em função dos dados empíricos (TOMONAGA, 1997), o que resulta em um fator 4, diferindo assim da fórmula empírica. Mas este é apenas um dos problemas a ser enfrentado por Kronig, que também terá de lidar com a oposição de Pauli às suas ideias. Uma vez que (3.9) exprime o resultado da bissociação qualitativa empreendida por Kronig, consideramos que a referida expressão matemática pode ser classificada na categoria de *Bissociação quantitativa*.

Lembremos que Pauli viajara ao laboratório de Landé para testar suas ideias sobre o que viria a ser o princípio da exclusão. A quantidade de elétrons contidas em cada uma das camadas K , L e M já era um fato confirmado por medidas experimentais produzidos a partir de espectros de absorção de Raios-X. Jammer (1989) destaca os trabalhos experimentais de Barkla (em 1911), de Moseley (em 1913), de Kossel (em 1916) e as contribuições teóricas de Bohr que, com base nestes trabalhos irá propor, em 1921, a distribuição quantitativa dos elétrons em cada uma das camadas. As previsões referentes a quantidade de linhas espectrais em comparação com aquelas experimentalmente observadas mostrava a necessidade de mais um número quântico para descrição dos níveis de energia. Desse modo, verificou-se que não apenas o espectro do elétron óptico, mas também o espectro de emissão dos elétrons mais internos também apresentavam multipletos.

O estabelecimento destas observações experimentais como fato científico reconhecido, somadas ao refinamento conceitual posterior necessário à sua compreensão (JAMMER, 1989) têm grande importância para as ideias de Pauli em dois aspectos: primeiramente, porque

permite sugerir que os multipletos estão relacionados a alguma propriedade dos elétrons em geral, e não necessariamente de uma interação do elétron óptico e um suposto momento magnético do caroço; em segundo lugar, porque a distribuição dos elétrons nas camadas K , L e M , tal como estabelecido, poderia ser justificada pela adoção de um número quântico com apenas dois valores possíveis, o que de fato veio a ser proposto por Pauli como um “duplo valor peculiar e classicamente indescritível nas propriedades teórico quânticas do elétron luminoso” (PAULI, 1925, p. 385).

Estando constantemente ciente do problema fundamental de Bohr de por quê nem todos os elétrons, para o estado fundamental de um átomo, ocupam a camada mais interna, Pauli percebeu que sua ideia ganha importância geral se interpretada como operando um princípio de proibição. Explicou a estrutura da camada do átomo e os períodos do sistema periódico dos elementos porquê excluiu a possibilidade de que mais de um elétron ocupe uma órbita ou estado [...] (JAMMER, 1989, p. 139). (34)

[...] assim como o artigo de Stoner sobre a distribuição de elétrons foi fundamental para a descoberta do princípio de exclusão de Pauli, então, por sua vez, o artigo de Pauli sobre o princípio de exclusão influenciou a descoberta do spin. Na verdade, o conceito de elétron giratório foi concebido - apenas para ser rejeitado - por Kronig e mais tarde foi redescoberto, por assim dizer, por Goudsmit e Uhlenbeck sob a influência do trabalho de Pauli (JAMMER, 1989, p. 141). (35)

Ambos SA, (34) e (35), presentes na narrativa de Jammer ilustram o papel do estado do conhecimento estabelecido. Notemos que o *problema fundamental de Bohr* impacta diretamente sobre a proposição do princípio da exclusão de Pauli e este, por sua vez, terá impacto direto na proposição da bissociação do elétron girante. Neste sentido, estes SA podem ser classificados na categoria da *Experiência disponível*.

O princípio da exclusão de Pauli, como ficou conhecido, foi proposto e fundamentado em termos puramente fenomenológicos, aspecto este que Pauli esperava ser superado futuramente, quando “uma compreensão mais profunda dos princípios fundamentais da teoria quântica [...] permitiria colocar o princípio da exclusão em bases mais firmes” (JAMMER, 1989, p. 139). É importante salientar que a proposição de um quarto número quântico do elétron para uma correta interpretação do efeito Zeeman anômalo não apresentava qualquer interpretação física para o mesmo, pois era acompanhada pela convicção de que o mesmo não poderia ser descrito classicamente (KAPLAN, 2020) – esta convicção de Pauli é também relatada por Tomonaga, como já indicado anteriormente (ver pág. 111).

De acordo com Tomonaga (1997), na ocasião da visita de Pauli a Landé, Kronig é apresentado Pauli e aproveita a oportunidade para expor suas ideias sobre a autorrotação do elétron. Pauli, contudo, não demonstrou nenhum interesse. Em seguida, Kronig viaja para

Copenhague e por lá suas ideias também não despertaram interesse. Problemas decorrentes do fator g_0 presente em sua equação e das dificuldades adicionais decorrentes da autorrotação do elétron desestimulam Kronig à publicar suas ideias, conforme relata Tomonaga:

Além disso, [Kronig] não estava confiante devido à diferença em relação ao experimento por um fator de dois nos intervalos de nível e , além disso, a ideia de um elétron auto rotativo apresenta uma variedade de dificuldades quando examinada dentro da estrutura da teoria clássica dos elétrons. (Por exemplo, se o tamanho do elétron é e^2/mc^2 como H. A. Lorentz considerou, é necessária uma rotação tão rápida para ter um momento angular auto rotativo de $1/2$ que a superfície do elétron atinge uma velocidade dez vezes maior que a da luz.) Por todas essas razões, Kronig decidiu não publicar sua ideia (TOMONAGA, 1997, p. 35). (36)

O SA (36) evidencia dois aspectos relacionados ao quadro da experiência disponível. O primeiro ponto diz respeito ao quadro experimental e o segundo, ao quadro teórico. Conforme relatado por Tomonaga, o fator g_0 presente na equação derivada por Kronig não descreve corretamente os dados experimentais. Além disso, a ideia da autorrotação mostrava-se incompatível com a teoria clássica do elétron vigente naquela época, desenvolvida por Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928). A partir desta teoria, os cálculos indicavam que a superfície de um elétron em autorrotação deveria atingir velocidades superiores a velocidade da luz para poder produzir o momento magnético previsto a partir dos dados experimentais. Dessa forma, o SA (36) pode ser classificado na categoria *Critério de rejeição*, uma vez que evidencia dois critérios de rejeição aos quais a bissociação de Kronig foi submetida: o desacordo com a base empírica e também com o quadro teórico conceitual vigente para o elétron.

Contudo, a ideia da autorrotação do elétron foi oficialmente publicada por G. Uhlenbeck e S. Goudsmit no mesmo ano (1925), 6 meses depois. Sem calcular os intervalos de energia para os dupletos, após a submissão do trabalho eles requisitaram a opinião de H. Lorentz, que uma vez mais afirmaria a inadequação de tal proposição:

[...] no outono de 1925, Uhlenbeck e Goudsmit publicaram exatamente a mesma ideia em *Naturwissenschaften*. Na verdade, depois de enviar seu trabalho, eles pediram a opinião de Lorentz, que os disse ser quase impossível na teoria clássica dos elétrons (TOMONAGA, 1997, p. 36, grifo do autor). (37)

O relato de Tomonaga indicado no SA (37) evidencia uma manifestação da rejeição, visto que Lorentz afirmara a Uhlenbeck e Goudsmit que sua ideia não era viável, evidenciando também o motivo – a incompatibilidade com a teoria clássica dos elétrons. Assim, este SA possui fragmentos das categorias *Manifestação de rejeição* e *Experiência disponível*.

Contudo, decorridos 6 meses desde a tentativa de Kronig em apresentar as mesmas ideias em Copenhague, Uhlenbeck e Goudsmit encontraram um cenário diferente.

Quando eles publicaram seu artigo, eles não tinham calculado os intervalos dos níveis de estado de dupletos. Contudo, durante o mero meio ano após Kronig ter divulgado sua ideia em Copenhague, a atmosfera havia mudado drasticamente. Bohr começou a mostrar muito interesse na ideia da ousada dupla, Einstein os aconselhou a usar [3.8], que Kronig já usara para calcular os intervalos de nível, e Bohr até anexou uma breve recomendação ao artigo (TOMONAGA, 1997, p. 36). (38)

Conforme indicado no SA (38), Tomonaga relata não apenas o interesse de Bohr pelo trabalho de Uhlenbeck e Goudsmit, mas também seu apoio, endossando explicitamente a ideia da autorrotação do elétron conforme carta de N. Bohr ao editor da revista Nature, anexada ao artigo de Uhlenbeck e Goudsmit (1926). Este SA pode então ser classificado na categoria da *Manifestação de aceitação*, uma vez que evidencia a atitude de Bohr em aprovar as ideias de Uhlenbeck e Goudsmit. Outro aspecto a ser destacado refere-se à mudança de cenário, ocorrida desde a proposição por Kronig da ideia da autorrotação. Como bem estabelece Palma (2015), as condições da experiência disponível são históricas e não meramente técnicas.

A *mudança de atmosfera* em Copenhague tem relação com uma sequência de episódios, brevemente relatados por Rüdinger e Stolzenburg (1984). De acordo com os autores, Bohr fora convidado para participar da comissão para a celebração do quinquagésimo aniversário do Doutorado de Lorentz, a ser realizado em 11 de dezembro de 1925. O evento foi precedido pela publicação do artigo de Uhlenbeck e Goudsmit, onde eles introduzem o conceito do elétron giratório. Dias antes do evento, em 9 de dezembro, Bohr encontra-se com Pauli e Stern:

[1] Fui recebido na estação ferroviária de Hamburgo por Pauli e Stern, que me avisaram com veemência contra a aceitação da hipótese do spin. Eles ficaram aliviados quando, [2] devido à aparente dificuldade em determinar o mecanismo do acoplamento spin órbita, [3] expressei ceticismo em relação ao valor dessa hipótese (BOHR apud RÜDINGER; STOLZENBURG, 1984, p. 229). (39)

Neste SA, os trechos [1] e [3] evidenciam a *Manifestação de rejeição* de Pauli, Stern e Bohr à proposição do elétron girante. No trecho [2], podemos verificar também uma das razões apontadas por Bohr, a *aparente dificuldade* em justificar as origens do acoplamento spin órbita. Desse modo, este trecho do SA (39) pode ser classificado na categoria *Critério de rejeição*.

A respeito da dificuldade mencionado por Bohr, é importante ressaltar (e recolocar) alguns aspectos. No modelo ERSATZ, Landé conferia ao *caroço* um suposto momento magnético, o qual podia interagir com o momento magnético do elétron radiante da última

camada, devido ao seu movimento orbital, justificado pela lei de Bio-Savart, sendo este o mecanismo da interação spin órbita neste modelo. A proposição de Uhlenbeck e Goudsmit não atribui ao caroço nenhum papel em termos de momento magnético; ao contrário, motivados pelas ideias de Pauli, voltam sua atenção para o elétron radiante, atribuindo a ele o quarto número quântico, conferindo-lhe um movimento de autorrotação, e atribuindo a este movimento a causa da propriedade magnética do elétron. Faltava, contudo, justificar a origem da interação magnética, ou seja, onde estaria a segunda propriedade magnética do átomo capaz de interagir com o elétron girante. A solução para este impasse foi relatada por Bohr em correspondência destinada a Kronig, em 1926.

Retomando, após o encontro com Pauli e Stern na estação em 9 de dezembro de 1925 – SA (39) –, Bohr segue para seu compromisso que ocorreria dois dias depois, em Leiden, onde encontra Einstein:

Quando vim à Leiden para os festivais de Lorentz (dezembro de 1925), Einstein perguntou, logo no primeiro momento em que o vi, o que eu acredito sobre o elétron girante. Após minha pergunta sobre a causa do acoplamento mútuo necessário entre o eixo de rotação e o movimento orbital, ele explicou que esse acoplamento era uma consequência imediata da teoria da relatividade. Essa observação foi uma revelação completa para mim, e nunca mais vacilei em minha convicção de que finalmente chegamos ao fim de nossas tristezas (BOHR apud RÜDINGER; STOLZENBURG, 1984, p. 229). (40)

Aqui, uma vez mais chamamos a atenção para o quadro da experiência disponível, “que se enriquece e se reconfigura mediante novas ME” (PALMA, 2015, p. 45). A ideia de um elétron girante, uma ME sugerida por Kronig que embora inicialmente não encontra um terreno fértil, irá instigar novas possibilidades para a aplicação de conceitos da relatividade, – aqui sugeridos por Einstein a Bohr. Neste sentido, o SA (40) pode ser classificado na categoria da *Reconfiguração*.

Ao retornar de Leiden, motivado pelas ideias de Einsteins sobre a origem relativística da interação spin órbita, Bohr dedica-se em apoiar a ideia do elétron girante de Uhlenbeck e Goudsmit:

[1] Em sua viagem de volta, Bohr tentou convencer Heisenberg e Jordan em Göttingen e Pauli, que conheceu em Berlin, [...] da correção das considerações de Goudsmit e Uhlenbeck. [2] Mas Pauli permaneceu absolutamente antagônico à ideia, enquanto Heisenberg aparentemente vacilou (RÜDINGER; STOLZENBURG, 1984, p. 229). (41)

Eu também fui tão influenciado pelo otimismo de Bohr em relação à teoria de Goudsmit que ficaria feliz por um elétron magnético (HEISENBERG apud RÜDINGER; STOLZENBURG, 1984, p. 229). (42)

O trecho [1] SA (41) evidencia o esforço de Bohr em difundir a justificativa relativística para a interação spin órbita buscando, assim, apoio para a ideia do elétron girante. Este SA é, portanto, uma *Manifestação de aceitação* à bissociação proposta por Uhlenbeck e Goudsmit. O trecho [2] deste mesmo segmento exprime uma *Manifestação de rejeição* de Pauli.

O segmento subsequente, indicado pelo SA (42), corresponde ao trecho de uma correspondência enviada por Heisenberg à Pauli em 24 de dezembro de 1925, dias depois do retorno de Bohr. Como pode ser constatado, o esforço de Bohr já começa a repercutir entre os cientistas – a nota enviada à Nature por Uhlenbeck e Goudsmit expõem suas ideias sobre o elétron girante; ela é acompanhada por uma pequena nota complementar de apoio, assinada por Bohr e indicando, inclusive, as vantagens advindas desse modelo (BOHR, 1926; UHLENBECK; GOUDSMIT, 1926). Em resumo, o SA (42) evidencia uma *Manifestação de aceitação* da ideia da bissociação do elétron girante.

Originalmente, Uhlenbeck e Goudsmit publicam o trabalho em que sugerem a autorrotação do elétron na revista *Die Naturwissenschaften* (UHLENBECK; GOUDSMIT, 1925). Nesta publicação, os autores apresentam não apenas a ideia, mas também discutem qualitativamente as possibilidades dela decorrentes para a resolução de algumas das inconsistências teóricas presentes nas tentativas de descrever os desdobramentos espectrais relacionados ao efeito Zeeman anômalo, mais especificamente, a separação dos níveis que apresentavam dupletos (RÜDINGER; STOLZENBURG, 1984). Na nota publicada na seção de cartas ao leitor da revista Nature, Uhlenbeck e Goudsmit destacamos o seguinte trecho:

[...] chamamos atenção em uma nota recente [...] para a possibilidade de aplicar o elétron em rotação para interpretar uma série de características da teoria quântica do efeito Zeeman, que foram trazidas à luz pelo trabalho especialmente de von Lohuisen, Sommerfeld, Landé e Pauli e também da análise de espectros complexos em geral (UHLENBECK; GOUDSMIT, 1926, p. 246). (43)

Como observado, o SA (43) evidencia a ideia da rotação do elétron sem abordar aspectos formais e/ou matemáticos decorrentes dessa ideia. Desse modo, o SA pode ser classificado na categoria *Bissociação qualitativa*.

Em outro trecho do artigo os autores discutem uma das justificativas para a adoção da ideia; além da possibilidade de interpretar adequadamente os dados experimentais, a hipótese da autorrotação do elétron era “especialmente importante para explicar a estrutura do espectro de Raios-X” (UHLENBECK; GOUDSMIT, 1926, p. 264), o que não era prontamente atendido por outras perspectivas sugeridas para a descrição do problema. Os autores estão se

referindo ao modelo de Landé, o qual leva em conta um quarto número quântico que descreve satisfatoriamente a estrutura fina do átomo de hidrogênio, sobretudo por descrever as transições eletrônicas em concordância com o princípio da correspondência, mas que falhava neste quesito quando outras situações experimentais eram levadas em conta, qual era o caso dos níveis de Raios-X. A este respeito, os autores afirmam:

Deve-se enfatizar que nossa interpretação está em total conformidade com o princípio da correspondência no que diz respeito às regras de combinação dos níveis de Raios-X (UHLENBECK; GOUDSMIT, 1926, p. 265). (44)

O SA (44) evidencia, portanto, uma das justificativas apresentadas pelos autores em favor de sua ideia, mobilizando para isso aspectos formais vigentes no quadro teórico conceitual. Desse modo, este SA pode ser classificado na categoria *Critério de aceitação*.

Os autores seguem descrevendo outras vantagens advindas de sua hipótese:

A suposição do elétron girando leva a um novo insight sobre a notável analogia entre a estrutura de multipletto do espectro óptico e a estrutura do espectro de raios-X, que foi enfatizada especialmente por Landé e Millikan. Embora a tentativa de referir essa analogia a um efeito de relatividade comum a todas as estruturas tenha sido muito insatisfatória, ela obtém uma explicação imediata na hipótese do spin do elétron (UHLENBECK; GOUDSMIT, 1926, p. 265). (45)

Novamente podemos constatar a intenção dos autores em promover a aceitação da hipótese do spin do elétron, agora justificada pela possibilidade de *um novo insight, uma explicação imediata*, para outra dificuldade relacionada aos espectros óptico e de Raios-X. Assim, o SA (45) pode ser também classificado na categoria *Critério de aceitação*.

A argumentação apresentada pelos autores, ainda que qualitativamente, reforça, como vimos, várias vantagens da hipótese do elétron em rotação. Apesar disso, os autores não deixam de reconhecer um aspecto claramente problemático de sua teoria: a divergência entre os resultados previstos e os dados experimentais. Eles reconhecem que sua hipótese...

[...] leva, em um cálculo preliminar, a larguras dos dupletos de spin duas vezes maiores do que as exigidas pela observação. Deve ser lembrado, entretanto, que estamos lidando aqui com problemas que, para sua solução final, requerem um estudo mais detalhado da mecânica quântica e talvez também de questões relativas à estrutura do elétron (UHLENBECK; GOUDSMIT, 1926, p. 265).

É importante salientar que a hipótese de Uhlenbeck e Goudsmit apresenta fundamentalmente dois problemas, um de ordem teórica e outro de ordem empírica. A citação

acima evidencia claramente a divergência entre os valores calculados para as larguras dos dupletos e aqueles obtidos experimentalmente. Por outro lado, as questões relacionadas com a estrutura do elétron a que os autores estão se referindo, diz respeito à inconsistências entre a hipótese da autorrotação do elétron e à teoria da relatividade, apontados por Lorentz (PAIS, 1972) – que já indicamos anteriormente e rerepresentaremos mais adiante.

Como já indicado, o artigo de Uhlenbeck e Goudsmit é seguido de uma nota assinada por N. Bohr, através da qual o cientista manifesta claro apoio à nova hipótese. A dificuldade em representar os estados estacionários do átomo é apontada por Bohr como sendo inerente às limitações advindas de uma representação dos átomos por um modelo mecânico. No entanto, a hipótese do elétron girante, “apesar da incompletude das conclusões que podem ser derivadas dos modelos, promete ser um suplemento muito bem-vindo às nossas ideias de estrutura atômica” (BOHR, 1926, p. 265), e segue afirmando:

[1] Na verdade, como o Sr. Goudsmit e o Sr. Uhlenbeck descreveram em sua carta, essas hipóteses lançam uma nova luz sobre muitas das dificuldades que têm intrigado os pesquisadores neste campo durante os últimos anos. Na verdade, abre uma perspectiva muito esperançosa de sermos capazes de nos preocupar mais extensivamente com as propriedades dos elementos por meio de modelos mecânicos, pelo menos na forma qualitativa característica das aplicações do princípio da correspondência. [2] Essa possibilidade deve ser mais aceita na atualidade, quando se abre a perspectiva do tratamento quantitativo do problema atômico pela nova mecânica quântica iniciada pelo trabalho de Heisenberg, que visa a uma formulação precisa da correspondência entre a mecânica clássica e a mecânica quântica (BOHR, 1926, p. 265). (46)

O trecho [1] do SA (46) evidencia o endosso de Bohr à hipótese de Uhlenbeck e Goudsmit. Notemos que este apoio fundamenta-se, dentre outros aspectos, em uma *perspectiva muito esperançosa* de aplicar mais extensivamente os modelos mecânicos, ainda que de forma qualitativa, em concordância com o princípio da correspondência. Neste sentido, o trecho [1] do referido SA evidencia uma *Manifestação de aceitação*. O trecho [2], por outro lado, apresenta uma das justificativas para o endosso de Bohr a proposição do elétron girante – um tratamento quantitativo a partir da nova mecânica quântica de Heisenberg. O trecho [2] do SA (46) evidencia, também, um *Critério de aceitação*.

Apesar do reconhecimento e apoio de Bohr, a ideia da autorrotação do elétron não deixou de receber duras críticas. Pauli expressa oficialmente sua posição contrária por meio de uma carta enviada a revista Nature, onde expõem as dificuldades advindas da autorrotação do elétron.

[...] Pauli disse em sua palestra no Nobel que ele ainda era definitivamente contrário à ideia de Uhlenbeck e Goudsmit. Agora, como para Kronig, ele enviou uma carta à *Nature*, onde [o] artigo foi publicado, criticando-o e enumerando muitas dificuldades de um elétron auto rotativo (TOMONAGA, 1997, p. 36). (47)

Como podemos constatar, no SA (47) Tomonaga relata sobre as objeções de Pauli. Este segmento pode ser classificado na categoria *Manifestação de rejeição*, uma vez que evidencia as atitudes tomadas por Pauli para manifestar sua rejeição a ideia da autorrotação do elétron. Além disso, dado que Tomonaga relata que Pauli enumerou *muitas dificuldades* relacionadas ao elétron auto rotativo, este SA também evidencia implicitamente aspectos da experiência disponível, que explicitaremos em breve.

Fazemos aqui um registro importante. A ideia do elétron girante foi inicialmente proposta por Kronig alguns meses antes da Uhlenbeck e Goudsmit, conforme relatamos anteriormente. Como ficou claro, tal proposição não foi bem recebida e como esperado, Kronig tomou conhecimento destes fatos com relativa insatisfação. De acordo com Rüdinger e Stolzenburg (1984, p. 233), em carta enviada a Kramers (março de 1926), Kronig se diz distintamente surpreso com a publicação do artigo de Uhlenbeck e Goudsmit na revista *Nature*, questionando quais seriam os novos argumentos agora utilizados para convencer os físicos teóricos, alegando que todas as novas ideias publicadas já haviam sido apresentadas por ele à Landé e Pauli, 12 meses antes. Manifestando seu desapontamento, Kronig escreve:

Lamento um pouco que devido às críticas adversas não tenha publicado nada na época, pois uma ideia simples e concreta como o elétron giratório teria um valor publicitário considerável neste país, e infelizmente a publicidade é indispensável aqui para o sucesso material. No futuro, confiarei mais em meu próprio julgamento e menos no de outros (KRONIG apud RÜDINGER; STOLZENBURG, 1984, p. 233). (48)

No SA (48), onde Kronig expressa seu desapontamento, podemos notar uma crítica deferida pelo cientista à cultura social e científica daquele país, onde *infelizmente a publicidade é indispensável para o sucesso material* e a ideia do elétron giratória teria, além de um valor científico, também *um valor publicitário considerável*. Neste sentido, consideramos que o referido SA evidencia aspectos da *Contextualização* sócio cultural, que Kronig considera decisivos – ainda que tardiamente – para a publicação de suas ideias sobre o elétron girante.

Dias depois, em uma segunda carta enviada a Kramers, Kronig reafirma sua posição de idealizador do elétron giratório e suas palavras parecem revelar uma mistura de inquietação e desapontamento, diante de um aparente descrédito de Kramers:

Se você achar difícil de acreditar no que lhe disse em minha última carta, devo encaminhá-lo a Landé, que certamente se lembrará de minha conversa com ele; Pauli também dificilmente poderia ter esquecido. Se a memória desses senhores falhar, então estou à mercê de sua boa opinião, já que o “querido pai acima” não pode ser empregado como testemunha. De qualquer forma, aprendi um pouco de sabedoria de vida com essa tragicomédia (KRONIG apud RÜDINGER; STOLZENBURG, 1984, p. 233, grifos do autor).

Ainda no mesmo mês (março de 1926), Bohr teve a oportunidade de esclarecer, por meio de carta enviada a Kronig, alguns aspectos deste incidente de autoria. Bohr relata que sua incompreensão de como se daria a origem do acoplamento spin órbita nesta nova perspectiva do elétron girante acabou alimentando seu desinteresse pelo assunto, mas que tempos depois, ao encontrar Einstein, esta lacuna pôde então ser preenchida, e conforta Kronig:

Sob esta situação, foi com consternação e profundo pesar que ouvi em sua carta a Kramers que você não apenas, mais de um ano atrás, teve as mesmas ideias que as publicadas neste outono por Goudsmit e Uhlenbeck, mas que você também desde o início entendeu sua influência no quebra-cabeça dos dupletos da relatividade. Agora, até suspeito que é de você mesmo que a compreensão do acoplamento mútuo entre o spin e o movimento orbital chegou ao conhecimento dos físicos (BOHR apud RÜDINGER; STOLZENBURG, 1984, p. 235).

Por fim, Bohr encerra a carta lamentando por não ter ficado claro a ele as ideias originais de Kronig sobre o elétron girante e solicita que na eventualidade de qualquer nova publicação nesta direção, estaria muito interessado em receber qualquer relato detalhado sobre o desenvolvimento destas ideias.

A bissociação do elétron girante, agora publicada sob a autoria de Uhlenbeck e Goudsmit, irá deflagrar uma série de objeções, inclusive por parte de Kronig. Conforme relata A. Pais, objeções à ideia da rotação do elétron partiram de vários cientistas:

G. E. Uhlenbeck me contou sobre duas visitas que fez a Lorentz. A primeira, por instigação de Ehrenfest, foi contar a Lorentz sobre o spin. A segunda foi a pedido de Lorentz. [1] Na ocasião, Lorentz, sempre gentil e cortês, disse a Uhlenbeck que apreciava muito as perspectivas que o spin oferecia para uma melhor compreensão dos espectros; [2] mas também que novos problemas pareciam ser levantados pela existência de um momento angular intrínseco de tal magnitude. (Para Lorentz, o movimento giratório clássico não era uma preocupação nova.) [3] Pode-se bem imaginar - tais problemas apareceriam como velocidades de superfície da ordem de $137c$ (PAIS, 1972, p. 84). (49)

No trecho [1] do SA (49) podemos constatar que Lorentz expressa certo otimismo com

a ideia do spin e suas potencialidades para uma melhor compreensão do espectros. No entanto, no trecho [2], Lorentz manifesta uma objeção direta à ideia do spin proposta por Uhlenbeck e Goudsmit. A objeção – trecho [3] – está relacionada com a velocidade da superfície de um elétron em rotação, uma vez que, para reproduzir os dados experimentais, a magnitude do momento magnético intrínseco implicaria em uma velocidade da superfície de rotação superior a velocidade da luz – 137 vezes maior –, algo claramente inconsistente com as ideias da relatividade. Desse modo, podemos classificar o trecho [2] do SA (49), que contém a objeção de Lorentz, na categoria *Manifestação de rejeição*; o trecho [3] deste SA, no qual temos explicitado um dos argumentos de Lorentz para justificar a sua objeção, é então classificado na categoria *Critério de rejeição*.

Conforme relatado por Pais (1972), as objeções à ideia do spin foram motivadas por várias inconsistências qualitativas e quantitativas, dentre as quais, a previsão para o tamanho de um elétron que, em rotação, produzisse efeitos compatíveis com os dados espectroscópicos obtidos pelos experimentos. Em um trabalho publicado por F. Rasetti e E. Fermi em 1926, estes cientistas apresentam um aparente paradoxo que emerge da proposição do elétron girante. Neste trabalho, Rasetti e Fermi apresentam aspectos do modelo proposto por Landé, os problemas que emergem de seu modelo, bem como a possibilidade de superação destas limitações a partir da proposição do elétron girante por Uhlenbeck e Goudsmit, apontando, inclusive, outras vantagens (RASETTI; FERMI, 1926). Não obstante, chamam a atenção para uma consequência direta da proposição do elétron girante, a saber, a previsão das dimensões para o diâmetro do elétron, para o qual obtém um valor da ordem de $10^{-12}cm$. Sobre este valor calculado, eles afirmam:

Este valor é cerca de 20 vezes maior do que o que comumente se acredita ser o raio eletrônico. Na realidade, não há medida direta deste último; no entanto, a desvantagem é séria, porque é sabido que um número muito considerável de elétrons está contido no [caroço]. Por outro lado, as dimensões lineares da estrutura do núcleo são conhecidas com grande precisão a partir das medidas do desvio das partículas alfa na passagem pela matéria, e são, como se sabe, da ordem de $10^{-12}cm$. Como podemos ver, os dois fatos parecem bastante inconciliáveis, e não se admite que o elétron, ao passar a fazer parte da estrutura [do caroço], mude consideravelmente de natureza (RASETTI; FERMI, 1926, p. 234). (50)

Neste SA, (50), destacamos dois aspectos importantes. O primeiro diz respeito a uma *desvantagem* advinda da hipótese do elétron em rotação. Os cientistas chamam a atenção para o fato de que a hipótese de um elétron girante implica em uma consequência direta acerca das dimensões do elétron (afinal não é possível obter um momento magnético a partir de um

elétron puntual girando em torno de si mesmo); Rasetti e Fermi demonstram que, considerando a teoria eletromagnética e a relatividade restrita (RASETTI; FERMI, 1926), o valor calculado para o raio do elétron é incompatível com o que se acredita ser o raio eletrônico e também com as dimensões do núcleo, estimadas a partir dos experimentos de espalhamento de partículas alfa. Um segundo ponto importante a ser ressaltado diz respeito a quantidade de elétrons no *caroço* atômico, fato este que é ressaltado pelos cientistas como um aspecto *irreconciliável* com as dimensões estimadas para um elétron girante. Como vemos, o contexto teórico experimental revela tensões advindas da proposição de uma bissociação, estimulando a comunidade científica a se posicionar e argumentar. Assim, o SA (50) pode ser classificado na categoria da *Experiência disponível*, uma vez que expõem elementos teóricos e experimentais vigentes.

Devemos salientar que Rasetti e Fermi posicionam-se em favor da ideia da autorrotação do elétron proposta por Uhlenbeck e Goudsmit, apesar das dificuldades que emergem de tal proposição.

Parece-nos, a partir dessa discussão, que podemos concluir que, apesar das sérias dificuldades energéticas que mencionamos, a hipótese do elétron em rotação não deve ser abandonada por isso. Claro que não pensamos que deva ser tomado muito literalmente, no sentido de que se deva realmente imaginar o elétron como um corpo macroscópico carregado de eletricidade e girando em torno de si mesmo, já que o essencial para as aplicações é que o elétron possui um momento mecânico e um momento magnético, independentemente de representações de modelagem muito particulares sobre a origem destes (RASETTI; FERMI, 1926, p. 9–10). (51)

Como vemos, no SA (51) os cientistas manifestam apoio – mas não sem ressalvas – à bissociação da autorrotação do elétron. Desse modo, o SA pode ser classificado na categoria de *Manifestação de aceitação*. Vale ressaltar a cautela dos cientistas ao afirmarem que a ideia não deva ser tomada *muito literalmente*, e se dispõem, inclusive, a certas concessões metodológico epistêmicas, *já que o essencial para as aplicações é que o elétron disponha dos efeitos mecânico e magnético advindos da autorrotação, independente de representações*. Notamos que, apesar de haver uma espécie de controle, uma busca por manter a coerência lógica no quadro teórico experimental vigente, há também uma pré disposição à flexibilização de alguns dos critérios de validação.

Ressaltamos que o controle é um dos aspectos mencionados por Palma que diferencia as ME das outras metáforas, uma vez que “o poder explicativo e inovador da metáfora também pode ser sua fraqueza” (PALMA, 2015, p. 26). É, portanto, uma das características da ME trazer consigo uma extensão dos significados envolvidos na bissociação, algo que, como evidenciado no SA 51 é mantido sob vigilância pela comunidade científica. Nas palavras de

Palma:

A novidade [...] implica uma tensão ou uma dialética compreensão incompreensão, já que ilumina uma certa realidade sob uma nova perspectiva, mas por ser - como dizia Black - um sistema de tópicos sobre o assunto em questão, e, ao mesmo tempo, um recorte das características que entram na metáfora em detrimento de outras, pode levar a excessos ou desvios abrangentes (PALMA, 2015, p. 26–27).

Apesar da relativa flexibilização das regras, Rasetti e Fermi ainda mostram-se comprometidos com os aspectos empírico metodológicos:

Em qualquer caso, a questão não pode ser considerada encerrada até que haja experiências mais diretas confirmando ou [refutando] a hipótese do elétron em rotação (RASETTI; FERMI, 1926, p. 10). (52)

O SA (52) pode ser classificado na categoria da *Experiência disponível*, uma vez que explicita o papel regulador dos compromissos metodológicos assumidos por uma comunidade científica.

No mesmo ano da publicação do artigo de Rasetti e Fermi, Kronig publica na revista Nature um pequeno artigo, onde apresenta algumas críticas ao trabalho de Uhlenbeck e Goudsmit, alegando que eles “discutem as vantagens que tal visão traz consigo, mas falham em apontar algumas dificuldades sérias” (KRONIG, 1926, p. 550). Kronig irá apontar, qualitativamente, algumas dificuldades decorrentes da hipótese de autorrotação do elétron. Um dos pontos levantados diz respeito a geometria à ele atribuída, uma vez que “se for permitido usar conceitos pictóricos, como a palavra ‘spinning’ evidentemente implica, também ser permitido falar das ‘dimensões’ de um elétron” (KRONIG, 1926, p. 550, grifos do autor) – aqui, uma vez mais ressaltamos que o poder explicativo e o papel inovador das ME vêm acompanhados de limites difusos, sobre os quais a comunidade científica irá exercer rígido controle. Em seu artigo, Kronig relata que:

[...] a unidade elementar do momento magnético, o magneton de Bohr, é derivada de considerações dos movimentos orbitais dos elétrons com velocidades muito menores do que a da luz, em que a estrutura interna desses elétrons não entra de forma alguma, de modo que eles podem ser considerados como cargas pontuais (KRONIG, 1926, p. 550). (53)

É difícil ver, então, por que essa unidade elementar [o spin] também deveria ser característica do movimento interno dos elétrons, apesar das altas velocidades envolvidas, e isso com uma precisão que teria que ser considerável, se as medições no efeito Zeeman anômalo devam ser explicados desta forma (KRONIG, 1926, p. 550). (54)

Kronig aponta dificuldades de conciliação entre a hipótese do elétron em autorrotação e aspectos considerados como estabelecidos, por exemplo, o magneton de Bohr, cujas bases conceituais considerem o elétron como uma carga puntual. Assim, além de expor aspectos do quadro teórico conceitual vigente, Kronig está nitidamente empregando-os na elaboração de sua objeção à hipótese de Uhlenbeck e Goudsmit – algo que ficará evidente no último parágrafo de seu artigo. Deste modo, o SA (53) pode ser classificado na categoria da *Experiência disponível*, e o SA (54) na categoria *Critério de rejeição*.

Kronig reconhece que a validade da objeção apontada no SA (53) pode ser questionada “uma vez que não podemos nos justificar em aplicar os conceitos clássicos de cinemática e eletrodinâmica ao caso da estrutura do elétron” (KRONIG, 1926, p. 550), pois trata-se de uma hipótese baseada em um conceito “pictórico”, a respeito do qual se poderia alegar limitações inerentes ao uso da analogia. Kronig apresenta, então, outra dificuldade decorrente do emprego da hipótese de Uhlenbeck e Goudsmit para descrição do efeito Zeeman:

[...] é necessário assumir que um elétron orbital sempre tem o mesmo momento magnético, da ordem de um magneto de Bohr, não importa em que órbita ou em que átomo. Assim, podemos esperar que isso também permaneça verdadeiro quando um elétron faz parte da estrutura [do caroço]. Mas então o [caroço] também terá um momento magnético da ordem de um magneto de Bohr, a menos que os momentos magnéticos de todos os elétrons [do caroço] simplesmente se cancelem (KRONIG, 1926, p. 550). (55)

Para tal momento adicional do [caroço] não há lugar na teoria do efeito Zeeman, e a probabilidade de que em todos os [caroços] atômicos os momentos magnéticos dos elétrons se neutralizem parece *a priori* muito pequena (KRONIG, 1926, p. 550, grifo do autor). (56)

Conforme indicado, Kronig novamente fundamenta sua objeção em relação a hipótese do elétron em autorrotação invocando elementos do quadro teórico experimental. Desse modo, o SA (55) pode ser classificado na categoria *Critério de rejeição* e o SA (56) na categoria da *Experiência disponível*.

É importante salientar que Kronig foi um dos propositores da ideia da autorrotação do elétron, mas não chegou a publicar suas ideias a esse respeito, embora o tenha realizado extra oficialmente (TOMONAGA, 1997), apresentando a hipótese para vários cientistas – Uhlenbeck e Goudsmit atribuem em seu artigo a ideia de autorrotação do elétron a Compton

para explicar a “origem da unidade natural de magnetismo” (UHLENBECK; GOUDSMIT, 1926, p. 264).

No entanto, Kronig coloca-se notavelmente em uma posição contrária à proposição de Uhlenbeck e Goudsmit, o que pode ser verificado no último parágrafo de seu artigo, onde ele afirma que “a nova hipótese, portanto, parece antes efetuar a remoção do fantasma da família, do porão para o subsolo, ao invés de expulsá-lo definitivamente da casa” (KRONIG, 1926, p. 550), referindo-se ao fato de que a hipótese de Uhlenbeck e Goudsmit resolvem alguns aspectos do problema relacionado ao efeito Zeeman anômalo, mas suscita outros problemas.

No entanto, “quando a proposição da autorrotação do elétron estava em turbulência, o famoso trabalho de L. H. Thomas apareceu” (TOMONAGA, 1997, p. 37). Neste trabalho Llewellyn Hilleth Thomas (1903-1992) expõe o equívoco cometido tanto por Kronig quanto por Uhlenbeck e Goudsmit, relacionado a incorreta formalização matemática do referencial adotado na descrição da autorrotação do elétron.

Neste trabalho, ele mostrou que a discrepância entre a teoria e o experimento [...] é causado por uma definição incorreta do sistema de repouso de elétrons (TOMONAGA, 1997, p. 37). (57)

Quando isso foi esclarecido, mesmo Pauli decidiu não se opor categoricamente à ideia do elétron autorrotativo e, apesar de seu problema remanescente, ele aprovou essa ideia (TOMONAGA, 1997, p. 37). (58)

No SA (58) Tomonaga relata uma mudança no posicionamento de Pauli em relação a ideia da autorrotação do elétron. Por evidenciar a aprovação de Pauli a esta ideia, o referido SA pode ser classificado na categoria *Manifestação de aceitação*. Além disso, como pode ser observado o SA (57), a mudança no posicionamento de Pauli decorre de uma *Reconfiguração* da experiência disponível, estimulada pela bissociação publicada por Uhlenbeck e Goudsmit e agora aprimorada por Thomas. Vale ressaltar que a aceitação de Pauli estava condicionada à adequada concordância da descrição clássico mecânica do elétron auto rotativo com os dados experimentais. De acordo com Giulini (2008), o que Pauli aceitou de fato foi a ideia de que o elétron possuía um momento magnético intrínseco e um momento angular associado, mas não necessariamente a interpretação clássico mecânica.

As ideias de Thomas são apresentados em duas publicações. A primeira na forma de carta enviada à revista Nature (THOMAS, 1926), na qual apresenta suas ideias de forma geral e qualitativa. Na segunda publicação, Thomas expõem os detalhes matemáticos da correção proposta ao mecanismo de Uhlenbeck e Goudsmit, incluindo as adequações necessárias à

transformação de Lorentz e todos os detalhes referentes ao cálculo da separação dos níveis de dupletos (THOMAS, 1927). A rotação do elétron, como vimos, vem acompanhada de inevitáveis considerações sobre a estrutura do elétron, a respeito da qual Thomas reconhece os problemas já apontados por Lorentz – a violação do princípio da relatividade restrita, uma vez que o elétron em rotação implicava em velocidades superiores a da luz. A este respeito, Thomas assume uma posição especulativa:

Acho que devemos olhar para a teoria da relatividade geral para uma solução adequada do problema da “estrutura do elétron”; se de fato essa frase tem algum significado e se pode ser possível fazer mais do que dizer como um elétron se comporta em um campo externo (THOMAS, 1927, p. 14, grifo do autor).

Ressalta-se que o cálculo dos níveis de energia dos dupletos é derivado em uma seção específica do artigo intitulada por “A aplicação do princípio da correspondência para obter valores aproximados de termo” (THOMAS, 1927, p. 16), onde claramente pode-se constatar o uso do Princípio da Correspondência, a partir do qual Thomas calcula os valores dos níveis de separação dos dupletos, em total concordância dos os dados experimentais. O êxito obtido com a aplicação do Princípio da Correspondência é algo particularmente interessante para o fortalecimento da interpretação de Copenhagen – o nome de Bohr figura em uma nota final de agradecimentos, juntamente com os nomes de Kramers, Pauli e Heisenberg.

Em sua carta à Nature, apesar de não haver demonstrações detalhadas, Thomas apresenta argumentos qualitativos favoráveis à bissociação de Uhlenbeck e Goudsmit:

Embora sua teoria esteja em total concordância qualitativa com a observação, ela envolvia uma aparente discrepância quantitativa. O valor da precessão do eixo de rotação em um campo magnético externo necessário para explicar o efeito Zeeman parecia levar a uma separação de dupletos do dobro daquelas que são observadas. Essa discrepância, entretanto, desaparece quando o problema cinemático em questão é examinado mais de perto, do ponto de vista da teoria da relatividade (THOMAS, 1926, p. 514). (59)

No SA (59) Thomas não manifesta-se explicitamente à favor ou contra a bissociação do elétron girante – isto será feito no trecho final da publicação. Apesar disso, pode-se considerar que o referido SA aponta para uma *Manifestação de aceitação*, decorrente do desaparecimento da discrepância entre as previsões teóricas e dos dados observados, pois indica que uma das debilidades da bissociação pode ser superada.

No último parágrafo de sua carta enviada a Nature, após apresentar uma breve descrição quantitativa sem maiores detalhes, Thomas afirma:

A interpretação da estrutura fina das linhas de hidrogênio proposta pelos Srs. Uhlenbeck e Goudsmit agora não envolve mais nenhuma discrepância. Na verdade, como o Dr. Pauli e o Dr. Heisenberg gentilmente comunicaram em carta ao Prof. Bohr, parece possível tratar a separação do duplete, bem como o efeito Zeeman anômalo, rigorosamente com base na nova mecânica quântica. O resultado parece estar totalmente de acordo com o experimento [...] (THOMAS, 1926, p. 514). (60)

Conforme observa-se no SA (60), agora sim, explicitamente colocado por Thomas, há um *Critério de aceitação* em jogo – a correta interpretação para a estrutura fina do hidrogênio e a possibilidade de ser rigorosamente tratada com base na nova mecânica quântica – Thomas refere-se à formulação da mecânica quântica desenvolvida por Heisenberg e Jordan (THOMAS, 1927).

Devemos ressaltar que o convencimento de Pauli não ocorreu prontamente à publicação do trabalho de Thomas. Após a publicação deste trabalho, Bohr se encarrega de difundir as novas correções para a ideia do elétron giratório, comunicando Heisenberg e Pauli por meio de cartas. De acordo com Rüdinger e Stolzenburg (1984, p. 232), “Heisenberg estava pelo menos preparado para aceitar a explicação de Thomas”, mas o mesmo não ocorreu com Pauli.

Bohr tentou explicar com mais detalhes a física por trás dos cálculos de Thomas, mas Pauli ainda não estava convencido, explicando em detalhes que Thomas estava usando o quadro de referência errado. No entanto, depois de mais uma carta de Bohr, na qual ele incluiu mais detalhes dos cálculos de Thomas [...], Pauli finalmente teve que “se render incondicionalmente!” (RÜDINGER; STOLZENBURG, 1984, p. 232, grifo do autor). (61)

O SA 61 evidencia, enfim, a *Manifestação de aceitação* de Pauli à ideia do elétron girante, agora incorporada pela bissociação de Thomas, a qual soluciona em definitivo a discrepância com os dados experimentais, em especial para a separação dos níveis de duplete.

A seguir, no SA (62), apresentamos o fragmento da carta de Bohr enviada a Heisenberg, em fevereiro de 1926:

[1] Com essas esperanças, não nos permitimos nem mesmo nos assustar com as advertências paternais de Pauli contra minha imprudência usual e, portanto, nos últimos dias sentimos como um pequeno triunfo sobre os cavalheiros eruditos que, pelo menos, a dificuldade com o tão discutido fator de 2 parece ser apenas aparente. [2] Na verdade, Thomas, um jovem inglês que esteve aqui nos últimos seis meses, e que acredito que você conheceu pouco antes de partir, descobriu que os cálculos feitos até agora provavelmente contêm um erro no cálculo do movimento relativo do elétron e o núcleo. Junto está uma cópia de uma nota que Thomas enviou à Nature hoje (RÜDINGER; STOLZENBURG, 1984, p. 232). (62)

Como pode ser notado, o trecho [1] deste SA exprime o entusiasmo de Bohr e sua evidente *Manifestação de aceitação* à bissociação do elétron girante. Uma das motivações

apontadas por Bohr, indicado no trecho [2] deste SA, decorre da solução do problema relacionado ao valor do fator g , sendo este, portanto, um *Critério de aceitação*.

É importante esclarecer alguns aspectos da contribuição de Thomas à ideia da autorrotação do elétron. No sistema considerado por Kronig e Uhlenbeck e Goudsmit, o elétron é considerado em repouso e o caroço gira ao redor do elétron. Contudo, fixar o referencial sobre o elétron e aplicar a transformação de Lorentz para obter o campo magnético relativístico não é inteiramente correto, dado que o elétron não está totalmente em repouso, uma vez que apresenta um movimento de rotação em torno de si mesmo. Este aspecto implica em uma modificação na transformação de Lorentz. Para melhor esclarecer este ponto, uma analogia pode ser útil. Imagine que a Terra é o elétron e o Sol é o caroço; ignoremos o restante do sistema solar. Kronig, Uhlenbeck e Goudsmit consideraram a Terra imóvel e o Sol em movimento, transferindo para o Sol o movimento de translação da Terra, sem contudo, considerar o movimento de rotação diário da Terra. Para incluir este movimento de rotação diário (o equivalente a autorrotação do elétron) a transformação de Lorentz teve de ser revista, uma vez que sua forma foi originalmente estabelecida no âmbito da relatividade restrita para referenciais inerciais, ao passo que um elétron em autorrotação consiste em um sistema não inercial. De um modo geral, a ideia de Thomas deixa claro que “uma transformação de Lorentz com velocidade \vec{v}_1 seguida por uma segunda com velocidade \vec{v}_2 em uma direção diferente não leva ao mesmo referencial inercial que uma única transformação de Lorentz com velocidade $\vec{v}_1 + \vec{v}_2$ ” (PAIS, 1982, p. 164).

O esforço empreendido por Thomas foi desenvolver a transformação de Lorentz para um referencial não inercial girante. Tendo realizado esta modificação, a expressão obtida por Thomas para a separação dos níveis de energia dos estados de multipletto tem a seguinte forma:

$$\Delta W_T = +2(g_0 - 1) \left(\frac{e\hbar}{2mc} \right)^2 \frac{1}{a_H^3} \frac{(Z - s)^4}{n^3 k(k - 1)}. \quad (3.10)$$

Lembrando que $g_0 = 2$ por razões empíricas, o termo $(g_0 - 1)$ se reduz a unidade. Desse modo a equação (3.10) é inteiramente compatível com os dados experimentais. Devemos salientar que Thomas está considerando a mesma bissociação que Kronig e Uhlenbeck e Goudsmit – a autorrotação do elétron – mas está implementando um elemento novo à teoria da relatividade restrita – a transformação de Lorentz para um referencial não inercial girante. O SA dado pela equação (3.10) é então classificado na categoria *Bissociação*

quantitativa.

A partir dos trabalhos de Thomas tornou-se finalmente possível descrever apropriadamente os dados experimentais relacionados aos dupletos dos espectros óticos dos elementos alcalinos. Nas palavras de Tomonaga:

Depois de tudo, as discrepâncias entre teoria e experimento no espaçamento entre os níveis dos termos de duplete foram completamente resolvidas (TOMONAGA, 1997, p. 40). (63)

Além disso, as estruturas finas do H , He^+ , Li^{++} , Be^{+++} mostraram ser casos especiais dos termos do duplete alcalino, contrários à interpretação de Sommerfeld (TOMONAGA, 1997, p. 40). (64)

Como pode ser observado, no SA (63) Tomonaga relata a solução das discrepâncias entre a teoria e o experimento a partir da derivação da equação de Thomas, dada por (3.10). Notamos aqui a coerência entre as ideias científicas, a formulação matemática e interpretação/descrição do experimento. Assim sendo, o SA (63) exprime um *Critério de aceitação*.

O SA (64) pode ser classificado na categoria *Reconfiguração*, pois conforme relatado por Tomonaga, a bissociação da autorrotação do elétron implicou em uma reinterpretação para da base empírica, uma vez que a correta explicação para os níveis de energia dos multipletos dos elementos alcalinos estabeleceu as estruturas finas do H , He^+ , Li^{++} , Be^{+++} como casos especiais, além do que a interpretação de Sommerfeld precisou ser revista.

Por fim, Tomonaga (1997, p. 42) destaca que Thomas empregou conceitos clássicos, como a dinâmica de corpos rígidos e a eletrodinâmica, bem como aspectos da relatividade clássica e aspectos complementares a partir do princípio da correspondência. Entendemos que Tomonaga emprega o termo *relatividade clássica* fazendo referência a teoria originalmente desenvolvida por Einstein¹⁷. Dito de outro modo, Tomonaga está enfatizando que a solução para o problema dos multipletos foi obtida a partir de teorias não quânticas.

O que se tem, portanto, é a conciliação entre o quadro empírico da anomalia Zeeman com um novo quadro conceitual, ainda que incompleto e inconsistente – o problema de o elétron apresentar ou não uma geometria, o fator giromagnético ser 2 e assim violar o teorema de Larmor, e a impossibilidade de derivar o spin a partir de uma teoria ao invés de sua adição ad hoc. Mesmo diante de tais inconsistências, dois aspectos importantes podem ser ressaltados: a descrição relativística do acoplamento spin órbita e a atribuição de um quarto número quântico ao elétron – tudo isto sem violar o princípio da correspondência.

¹⁷ Conforme nota de rodapé número 1, em Malament (2007, p. 231).

Na ocasião da publicação de Thomas, em 1927, a mecânica matricial de Heisenberg e a mecânica ondulatória da Schrödinger já estavam bem estabelecidas e admitiam um momento angular semi-inteiro para o elétron, exceto pela condição de que o mesmo deveria ser postulado, ou seja, não era possível prevê-lo a partir destas teorias.

Incorporando o princípio da exclusão de Pauli às teorias de Heisenberg ou Schrödinger era possível ter um quadro muito geral para os espectros atômicos e para a tabela periódica (TOMONAGA, 1997). Contudo, algumas questões centrais ainda permaneciam:

Um problema não resolvido é a tremenda contradição entre um elétron auto rotativo e a teoria clássica do elétron. Além disso, por que o momento angular da autorrotação é $1/2$, por que g deve ser 2 e como a teoria clássica de Thomas pode ser quantizada ainda permanecem como problemas (TOMONAGA, 1997, p. 42).

Considerando o contexto da velha mecânica quântica, a questão do spin consolidou-se com o trabalho de Thomas, no sentido de que foi possível obter uma equação para descrever as linhas espectrais atendendo ao princípio da correspondência. Apesar destes avanços, alguns aspectos ainda permaneciam em aberto: não havia uma teoria da qual o spin do elétron pudesse ser derivado e a quebra do teorema de Larmor ainda não era adequadamente justificada (TOMONAGA, 1997). Considerando este contexto, a MEIC de Thomas foi exitosa, seguindo-se daí o processo de literalização.

A literalização transcorre ao longo do tempo, sendo possível indicar, ou a tendência deste processo, ou a sua concretização, por exemplo, consumada nos manuais. A esse respeito, Forman relata:

Podemos, portanto, compreender facilmente que os físicos muito rapidamente, e quase completamente, esqueceram que alguma vez existiu um enigma do duplete. De fato, pouco mais de um ano após Uhlenbeck e Goudsmit apresentarem sua proposta, Friedrich Hund assinou o prefácio de seu *Linienpektren und periodisches System der Elemente*, a primeira exposição sistemática da nova interpretação semiquantitativa de espectros atômicos baseada no spin do elétron. Hund nem mesmo levantou o enigma para formulá-lo. Em uma bibliografia muito completa, supostamente histórica, ele omitiu cuidadosamente o artigo de Landé propondo o enigma, um artigo que um ou dois anos antes era citado *pro forma* a cada menção às dificuldades enfrentadas pela física atômica (FORMAN, 1968, p. 174, grifos do autor). (65)

Este SA exprime a incorporação do novo conhecimento aos manuais, bem como o rápido esquecimento do enigma do duplete e a omissão consciente de Hund do artigo seminal de Landé a respeito do enigma, que outrora era referência fundamental para outros trabalhos.

O SA (65) indica claramente a *Literalização* da metáfora epistêmica relacionada ao elétron giratório.

Além disso, uma vez mais enfatizamos um dos aspectos mais proeminentes de uma ME – evidenciado pelo SA (65) –, que a distingue das metáforas literárias, qual seja, a sua ocultação e sua conversão em descrição óbvia, objetiva, literal:

[...] as ME não têm apenas uma história no sentido trivial em que em algum momento surgiram, mas também uma historicidade estrutural que radical e definitivamente as diferencia, agora sim, de suas primas distantes, as metáforas literárias e retóricas. O que começa como uma bissociação entre âmbitos distantes, [...] acaba sendo uma explicação literal, lexicalizada, na esfera adotiva para a qual foi extrapolada a princípio. Como A. Turbayne [1974] vislumbrou, quando lexicalizada ou literalizada, a metáfora deixa de ser uma metáfora viva para ser uma metáfora morta. A ideia de Turbayne é central para este argumento, uma vez que a grande diferença (que carrega outras diferenças importantes) entre uma metáfora literária e uma metáfora científica é que esta última esconde, oculta ou esquece sua origem, enquanto a primeira o exibe como seu grande triunfo, sua razão de ser e seu privilégio cultural (PALMA, 2015, p. 33).

Após a publicação dos trabalhos de Thomas, “a mecânica quântica foi completamente reescrita para ir além da teoria mais antiga e incompleta” (TOMONAGA, 1997, p. 43). O spin do elétron foi incorporado aos formalismos da Mecânica Quântica recém desenvolvidos, que contou com a contribuição de vários físicos, dentre os quais destacam-se Heisenberg e sua mecânica matricial, e Schrödinger, com sua mecânica ondulatória. Coube a Heisenberg e Ernest Pascual Jordan (1902-1980) incorporar o spin à mecânica matricial, em 1926 – e esta iniciativa opunha-se a descrição do spin em acordo com o princípio da correspondência. Um ano depois, Pauli iniciou suas tentativas para incorporar o conceito de spin ao formalismo de Schrödinger. Deve-se considerar que embora Pauli tenha reconhecido a pertinência dos argumentos de Thomas e a solução que este dera ao problema da anomalia Zeeman, na verdade o que Pauli reconheceu foi a ideia de o elétron possuir um momento magnético intrínseco, mas manteve suas objeções à interpretação mecânico clássica do spin (GIULINI, 2008).

Além de Heisenberg, Jordan e Pauli, outros cientistas buscaram incorporar o spin do elétron ao formalismo da mecânica quântica (CARRELLI, 1927; FOWLER, 1927; GUTH, 1927). O spin do elétron seria colocado em um quadro teórico empírico completo com os trabalhos de Dirac, concluídos em janeiro de 1928 (KRAGH, 1981; TOMONAGA, 1997). Apesar de a teoria de Dirac para o elétron conter naturalmente o spin, não significa que este

conceito deva ser necessariamente relacionado a um contexto relativístico (HALPRIN, 1978; HESLOT, 1983).

É um infeliz acidente da história que uma teoria contendo o spin do elétron de forma natural tenha surgido em um contexto relativístico, a saber, a bela teoria de Dirac. Como consequência, há uma tendência dos professores de física de graduação em deixar a impressão de que uma compreensão plena do spin só pode ser encontrada em uma teoria relativística. É claro que isso não é verdade, mas sem o recurso à teoria dos grupos pode parecer difícil fazer qualquer conexão entre a equação de Schrödinger e o spin que seja apropriado para alunos de graduação (HALPRIN, 1978, p. 768).

Como iremos discutir posteriormente, este aspecto tem algumas consequências relativamente negativas para o ensino do conceito de spin.

Apesar de que o spin seja adequadamente derivado a partir da teoria de Dirac ou da análise das representações do grupo de Lorentz, nestes âmbitos o spin é necessário para se “conseguir a conservação do momento angular e para construir os geradores do grupo de rotação, mas não nos dá qualquer compreensão do mecanismo físico que produz o spin” (OHANIAN, 1986, p. 501). A explicação final e irreduzível para o spin somente pode ser dada em termos da teoria de grupos, aplicada ao subgrupo das rotações espaciais (GIULINI, 2008).

A falta de uma interpretação física palpável para o spin não deixou de ser, por algum tempo, um incômodo inerente à mecânica quântica. A lacuna, contudo, já fora superada:

A falta de uma imagem concreta do spin deixa uma lacuna grave em nossa compreensão da mecânica quântica. A aquiescência prevalecente a esta situação insatisfatória torna-se ainda mais intrigante quando se percebe que os meios para preencher essa lacuna estão disponíveis desde 1939, quando Belinfante estabeleceu que o spin poderia ser considerado devido a um fluxo circulante de energia, ou densidade de momento, no campo de onda do elétron. Ele estabeleceu que esse quadro do spin é válido não apenas para elétrons, mas também para fótons, mésons vetores e grávitons – em todos os casos, o momento angular de spin é devido a um fluxo de energia circulante nos campos (OHANIAN, 1986, p. 501).

Desse modo, apesar da estabelecida proposição de que o spin do elétron não possuiria um análogo clássico, trata-se de um momento angular nos mesmos moldes que aquele transportado pelos campos de uma onda eletromagnética com polarização circular, além do que, nem o spin nem o momento magnético a ele associado são propriedades intrínsecas do

elétron; tais grandezas são propriedades do campo do elétron (cf. OHANIAN, 1986).

De acordo com Ohanian (1986), a possibilidade de conceber uma imagem clara para a origem física do spin e do momento magnético a ele associado não foi devidamente explorado pelos propositores originais desses desenvolvimentos, dentre os quais Gordon (em 1928) e Belinfante (em 1939). Estes desenvolvimentos costumam ser reproduzidos em textos sobre teoria quântica de campos¹⁸, mas de um modo geral não é apresentada nenhuma interpretação física acerca dos mesmos.

[...] ao contrário do preconceito comum, o spin do elétron tem um análogo clássico próximo: é um momento angular exatamente do mesmo tipo que o transportado pelas ondas de campo eletromagnético circularmente polarizadas. [...] o momento magnético do elétron é devido ao fluxo circulante de carga [no campo] do elétron. Isso significa que nem o spin nem o momento magnético são propriedades internas do elétron - eles não têm nada a ver com a estrutura interna do elétron, mas apenas com a estrutura de sua onda de campo (OHANIAN, 1986, p. 501).

O spin é, portanto, uma propriedade ondulatória e o fato de se considerar uma onda em âmbito clássico ou quântico é um fator secundário, havendo, contudo, uma diferença fundamental entre os sistemas clássicos e quânticos: no primeiro caso o spin corresponde a uma grandeza macroscópica contínua, enquanto no segundo o spin corresponde a uma quantidade quantizada representada por um operador (OHANIAN, 1986).

O consenso acerca do spin do elétron que acabou por consolidar-se “é que o elétron de alguma forma age como um objeto girando sem realmente girar” (SEBENS, 2019, p. 49). O argumento comumente utilizado de que o spin é uma quantidade fixa e quantizada – e portanto não pode ser tomado no limite clássico – conduz a ideia de que o spin seja um conceito verdadeiramente quântico, sem análogo clássico. Apesar de não ser possível proceder o limite de grandes valores de spin para uma partícula única, pode-se promover o limite clássico a partir de sistemas com muitas partículas. O efeito Einstein-Hass e o ferromagnetismo são exemplos de manifestações no limite clássico, decorrentes do momento magnético associado ao spin (OHANIAN, 1986).

Importa destacar dois aspectos da compreensão mais atual sobre o conceito de spin, que terão importantes implicações na discussão sobre as potencialidades da noção de MEIC no ensino de mecânica quântica, a serem abordadas posteriormente: sua derivação não é estritamente relacionada a um tratamento relativístico e neste caso deve-se recorrer a teoria de

¹⁸ Para uma descrição detalhada, ver Ohanian (1986).

grupos; é possível formar uma imagem mecânica, isto é, há um análogo mecânico possível a partir da teoria de campos.

3.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguir, apresentamos no Quadro 3, o quantitativo dos seguimentos analíticos que destacamos e comentamos na subseção anterior, extraídos de documentos históricos e historiográficos. Na primeira coluna indicamos o nome das categorias; na segunda coluna, indicamos a relação de segmentos analíticos em cada uma das categorias, identificados pela numeração adotada; na terceira coluna apresentamos a quantidade de segmentos analíticos destacados e cada uma das categorias.

Conforme indicamos no quadro, foi possível destacar nos documentos pesquisados 4 indicações descritivas sobre o processo bissociativo relacionado com o conceito de spin do elétron. Trata-se da categoria da *Bissociação qualitativa*, em relação à qual consideramos os segmentos analíticos que exprimem em linguagem não matemática o processo bissociativo. São trechos dos documentos que apresentam uma descrição, completa ou parcial, de como a autorrotação do elétron produz o seu momento magnético próprio, e/ou como se dá o acoplamento entre o momento magnético e o movimento orbital.

Com relação à categoria da *Bissociação quantitativa*, destacamos 3 segmentos analíticos que exprimem, em linguagem matemática, os resultados lógico formais derivados da interpretação do movimento de autorrotação do elétron. Levando em conta o relato histórico que apresentamos e considerando as definições de Koestler (2014), as três equações apontadas foram obtidas associando elementos das matrizes de pensamento das teorias eletromagnética e da relatividade restrita, mas a partir de diferentes estratégias, cada qual em concordância com o código vigente em cada matriz de pensamento, resultando em uma novidade conceitual, própria de cada estratégia.

Quadro 3 - Quantitativo dos segmentos analíticos, destacados e comentados na seção anterior.

Categoria analítica	Segmentos Analíticos	Quantidade
Bissociação qualitativa	13, 32, 33, 43	4
Bissociação quantitativa	(3.6), (3.8), (3.9)	3
Experiência disponível	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 20, 26, 28, 34, 35, 37, 50, 52,	17

	53, 56	
Critério de aceitação	33, 38, 44, 45, 46, 57, 60, 61, 62, 63	10
Critério de rejeição	12, 15, 21, 23, 24, 26, 29, 36, 39, 47, 49, 54, 55	13
Contextualização	7, 9, 14, 30, 46	5
Manifestação de aceitação	41, 46, 51, 59, 62	5
Manifestação de Rejeição	10, 11, 16, 23, 25, 27, 37, 39, 42, 49	10
Reconfiguração	17, 18, 19, 22, 31, 40, 58, 64	8
Literalização	65	1

Fonte: elaborado pelo autor.

O emprego de diferentes estratégias, todas em conformidade com o quadro lógico formal vigente em cada matriz de pensamento, ilustra a flexibilidade de estratégias e a rigidez dos códigos, dois aspectos apontados por Koestler (2014).

Julgamos que a proposição destas duas categorias para dar conta do processo bissociativo é um aspecto inerente do campo científico pesquisado – a Física. Entendemos que as relações de coerência entre as ideias científicas, o formalismo matemático e a interpretação da base empírica no referido campo científico, implicam necessariamente em uma relação complementar entre a linguagem natural e a linguagem matemática e portanto, a manifestação destas duas formas de expressão de ideias, uma característica esperada para uma metáfora epistêmica em nível intracientífico no campo da Física.

Em relação à categoria da *Experiência disponível*, destacamos 17 segmentos analíticos que exprimem aspectos qualitativos e quantitativos relacionados à fenomenologia do enigma dos multipletos. É a categoria predominante na base de documentos considerada em nossa pesquisa. Conforme indicado por Palma (2015), as metáforas epistêmicas surgem como resposta da comunidade científica à um conjunto de problemas, considerados pertinentes por esta comunidade científica, mas sobretudo, colocados sob o estatuto de fato científico relevante e empiricamente estabelecido, ou seja, uma base de conhecimentos empíricos que carece de uma interpretação conceitual lógica e consistente, segundo as regras vigentes na referida comunidade científica. Fica assim evidenciado, o importante papel da base empírica para a proposição de metáforas epistêmicas, tal como apontado por Palma (2015).

A experiência disponível, ou seja, o estado do conhecimento no interior de um dado campo científico, além de impulsionar a proposição de metáforas epistêmicas, fornece também parte dos critérios decisórios empregados para justificar a aceitação ou rejeição de metáforas epistêmicas.

Como indicado no Quadro 3, destacamos no material de pesquisa 10 segmentos

analíticos que evidenciam o emprego de *critérios de aceitação* relacionados com a bissociação do elétron girante, e 13 segmentos analíticos que evidenciam o uso de *critérios de rejeição*. São trechos encontrados no material de pesquisa, os quais evidenciam, conforme apontado por Palma (2015), a fundamentação conceitual e/ou empírica, por trás das decisões de aceitação e rejeição, tomadas pela comunidade científica mediante a proposição de metáforas epistêmicas.

É importante salientar que os critérios de aceitação/rejeição não são exclusivamente pautados pelo estado do conhecimento, mas também por aspectos intersubjetivos. São valores epistêmicos e de visão de mundo, particularmente relevantes, mas não necessariamente compartilhados por toda a comunidade científica. Como demonstrado, o quadro da experiência disponível, além de estimular a proposição de metáforas epistêmicas, fornece também subsídios para a seleção das mesmas. São decisões tomadas pela comunidade científica, com base na racionalidade e objetividade, “porque atendem a diretrizes e critérios que aquela comunidade científica vem desenvolvendo intersubjetivamente ao longo do tempo” (PALMA, 2015, p. 45), não sendo portanto, nem universais, tampouco *a priori*. Neste sentido, o estado do conhecimento, além de técnica e formalmente estruturado, é também historicamente estabelecido.

Destacamos ainda que os limites difusos, inerente a todos dos tipos de metáforas, pode ser também a origem de critérios de rejeição das metáforas epistêmicas. Considerando o episódio que analisamos, a bissociação do elétron auto rotativo possibilitou interpretar corretamente o efeito Zeeman anômalo. Contudo, suscitou também a possibilidade de atribuir uma geometria ao elétron, o que resultou em incompatibilidades com a teoria clássica do elétron e com a própria teoria da relatividade – por exemplo, por atribuir velocidades superiores à velocidade da luz para a periferia do elétron, este tomado como um corpo extenso. Assim, evidenciamos outro aspecto das metáforas em geral, e portanto, também das metáforas epistêmicas: “o poder explicativo e inovador da metáfora também pode ser sua fraqueza” (PALMA, 2015, p. 27).

Considerando os segmentos analíticos quantificados nas categorias de aceitação e rejeição, observamos a presença de três tipos de critérios: 1) *critérios inerentes* à comunidade científica e portanto, compartilhados por todos os membros; são critérios lógicos, formais ou empiricamente estabelecidos; 2) *critérios intersubjetivos* – ontológicos, epistêmicos e de visões de mundo – não necessariamente compartilhados por toda a comunidade científica, mas sim, restritos a poucos membros; 3) *critérios difusos*, relacionados aos limites de alcance das metáforas epistêmicas, os quais podem suscitar, além da novidade conceitual, efeitos

secundários que impliquem em inconsistências lógicas, formais, empíricas, ontológicas ou de visões de mundo.

As manifestações de aceitação e rejeição refletem a mobilização dos membros de uma comunidade científica frente a proposição de metáforas epistêmicas. De acordo com Palma (2015), toda metáfora epistêmica produz tensões advindas de sua adequação/inadequação, e desse modo, quando proferidas nos interior de um dado campo científico, os membros pertencentes a esta comunidade irão materializar estas tensões, ditadas pelos critérios de aceitação e rejeição, a partir de seus posicionamentos, seja oficialmente ou extraoficialmente, publicamente ou não. Em nossa investigação evidenciamos 5 segmentos analíticos que exprimem o posicionamento de cientistas em favor da bissociação relacionada ao elétron auto rotativo. Evidenciamos, também, 10 segmentos analíticos que exprimem posicionamentos contrários à bissociação do elétron auto rotativo.

Conforme defendido por Palma (2015), os aspectos sociais, políticos, culturais, etc., são também relevantes na proposição de metáforas epistêmicas. Assim, uma vez que entram em jogo aspectos epistêmicos e de visão de mundo, subjetivos, restritivos, não inteiramente compartilhados, há também aspectos sociais, políticos, culturais, etc., localizados no tempo e no espaço, que conferem legitimidade a um conjunto limitado de metáforas epistêmicas, ou seja, potencialmente compatíveis com os ideais de sociedade e de mundo. Neste sentido, procuramos captar este aspecto das metáforas epistêmicas a partir da *contextualização* sócio cultural, referente ao período histórico considerado na investigação. Destacamos 5 segmentos analíticos no material de pesquisa que evidenciam a relevância de aspectos sociais, políticos, econômicos, culturais, etc., para a proposição de metáforas epistêmicas.

Outro aspecto que procuramos evidenciar em nossa investigação diz respeito a um dos efeitos secundários causados pelas metáforas epistêmicas. Embora sua função principal seja o estabelecimento de novidades conceituais, tal como sustentado por Palma (2015), as metáforas epistêmicas também podem enriquecer e reconfigurar a base empírica. Independentemente de serem exitosas ou não, toda bissociação é potencialmente um novo modo de ver e interpretar o quadro da experiência disponível. Com o intuito de ressaltar este aspecto do fenômeno metafórico defendido por Palma, destacamos 8 segmentos analíticos a partir dos materiais investigados, evidenciando, portanto, o efeito da *reconfiguração* da experiência disponível.

A literalização da metáfora epistêmica, tal como defendido por Turbayne (1974), é um processo que se inicia tão logo a inconveniência lógica inicial, carregada pela expressão metafórica, passa a ser percebida como aceitável. Trata-se de um processo relativamente

longo e que encerra-se quando o aspecto metafórico não mais é percebido (PALMA, 2015). O conhecimento novo, então, já encontra-se estabilizado no interior da comunidade científica; as tensões de adequação/inadequação já estão dissolvidas; a solução do problema já é mais proeminente do que as inconsistências residuais. A novidade conceitual já está pronta para ser reconhecida e disseminada no interior do campo científico, sobretudo na formação dos novos cientistas, passando então a figurar nos manuais. A partir do material investigado destacamos 2 segmentos analíticos que evidenciam a *literalização* do conceito de spin do elétron.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Iremos agora ponderar alguns aspectos relacionados aos resultados apresentados na seção anterior. Lembramos que as categorias analíticas sugeridas incorporam e refletem as características conceituais da metáfora epistêmica, tal como proposta por Palma (2015). Desse modo, a identificação de segmentos analíticos em todas as categorias analíticas é um indicativo de que a metáfora epistêmica pôde ser evidenciado.

Assumimos que nossa proposição da metáfora epistêmica em nível intracientífico não altera os preceitos conceituais e estruturantes da metáfora epistêmica mais geral que Palma (2015) define. No entanto, nossa investigação evidenciou que, ao menos para o campo da Física, processos de bissociação podem manifestar-se de duas formas, que denominamos por quantitativo e qualitativo, conforme o emprego ou não da linguagem matemática. Assim, defendemos que este aspecto é típico de qualquer nível intracientífico no qual a linguagem matemática desempenhe um papel formal e estruturante na obtenção de coerência lógica entre as ideias científicas e a interpretação empírica no referido campo científico.

A análise do episódio histórico referente a formulação do conceito de spin do elétron mostrou que este conceito emerge de uma sucessão de metáforas epistêmicas, onde cada uma delas reconfigurou em maior ou menor grau o quadro da experiência disponível, tornando-se mais ou menos relevante para a formulação de novas MEIC. Isto parece indicar que em nível intracientífico, um ato inaugural, individual, sincrônico, em suma, uma única MEIC muito provavelmente não será capaz de, sozinha, estabelecer um novo aspecto conceitual e/ou fenomenológico. Do contrário, podem ser necessárias múltiplas contribuições metafóricas para estabelecer uma matriz de pensamento, as estratégias, enfim, estruturar um novo quadro conceitual e fenomenológico. Neste movimento, uma ou outra MEIC mais ampla, embora

provisória, pode ser suficientemente impactante para consolidar-se como um pano de fundo relativamente duradouro, como foi o caso da combinação inaugural promovida por Bohr, no âmbito da velha mecânica quântica, entre a mecânica clássica com as ideias inaugurais sobre a quantização da energia e da luz, mais tarde cristalizado no princípio da correspondência¹⁹.

Com relação à quantidade de segmentos analíticos indicados em cada categoria, salientamos que este quantitativo é determinante para a plausibilidade da hipótese da metáfora epistêmica, mas que a presença de ao menos um segmento analítico em cada uma das categorias é condição necessária e suficiente para validação da hipótese. Neste sentido, os diferentes quantitativos que apresentamos em cada categoria não indica, em nossa análise, nada além do fato de termos selecionado materiais históricos e/ou historiográficos suficientemente abrangentes e adequados aos nossos objetivos.

Em relação a categoria da *Literalização*, devemos considerar algumas particularidades com as quais nos deparamos ao longo da análise. Para tanto, salientamos que a literalização da metáfora epistêmica é um processo diacrônico, ou seja, ele se constitui ao longo de um intervalo temporal relativamente longo, no decorrer do qual um metáfora epistêmica vai, aos poucos, consolidando-se como exitosa. Desse modo, poderíamos considerar que os segmentos analíticos que exprimem critérios de aceitação com base na experiência disponível, bem como aqueles que exprimem reconfigurações positivas da mesma, constituem evidências de um processo de literalização em curso. Por outro lado, os segmentos analíticos que indicamos explicitamente na categoria da *Literalização* correspondem à evidências do processo de literalização já consolidado, ou seja, evidenciam o conhecimento novo, já estabilizado – a metáfora epistêmica literalizada –, quando então, além de ser empregado como fato estabelecido, passa também a figurar como conhecimento necessário à formação de novos cientistas, ou seja, passa a fazer parte dos currículos e dos manuais.

De acordo com o que foi exposto ao longo deste capítulo, consideramos que a hipótese da metáfora epistêmica é plausível, sobretudo, em nível intracientífico. Contudo, nos parece que a análise de manuais faz-se ainda necessária, uma vez que apresentam pertinência para nossa investigação, ao menos em dois aspectos: primeiro porque espera-se que neles figurem, além de outros elementos da MEIC, referências ao processo de literalização, ou seja, o

19 O modelo de Bohr institui um quadro metafórico global (bissociação e literalização em curso): agrupa as teorias clássicas as novas ideias da quantização; Sommerfeld - incorpora a relatividade ao quadro metafórico de Bohr, trazendo “o problema de Kepler” para a descrição das órbitas de Bohr; Landé - pauta-se pelo quadro de Bohr-Sommerfeld; equação empírica; tentativa de modelar o caroço para derivar a equação empírica, trazendo o eletromagnetismo clássico; Pauli - opondo-se as tentativas de modelar o caroço; propõe que a anomalia Zeeman tenha origem no elétron; Uhlenbeck e Goudsmit, Kronig, Thomaz: quadro de Bohr-Sommerfeld e a hipótese de Pauli, trazendo o eletromagnetismo clássico e a relatividade restrita.

conceito de spin do elétron já estabilizado, com os demais elementos constitutivos da MEIC praticamente apagados; em segundo lugar, pelo papel que desempenham na formação de cientistas, professores e do público não especializado, ou seja, estão diretamente relacionados com os processos de ensino e aprendizagem de ciências, onde esperamos empregar a MEIC como recurso didático e analítico. Deste modo, no capítulo seguinte iremos direcionar nossa investigação para os manuais de física.

Referências

ABRANTES, P. Problemas metodológicos em historiografia da ciência. In: SILVA FILHO, W. J. (Ed.). . **Epistemologia e ensino de ciências**. Salvador: Arcadia, UESAL, 2002. p. 51–91.

ABRANTES, P. C. C. A metodologia de J. C. Maxwell e o desenvolvimento da Teoria Eletromagnética. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 5, n. Edição Especial, p. 58–75, 1988.

BOHR, N. Spinning electrons and the structure of spectrun. **Nature**, v. 117, n. 2938, p. 264–265, 1926.

BOLTZMANN, L. On the methods of theoretical physics. In: **Theoretical physics and philosophical problems**. Vienna Circle Collection. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1974. v. 5p. 5–12.

BUCHWALD, J. Z.; WARWICK, A. (EDS.). Unsettled Problems in Quantum Spectroscopy: Sommerfeld's Phenomenology, Bohr's Second Theory, and Pauli's Exclusion Principle. In: **Histories of the electron: the birth of microphysics**. Dibner Institute studies in the history of science and technology. Cambridge, Mass: MIT Press, 2001. p. 830–859.

BUSCH, P.; SCHROECK, F. E. On the reality of spin and helicity. **Foundations of Physics**, v. 19, n. 7, p. 807–872, jul. 1989.

CARRELLI, A. The Spinning Electron in Wave Mechanics. **Nature**, v. 119, n. 2996, p. 492–493, abr. 1927.

CELLARD, A. Análise documental. In: POUPART, J. et al. (Eds.). . **A Pesquisa Qualitativa: enfoques epistemológicos e metodológicos**. 3. ed. Petrópolis: Vozes, 2012. p. 295–316.

COMMINS, E. D. Electron spin and its history. **Annual Review of Nuclear and Particle Science**, v. 62, n. 1, p. 133–157, 23 nov. 2012.

DARRIGOL, O. Quantum Theory and Atomic Structure, 1900–1927. In: NYE, M. J. (Ed.). . **The Cambridge History of Science**. 1. ed. [s.l.] Cambridge University Press, 2001. p. 329–349.

DIRAC, P. A. M. Methods in theoretical physics. In: SALAM, A. (Ed.). . **Unification of fundamental forces: the first of the 1988 Dirac memorial lectures**. Cambridge [England]; New York: Cambridge University Press, 1990. p. 125–143.

DUNCAN, A.; JANSSEN, M. **Constructing Quantum Mechanics: Volume 1: The Scaffold: 1900-1923**. 1. ed. [s.l.] Oxford University Press, 2019.

EINSTEIN, A.; BORN, M.; KOPFF, A. Besprechungen. **Die Naturwissenschaften**, v. 10, n. 8, p. 184–186, fev. 1922.

EISBERG, R. M.; RESNICK, R. **Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. 23. ed. São Paulo: Campus, 1985a.

EISBERG, R. M.; RESNICK, R. **Quantum physics of atoms, molecules, solids, nuclei, and particles**. 2nd ed ed. New York: Wiley, 1985b.

ENZ, C. P. W. Pauli's Scientific Work. In: MEHRA, J. (Ed.). **The Physicist's Conception of Nature**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1973. p. 766–799.

FLECK, L. **Gênese e desenvolvimento de um fato científico**. Belo Horizonte: Fabrefactum editora, 2010.

FORATO, T. C. DE M.; PIETROCOLA, M.; MARTINS, R. D. A. Historiografia e natureza da ciência na sala de aula. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 27–59, 5 jul. 2011.

FORMAN, P. The Doublet Riddle and Atomic Physics circa 1924. **Isis**, v. 59, n. 2, p. 156–174, jul. 1968.

FORMAN, P. Alfred Landé and the Anomalous Zeeman Effect, 1919-1921. **Historical Studies in the Physical Sciences**, v. 2, p. 153–261, 1 jan. 1970.

FOWLER, R. H. Spinning Electrons. **Nature**, v. 119, n. 2985, p. 90–92, jan. 1927.

GIULINI, D. Electron spin or “classically non-describable two-valuedness”. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 39, n. 3, p. 557–578, set. 2008.

GOMES, G. G.; PIETROCOLA, M. O experimento de Stern-Gerlach e o spin do elétron: um exemplo de quasi-história. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 2, jun. 2011.

GRIFFITHS, D. **Mecânica Quântica**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2011.

GUTH, E. Spinning Electron and Wave Mechanics. **Nature**, v. 119, n. 3003, p. 744–744, maio 1927.

HALPRIN, A. Pedagogy of spin in nonrelativistic quantum mechanics. v. 46, n. 7, p. 768, 1978.

HESLOT, A. Classical mechanics and the electron spin. **American Journal of Physics**, v. 51, n. 12, p. 1096–1102, dez. 1983.

HYPERPHYSICS. **Paschen–Back effect**. Disponível em: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/paschen.html>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

JAMMER, M. **The conceptual development of quantum mechanics**. Maryland: Tomash Publishers, 1989. v. 12

JIMÉNEZ-ALEIXANDRE, M. P.; CRUJEIRAS, B. Epistemic Practices and Scientific Practices in Science Education. In: TABER, K. S.; AKPAN, B. (Eds.). . **Science Education**. Rotterdam: SensePublishers, 2017. p. 69–80.

KAPLAN, I. G. The Pauli Exclusion Principle and the Problems of its Theoretical Substantiation1. **Russian Physics Journal**, v. 63, n. 8, p. 1305–1321, dez. 2020.

KOESTLER, A. **The act of creation**. London: Last Century Media, 2014.

KRAGH, H. Niels Bohr's Second Atomic Theory. **Historical Studies in the Physical Sciences**, v. 10, p. 123–186, 1 jan. 1979.

KRAGH, H. The genesis of dirac's relativistic theory of electrons. **Archive for History of Exact Sciences**, v. 24, n. 1, p. 31–67, 1981.

KRAGH, H. **Quantum Generations: a history of physics in the twentieth century**. Princeton: Princeton University Press, 1999.

KRIPKA, R. M. L.; SCHELLER, M.; BONOTTO, D. DE L. Pesquisa documental: considerações sobre conceitos e características na pesquisa qualitativa. **Atas CIAIQ2015**, v. 2, p. 243–247, 2015.

KRONIG, R. DE L. The spinning electrons and the structure of spectra. **Nature**, v. 117, n. 2946, p. 550, 1926.

KUHN, T. S. The history of science. In: SILLS, D. L. (Ed.). . **International Encyclopedia of the Social Sciences**. [s.l.] The Macmillan Company & The Free Press, 1968. v. 14p. 74–82.

LIVRAMENTO, S. **Implicações culturais da Teoria Quântica: caminhos metafóricos e as apropriações indébitas**. Tese—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

MALAMENT, D. B. Classical relativity theory. In: **Philosophy of Physics**. [s.l.] Elsevier, 2007. p. 229–273.

MARTIN, A. History of Spin and statistics. **arXiv:hep-ph/0209068**, 6 set. 2002.

MARTINS, L. A.-C. P. História da ciência: objetos, métodos e problemas. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 11, n. 2, p. 305–317, ago. 2005.

MARTINS, R. DE A. Abordagens, métodos e historiografia da história da ciência. In: MARIA, Â. (Ed.). . **O tempo e o cotidiano na história**. Série Ideias. São Paulo: Fundação para o Desenvolvimento da Educação, 1993. p. 73–78.

MARTINS, R. DE A. Ciência versus historiografia: os diferentes níveis discursivos nas obras sobre história da ciência. In: GOLDFARB, A. M. A.; BELTRAN, M. H. R. (Eds.). . **Escrevendo a história da ciência: tendências, propostas e discussões historiográficas**. 1. ed. São Paulo: EDUC/Livraria da Física/Fapesp, 2004. p. 115–147.

MAXWELL, J. C. **Are there real analogies in nature?**, 1856. Disponível em: <<http://sites.uci.edu/mathematics/files/2016/11/Maxwell-Analogies-in-Nature.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2018

MONTEIRO, M. A.; NARDI, R.; BASTOS FILHO, J. B. A sistemática incompreensão da teoria quântica e as dificuldades dos professores na introdução da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 15, n. 3, p. 557–580, 2009.

OHANIAN, H. C. What is spin. **American Journal of Physics**, v. 54, n. 6, p. 500–505, 1986.

OLIVEIRA, F. F. DE; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. S. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 3, p. 447–454, 2007.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão da bibliografia sobre a área de pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Medio”. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 5, n. 1, p. 23–48, 2000.

PAIS, A. The early history of the theory of the electron: 1897-1947. In: SALAM, A.; WIGNER, E. P. (Eds.). . **Aspects of quantum theory**. Cambridge [Eng.]: University Press, 1972. p. 79–93.

PAIS, A. **“Sutil é o senhor...”: a ciência e a vida de Albert Einstein**. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 1982.

PALMA, H. El desarrollo de las ciencias a través de las metáforas: un programa de investigación en estudios sobre la ciencia. **Revista CTS**, v. 20, n. 6, p. 45–65, dez. 2005.

PALMA, H. **Metáfora e modelos científicos: a linguagem no ensino de ciências**. São Paulo: Edições SM, 2009.

PALMA, H. **Ciencia y metáforas: crítica de una razón incestuosa**. Buenos Aires: Prometeu Libros, 2015.

PAULI, W. Über den Einfluß der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Elektronenmasse auf den Zeemaneffekt. **Zeitschrift für Physik**, v. 31, n. 1, p. 373–385, fev. 1925.

PAULI, W. **Exclusion principle and quantum mechanics** Nobel Prize.org, , 13 dez. 1946. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1945/pauli/lecture/>>. Acesso em: 12 jun. 2020

PAULI, W. **Writings on physics and philosophy**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1994.

POPPER, K. **A teoria dos quanta e o cisma da Física**. Chicago: The University Chicago Press, 1997.

RASETTI, F.; FERMI, E. Sopra L elettrone rotante. **Il Nuovo Cimento**, v. 3, n. 1–2, p. 226–235, jan. 1926.

RÜDINGER, E.; STOLZENBURG, K. Introduction. In: **Niels Bohr Collected Works**. [s.l.] Elsevier, 1984. v. 5p. 219–240.

SANTANA, F. B.; DOS SANTOS, P. J. S. Espectroscopia e modelos atômicos: uma proposta para a discussão de conceitos de Física Moderna no Ensino Médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 2, p. 555, 9 ago. 2017.

SASSERON, L. H.; DUSCHL, R. A. Ensino de ciências e as práticas epistêmicas: o papel do professor e o engajamento dos estudantes. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 21, n. 2, p. 52, 8 ago. 2016.

SEBENS, C. T. How electrons spin. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 68, p. 40–50, nov. 2019.

SETH, S. Quantum Physics. In: BUCHWALD, J. Z.; WARWICK, A. (Eds.). **The History of Physics**. The Oxford Handbook. Oxford: Oxford University Press, 2013. p. 814–859.

THOMAS, L. H. The motion of the spinning electron. **Nature**, v. 117, n. 2945, p. 514, 1926.

THOMAS, L. H. The kinematics of an electron with an axis. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 3, n. 13, p. 1–22, jan. 1927.

TOMONAGA, S. **The story of spin**. Chicago: The University of Chicago Press, 1997.

TURBAYNE, C. M. **El mito de la metáfora**. [s.l.] Fondo del Cultura Económica, 1974.

UHLENBECK, G. E.; GOUDSMIT, S. Spinning electrons and the structure of spectrum. **Nature**, v. 117, n. 2938, p. 264–265, 1926.

UHLENBECK, G. E.; GOUDSMIT, S. A. Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons. **Die Naturwissenschaften**, v. 13, n. 47, p. 953–954, nov. 1925.

VILAS BOAS, A. et al. História da ciência e natureza da ciência: debates e consensos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 30, n. 2, p. 287–322, 27 jun. 2013.

VON MEYENN, K.; SCHUCKING, E. Wolfgang Pauli. **Physics Today**, v. 54, n. 2, p. 43–48, fev. 2001.

WEINERT, F. Wrong theory - right experiment: the significance of the Stern-Gerlach experiments. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 26, n. 1, p. 75–86, abr. 1995.

4 ELEMENTOS DA METÁFORA EPISTÊMICA NA CONSTRUÇÃO DO CONCEITO DE SPIN DO ELÉTRON EM MANUAIS DE FÍSICA

Resumo

Apresentamos uma análise referente ao conceito de spin do elétron em manuais de Física. Nosso objetivo é aplicar as mesmas categorias analíticas formuladas para verificação de plausibilidade da noção-hipótese da metáfora epistêmica de Palma, anteriormente empregada em textos historiográficos e históricos. A importância dos manuais para nossa investigação decorre do fato de que este tipo de texto destina-se à formação de um público especializado e desse modo, nele figuram os conhecimentos considerados estáveis por uma dada comunidade científica. São conhecimentos que passaram pelos critérios de validação científica – foram lapidados, negociados, significados, comprovados. Neste sentido, são indicativos do processo de literalização da metáfora epistêmica, sobretudo em nível intracientífico. Adquire, assim, um importante caráter complementar à verificação de plausibilidade de nossa hipótese de investigação. Para implementar a análise, a escolha dos manuais recaiu sobre a bibliografia indicada em diferentes documentos curriculares de cursos de graduação em Física Licenciatura e cursos de Pós-Graduação em Física, oferecidos por diferentes instituições brasileiras da rede federal de ensino. Uma vez que a literalização é o destino final de toda metáfora epistêmica exitosa e considerando o caráter formativo e especializado dos manuais, é natural esperar que a presença de segmentos analíticos indicativos do processo de literalização, não apenas esteja presente, mas também seja manifesto com relativa predominância, frente as demais características do processo metafórico em questão, não havendo, portanto, a necessidade de maiores critérios para a escolha dos manuais a serem analisados. Os resultados sugerem que, nos manuais considerados, a presença de trechos que evidenciam as metáforas epistêmicas literalizadas é de fato predominante em relação aos demais aspectos deste fenômeno metafórico.

Palavras-chaves: metáfora científica, metáfora epistêmica, spin do elétron, ensino de Física, livro didático.

Abstract

We present an analysis regarding the electron spin concept in Physics textbooks. Our

objective is to apply the same analytical categories formulated to verify the plausibility of the notion-hypothesis of Palma's epistemic metaphor, previously employed in historiographical and historical texts. The importance of manuals for our investigation stems from the fact that this type of text is intended for the formation of a specialized audience and, thus, it contains the knowledge considered stable by a given scientific community. These are knowledge that have passed the scientific validation criteria – they have been polished, negotiated, meanings, proven. In this sense, they are indicative of the literalization process of the epistemic metaphor, especially at the intra-scientific level. Thus, it acquires an important complementary character to verifying the plausibility of our investigation hypothesis. To implement the analysis, the choice of manuals fell on the bibliography indicated in different curriculum documents for undergraduate Physics Degree courses and Postgraduate Physics courses, offered by different Brazilian institutions in the federal education system. Since literalization is the final destination of every successful epistemic metaphor and considering the formative and specialized character of the manuals, it is natural to expect that the presence of analytic segments indicative of the literalization process will not only be present, but also manifest with relative predominance, compared to the other characteristics of the metaphorical process in question, and therefore there is no need for greater criteria for choosing the manuals to be analyzed. The results suggest that, in the considered manuals, the presence of passages that evidence the literalized epistemic metaphors is in fact predominant in relation to the other aspects of this metaphorical phenomenon.

Key-words: scientific metaphor, epistemic metaphor, electron spin, physics teaching, textbook.

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo analisaremos alguns manuais de Física, buscando evidenciar elementos constitutivos do fenômeno da MEIC. Entendemos que dado o papel formativo dos manuais, neles devam figurar predominantemente elementos do processo de literalização da MEIC, ou seja, esperamos identificar uma relativa predominância de segmentos analíticos pertencentes à categoria da *Literalização*. Nossa análise recairá sobre manuais tradicionalmente empregados em cursos de graduação e pós-graduação, buscando assim contemplar abordagens do conceito

de spin do elétron em diferentes níveis de complexidade – que livremente denominaremos por introdutório, intermediário e avançado.

É importante destacar que nossa análise não recai sobre a adequação ou não de manuais; não desejamos emitir opinião ou julgamento destes recursos didáticos, mesmo porquê, a adequação e êxito decorrente do uso de manuais estão diretamente relacionados com os objetivos pretendidos nas situações de ensino em que são empregados.

Apresentaremos, a seguir, alguns argumentos que justificam a análise dos manuais de modo complementar a análise historiográfica que realizamos no capítulo anterior. A importância dos manuais para nossa investigação decorre do fato de que este tipo de texto destina-se à formação de um público especializado e desse modo, nele figuram os conhecimentos considerados estáveis por uma dada comunidade científica. São conhecimentos que passaram pelos critérios de validação científica – foram lapidados, negociados, significados, comprovados. Neste sentido, são indicativos do processo de literalização da metáfora epistêmica, sobretudo em nível intracientífico. Adquire, assim, um importante caráter complementar à verificação de plausibilidade de nossa hipótese de investigação.

A importância e finalidade do processo formativo de sujeitos especializados em algum campo científico é apontado por diferentes autores. De acordo com Kuhn (1970), uma das características marcantes das comunidades científicas reside na formação profissional inicial de seus praticantes, que visa assegurar uma orientação direcionada para objetos e problemas científicos bem específicos. Tal processo formativo implica em uma formação relativamente padronizada a partir de uma literatura técnica específica, onde os membros mais experientes da comunidade assumem a responsabilidade de formarem os seus sucessores. Assim, o processo formativo busca estabelecer e disseminar certos compromissos coletivos de um grupo – valores, técnicas, práticas, conhecimentos, etc. – aos cientistas em formação e que almejam aderir a tal grupo. Kuhn (1970) se refere a estes compromissos coletivos como matriz disciplinar²⁰, formada por um conjunto de elementos, dentre os quais as generalizações simbólicas, as partes metafísicas, os valores e os exemplares. Para nossos propósitos interessa destacar que o processo formativo é delineado pela instrução dirigida e demarcada dos manuais, contribuindo para a formação de uma habilidade perceptiva – uma Gestalt. – compartilhada por um grupo de especialistas (KUHN, 1970), ou seja, é nos manuais que encontram-se os conhecimentos considerados estabelecidos, indispensáveis para a prática da

20 Este termo é empregado por Kuhn (1970) no posfácio de sua obra, onde busca esclarecer o conceito de paradigma, cuja ideia originalmente publicada provocou inúmeras críticas.

ciência normal.

Para Fleck (2010), a formação de especialistas ocorre mediante uma coerção de pensamento, um modo ver e de pensar, um certo estilo de pensamento praticado pelos sujeitos especializados. De acordo com este autor, o conhecimento científico transita, entre os sujeitos especializados, pela ciência dos periódicos e pela ciência dos manuais – o autor considera ainda que a iniciação em ciências ocorre por meio dos livros de ciências.

A ciência dos periódicos é marcada pela pluralidade de métodos, pelas descrições minuciosas e detalhadas, pelo discurso personificado, cauteloso, provisório, cercado pelas comprovações, ao passo que a ciência dos manuais apresenta-se numa forma sincrética, resumida, crítica, ordenada e acabada, que não pode ser obtida pela simples coleção ou ordenamento das publicações científicas nos periódicos, mas sim por uma compilação das mesmas, constituindo um sistema de ideias fechado, estável, duradouro, sem contradições ou incertezas: “Se entendemos por fato apenas algo firme e comprovado, ele existe somente na ciência dos manuais” (FLECK, 2010, p. 179). Em resumo, os manuais contêm o conjunto de conhecimentos cristalizados e métodos comprovados, considerados norteadores e indispensáveis ao especialista em formação.

De acordo com Irzik e Nola (2014), a ciência possui seu próprio sistema de controle, certificação e disseminação de conhecimentos:

Quando um cientista ou uma equipe de cientistas conclui sua pesquisa, eles mal terminam seu trabalho. Suas descobertas precisam ser publicadas; isso requer um processo de revisão por pares. Quando publicados, eles se tornam públicos e agora estão abertos ao escrutínio crítico de toda a comunidade de especialistas relevantes. Somente quando eles provam seu valor durante toda essa provação, suas descobertas são aceitas no corpo de conhecimento científico e podem, entre outras coisas, ser ensinadas nas escolas (IRZIK; NOLA, 2014, p. 1008).

Consideramos, portanto, que os manuais devem atender ao propósito de instruir, conferindo forma e limites ao processo formativo, contemplando os conhecimentos e as práticas considerados relevantes para atuação em uma dada comunidade científica. Um conjunto de conhecimentos relevantes, que possa figurar nos manuais, repousa indubitavelmente sob a égide dos critérios de validação da comunidade científica, ou seja, é fruto do consenso, implicando, portanto, em relações de coerência relativamente sólidas entre os âmbitos teórico e empírico.

De acordo com Kuhn (2009), a tradição formativa por meio de manuais, tal como

considerado nos parágrafos anteriores, é uma característica marcante das ciências naturais, tais como a Química, a Física, a Biologia, a Astronomia e a Geologia. Nestas ciências, “os problemas característicos são quase sempre repetições, com ligeiras modificações, já antes estudados e parcialmente resolvidos” (KUHN, 2009, p. 249), procurando muito mais elucidar e firmar a tradução vigente, do que alterá-la. Ainda de acordo com este autor, é esta especialização e aprofundamento de um paradigma que permite reconhecer e isolar nele, suas debilidades mais agudas, das quais decorrem as crises e por conseguinte, as revoluções científicas.

No âmbito dos manuais, o uso de conceitos e termos científicos requer significação objetiva, mesmo naquelas situações em que a linguagem metafórica é empregada para estabelecer novos termos ou conceitos (KUHN, 1993; PULACZEWSKA, 2010). Neste contexto, conforme já indicamos, o conceito de spin do elétron é um caso singular. Tomonaga (1997) emprega explicitamente o termo autorrotação do elétron, buscando evitar a associação do termo spin ao movimento de rotação, enfatizando que o referido conceito de fato derivou da proposição da ideia de rotação do elétron em torno de si mesmo, tal como relatamos no capítulo anterior, mas que após a formulação da teoria do elétron por Dirac, ficou estabelecido que o spin não estava relacionado a qualquer movimento de rotação. Do mesmo modo, Bachelard (1978) chama atenção para a peculiaridade de que o termo spin não é traduzido nos manuais franceses, tendo sua grafia mantida, visto que trata-se de um conceito cuja significação já está plenamente estabelecida e incorporada ao termo. Julgamos, portanto, que em relação ao conceito de spin do elétron, predominem nos manuais de física aspectos da MEIC já literalizada.

A este respeito deve-se ressaltar que em geral os livros didáticos excluem a possibilidade de uma descrição clássica do spin do elétron em decorrência das inadequações do modelo da esfera giratória, enfatizando que a descrição do spin estaria relacionada com a teoria da relatividade, devido aos trabalhos de Dirac. Contudo, “o spin não tem nada a ver especificamente com a relatividade ou a mecânica quântica, mas surge das representações do grupo de rotação, que já desempenham um papel na mecânica clássica não relativística” (HESLOT, 1983, p. 1097).

Uma vez que a produção dos historiadores implica no uso de métodos (KRIPKA; SCHELLER; BONOTTO, 2015), e assim não é isenta às concepções do historiador sobre ciência, cultura, sociedade, política, etc. (MARTINS, 2005, 2004), no capítulo anterior, quando consideramos os materiais historiográficos, contemplamos a produção de diferentes autores, buscando, deste modo, assegurar que todos os aspectos conceituais da MEIC

pudessem ser evidenciados. Diferentemente para os manuais, onde os conceitos que neles figuram devem atender aos critérios de estabilidade anteriormente mencionados, o cuidado com a pluralidade de autores não é necessária.

Por outro lado, buscamos contemplar manuais em diferentes níveis de profundidade. Assim, consideramos como introdutórios aqueles manuais destinados às etapas iniciais dos cursos de graduação em Física Licenciatura e/ou Física Bacharelado, ao passo que aqueles destinados as etapas finais, consideramos como intermediários. Os manuais comumente utilizados em nível de pós-graduação, consideramos como manuais de nível avançado.

Reafirmamos que não estamos interessados em qualificar os manuais, tampouco as ementas e/ou programas de quaisquer disciplinas nos cursos de Física voltados para a formação de licenciados, bacharéis ou pós-graduados. Almejamos, tão somente, identificar quais elementos do processo de MEIC estão presentes nos manuais, onde previamente esperamos encontrar certa predominância de segmentos analíticos referentes à categoria da *Literalização*, relacionados ao conceito de spin do elétron.

4.2 ASPECTOS METODOLÓGICOS DA ANÁLISE

O processo que constitui a metáfora científica defendido por Palma (2005, 2009, 2015) apresenta uma série de características, dentre as quais destacam-se a bissociação e a literalização. Tais características constituem aspectos do fenômeno metafórico estruturado por Palma, respectivamente a partir de Koestler (2016) e Turbayne (1974). A bissociação é o ato inaugural da ME, onde dois campos de conhecimento até então nunca relacionados são postos em relação para a construção de uma nova ideia. O ineditismo dessa ideia gera tensões no interior da comunidade científica onde a ME é proposta, promovendo ações de aceitação e rejeição, respaldadas por uma base empírica, ou seja, por um quadro teórico e experimental, mas também por fatores individuais – epistêmicos, culturais, sociais, ideológicos, etc. – vigentes em um dado período histórico. Os processos de bissociação oferecem uma nova perspectiva sobre ta base empírica e, uma vez exitosa, a bissociação tende a ser incorporada como parte do quadro teórico conceitual, passando a ser vista não mais como um novidade, mas sim como um conhecimento estabilizado – neste sentido, literalizado.

Conforme sugerimos no capítulo anterior, uma possível maneira de categorizar os processos de ME em um meio intracientífico é a partir de um conjunto de categorias analíticas

que reflitam os aspectos conceituais do fenômeno. Iremos empregar o mesmo conjunto de categorias analíticas, já utilizadas na análise de materiais historiográficos, para realizar a análise dos manuais, sendo estas: (1) Bissociação qualitativa; (2) Bissociação quantitativa; (3) Bissociação imagética; (4) Experiência disponível; Critérios de (5) aceitação ou (6) rejeição; (7) Contextualização; Manifestações de (8) aceitação ou (9) rejeição; (10) Reconfiguração; (11) Literalização.

Nas categorias (1), (2) e (3) iremos classificar os segmentos analíticos (SA) encontrados nos manuais que indiquem processos bissociativos, em caráter qualitativo, quantitativo e imagético, respectivamente. A bissociação qualitativa consiste em uma descrição do processo bissociativo por meio de trechos expressos com palavras (frases, sentenças, orações, etc.), ao passo que a bissociação quantitativa consiste no desenvolvimento matemático da ideia contida em uma bissociação qualitativa. No decorrer da análise dos manuais identificamos uma terceira categoria de bissociação, que denominamos por bissociação imagética. Esta bissociação consiste na expressão de uma ideia bissociativa por meio de imagens, a qual julgamos ser uma característica dos manuais, uma vez que na análise dos documentos originais e historiográficos, tal situação não foi constatada. Na categoria (4) iremos classificar os SA relacionados com o contexto teórico, formal, metodológico e empírico, vigente em um dado campo científico. Aqui salientamos que a experiência disponível não considera necessariamente o contexto teórico empírico do período histórico a qual pertence a MEIC em análise. No âmbito dos manuais deve-se levar em conta aquilo que os autores consideram como conhecimento prévio necessário, conforme a etapa da formação a qual o manual se destina, bem como aspectos teóricos e/ou empíricos, cuja pertinência é mais didática do que histórica.

Nas categorias (5) e (6) iremos classificar os SA que exprimirem critérios ou valores empregados para aceitação ou rejeição de processos bissociativos. Na categoria (7) iremos classificar os SA que façam referência ao contexto sócio histórico pertinente ao fato científico em questão. Nas categorias (8) e (9) iremos classificar as manifestações de aceitação ou rejeição de processos bissociativos. Na categoria (10) iremos classificar os SA que venham a descrever a reconfiguração da base empírica, decorrentes de processos bissociativos. Por fim, na categoria (11) iremos classificar SA onde uma ME se apresentará em seu estágio final, ou seja, como um novo conceito já estabilizado, consensualmente aceito por uma dada comunidade científica.

4.3 ASPECTOS METODOLÓGICOS DA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Conforme expusemos anteriormente, consideramos que a análise dos manuais venha evidenciar predominantemente a presença de SA referentes à categoria analítica da *Literalização*. Julgamos que este aspecto não dependa da pluralidade de autores ou obras didáticas, visto que trata-se de uma característica fundamental da ME, não necessitando, portanto, de uma seleção minuciosa.

Iremos considerar apenas as referências bibliográficas dos cursos de Física Licenciatura e de Programas de Pós-Graduação em Física, oferecidos por Universidades públicas. Enfatizamos que estas escolhas não implicam em nenhuma restrição à análise que buscamos realizar.

Para a escolha dos manuais, analisamos alguns documentos curriculares – planos de ensino, ementas de disciplinas, projetos pedagógicos, etc. – dos cursos de Graduação em Física Licenciatura e Pós-Graduação em Física das seguintes instituições: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Universidade de São Paulo (USP), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ).

Nos cursos de Graduação em Física Licenciatura, constatamos que o conceito de spin do elétron é tipicamente abordado nas disciplinas de Estrutura da Matéria. Nos cursos de Pós-Graduação em Física, o conceito de spin do elétron é abordado tipicamente nas disciplinas de Mecânica Quântica.

De acordo com a grade curricular dos cursos de graduação considerados, constatamos que a disciplina de Estrutura da Matéria é ofertada após a primeira metade do curso. Desse modo, iremos considerar que a bibliografia envolvida corresponda a um nível intermediário de complexidade e entendimento, quando comparada à bibliografia dos cursos de Pós-Graduação, os quais iremos considerar como sendo de nível avançado de complexidade e entendimento. Assim, atribuiremos o nível introdutório àquela bibliografia destinada às disciplinas de Física Básica, tipicamente distribuídas ao longo da etapa inicial dos cursos de graduação.

Para o nível introdutório, optamos pelo Volume 4 da coleção *Fundamentos da Física*, dos autores D. Halliday e R. Resnick. Salientamos que, embora esta coleção figure entre as

referências bibliográficas das disciplinas de Física Básica nos cursos de graduação, o tópico do spin do elétron não figura na ementa destas disciplinas. Apesar disto, julgamos pertinente para nossos objetivos, a análise do referido livro didático. Considerando os cursos de graduação, dentre as obras didáticas de nível *intermediário* que figuram como bibliografia utilizada e/ou recomendada para a disciplina considerada, optamos pela obra *Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas*, dos autores R. Eisberg e R. Resnick. Com relação a nível *avançado*, dentre os manuais indicadas como bibliografia utilizada e/ou recomendada para nos cursos de Pós-Graduação, optamos pelo manual *Quantum Mechanics Volume II: Angular Momentum, Spin and Approximation Methods*, dos autores C. Cohen-Tannoudji, B. Diu e F. Laloë.

No decorrer da análise empregaremos o mesmo sistema de numeração dos segmentos analíticos empregado no capítulo anterior. Apresentaremos os trechos que julgarmos pertinentes no formato de citações numeradas, as quais serão precedidas e/ou seguidas de nossos comentários. Equações serão indicadas com dois dígitos, sendo que o primeiro identifica o capítulo, enquanto o segundo corresponde a uma sequência numérica ascendente. Eventualmente, apresentaremos ilustrações presentes no manual. Por questões de norma, as sequências numéricas, tanto dos segmentos analíticos, quanto das equações, seguirão a ordem das sequências já iniciadas no capítulo anterior. Apresentamos à seguir a análise dos manuais.

4.4 ANÁLISE DE MANUAIS: NÍVEL INTRODUTÓRIO

Nesta seção iremos analisar o livro didático *Fundamentos da Física, Volume 4*²¹, dos autores R. Eisberg e R. Resnick. Qualificamos este manual como sendo de nível introdutório, uma vez que figura como bibliografia sugerida para disciplinas de Física Básica da etapa inicial de cursos de Graduação em Física Licenciatura. Este manual apresenta os conteúdos com menor nível de profundidade e complexidade, relativamente aos outros manuais considerados nas seções posteriores.

4.4.1 Descrição do manual

21 HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos da Física: óptica e física moderna**. 8. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2009. v. 4.

No manual considerado, o spin do elétron é tratado no Volume 4, Capítulo 40. No Quadro 4 apresentamos a estrutura dos tópicos tratados no referido capítulo:

Quadro 4 - Estrutura de tópicos referente ao Capítulo 40 do livro didático de Halliday e Resnick (2009).

Seção	Tópico
40-1	O que é Física?
40-2	Algumas propriedades dos átomos
40-3	O Spin do elétron
40-4	Momento angular e momento magnético
40-5	O experimento de Stern-Gerlach
40-6	Ressonância magnética
40-7	O Princípio de Exclusão de Pauli
40-8	Armadilhas retangulares com mais de um elétron
40-9	Construção da tabela periódica
40-10	Os espectros de Raios-X dos elementos
40-11	O <i>Laser</i> e a luz do <i>Laser</i>
40-12	Como funcionam os <i>Lasers</i>

Fonte: elaborado pelo autor, a partir de Halliday e Resnick (2009), em 12/04/2021.

Na análise iremos considerar apenas os tópicos 40-3, 40-4, 40-5 e 40-7, pois estes apresentam elementos diretamente relacionados à elaboração do conceito de spin do elétron, levando em conta o recorte histórico que estamos abordando. Nos demais tópicos este conceito, ou não é mencionado, ou aparece como conceito aplicado no desenvolvimento de outros estudos.

4.4.2 Análise

Os autores iniciam o primeiro tópico do capítulo (Seção 40-1) destacando em um curto parágrafo as dificuldades experimentais do início do século XX relacionadas com a detecção e confirmação da existência dos átomos. No tópico seguinte (Seção 40-2) apresentam algumas propriedades periódicas dos átomos, particularmente aquelas que permitem organizá-los sistematicamente no atual formato da tabela periódica.

A seguir, descrevem brevemente o mecanismo de absorção e emissão de luz na forma

de fótons, levando em conta transições discretas entre níveis de energia do átomo. A energia do fóton é dada pela relação de Einstein, e esta é relacionada com a diferença de energia entre dois estados de energia atômico diferentes, conforme indicado na Equação (4.1) – trata-se apenas de uma breve descrição, pois estes conceitos já foram abordados em tópicos anteriores.

$$hf = E_{alta} - E_{baixa}. \quad (4.1)$$

A seguir os autores introduzem, a partir de uma relação de analogia com o movimento de cargas elétricas em uma espira circular, o momento angular e o caráter magnético dos átomos. A descrição é acompanhada da Figura 5, a qual ilustra a situação clássica mencionada na analogia.

Observemos que os autores deixam explícita a ideia de que a figura é uma ilustração clássica, e desse modo, a mesma não é inteiramente válida para representar um elétron em um átomo.

O modelo da [Figura 5] é estritamente clássico e não representa corretamente um elétron em um átomo. [...]. Mesmo assim, continua sendo verdadeiro o fato de que cada estado de um elétron em um átomo possui um momento angular \vec{L} e um momento magnético $\vec{\mu}$, orientados em sentidos opostos (dizemos que as duas grandezas vetoriais são *acopladas*) (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 247, grifo do autor). (66)

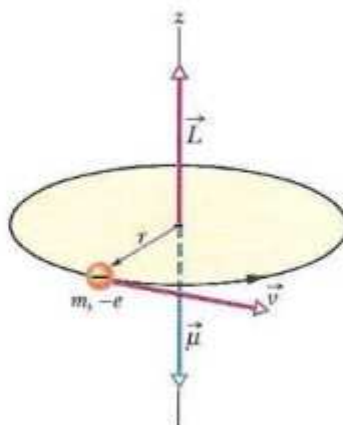
Notemos no SA (66) que os autores já estabelecem, explicitamente, que não há uma conexão direta entre as ideias da mecânica clássica e os conceitos da mecânica quântica. No entanto, os conceitos são empregados, apesar de possuírem outros significados. O referido SA – associado à Figura 5 – corresponde a uma *Bissociação qualitativa*, uma vez que relaciona conceitos da mecânica das rotações e da teoria eletromagnética, buscando assim, a elaboração de conceitos para o domínio atômico. Esta bissociação, apesar de autêntica, não está diretamente relacionada com o conceito de spin do elétron, mas irá estabelecer elementos importantes para a compreensão daquele conceito, o qual será abordado mais adiante pelos autores. Por esta razão, podemos classificá-lo na categoria da *Experiência disponível*, uma vez que os autores buscam estabelecer certo contexto conceitual para introduzir o conceito de spin e este contexto está de acordo com a historicidade do conceito de spin do elétron.

Para justificar a afirmação de que o momento angular e o momento de dipolo magnético são acoplados, os autores abordam qualitativamente o experimento de Einstein-de Haas.

Em 1915, antes do advento da física quântica, Albert Einstein e o físico holandês W. J de Haas executaram um experimento engenhoso com o objetivo de verificar se o momento angular e o momento magnético de um átomo estão acoplados (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 247). (67)

Do ponto de vista histórico, o experimento mencionado não está diretamente relacionado com o estabelecimento do conceito de spin do elétron. Por outro lado, a descrição qualitativa deste experimento contribui para sedimentar o percurso didático pretendido pelos autores, e por este motivo, o SA (67) pode ser classificado na categoria da *Experiência disponível*, uma vez que apesar de não estar diretamente relacionado com a formulação do conceito de spin, corresponde a um fato cientificamente estabelecido dentro da comunidade científica envolvida com a elaboração do referido conceito.

Figura 5 - Modelo clássico de uma partícula elétrica puntual em movimento circular, com momento angular \vec{L} e momento de dipolo magnético $\vec{\mu}$.



Fonte: elaborado pelo autor, a partir de Halliday e Resnick (2009, p. 247). Em 12/04/2021.

Na sequência, o manual apresenta uma descrição qualitativa do experimento de Einstein-de Haas, bem como dos resultados obtidos, indicando que o resultado dos experimentos estabeleceu, de fato, o acoplamento entre o momento angular dos átomos e seu momento de dipolo magnético. É importante ressaltar que, à época, o experimento estava relacionado com as discussões sobre o ferromagnetismo e as tentativas de sua descrição a partir da teoria de Lorentz para o elétron (JAMMER, 1989, p. 160, nota 173). Os resultados do experimento de Einstein-de Haas estabeleceram um valor para o fator giromagnético (razão entre o momento de dipolo magnético e o momento angular). Este fator viria a relacionar-se diretamente com o problema da violação do teorema de Larmor, abordado por Landé por volta de 1920 (DUNCAN; JANSSEN).

No tópico seguinte (Seção 40-3) o conceito de spin do elétron é introduzido. Cabe

ressaltar que os autores fazem referência ao Capítulo 32, Seção 7, do Volume 3 da coleção. O capítulo aborda as equações de Maxwell e o magnetismo da matéria, onde o conceito de spin é desenvolvido e aplicado na descrição das propriedades magnéticas da matéria. Não iremos incluir estes desenvolvimentos na análise. Trataremos aqui apenas do conceito de spin, tal como abordado na Volume 4 da coleção.

A abordagem ao conceito de spin inicia com uma descrição direta e objetiva:

Como vimos, na Seção 32-7, quer esteja *livre*, quer esteja *confinado* em um átomo, um elétron possui um **momento angular intrínseco**, \vec{S} , mais conhecido como **Spin**. (O nome *intrínseco* significa que \vec{S} é uma propriedade fundamental do elétron, como a massa e a carga elétrica.) Como vamos ver na próxima seção, o módulo de \vec{S} é quantizado e depende de um **número quântico de Spin**, s , que é igual a $1/2$ no caso dos elétrons (e também dos prótons e nêutrons). Além disso, a componente de \vec{S} em relação a qualquer eixo de referência é quantizada e depende de um **número quântico magnético de Spin**, m_s , que pode assumir apenas os valores $+1/2$ e $-1/2$ (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 248, grifos dos autores). (68)

Como podemos notar, no SA (68) os autores apresentam vários dos aspectos, qualitativos e quantitativos, que definem o conceito de spin. Não há nenhuma imagem ilustrativa ou mesmo uma descrição imagética para o spin, e os aspectos conceituais mencionados são apresentados como conceitos estabelecidos, ou seja, o SA apresenta traços da MEIC já estabilizados, sendo portanto, classificado na categoria da *Literalização*.

Após a caracterização conceitual do spin, os autores contextualizam historicamente a proposição do conceito:

A existência do spin do elétron foi postulada empiricamente por dois estudantes de doutorado holandeses, George Uhlenbeck e Samuel Goudsmit, para explicar alguns espectros atômicos. A teoria quântica do Spin foi formulada alguns anos mais tarde pelo físico inglês P. A. M. Dirac, que desenvolveu (em 1929) uma teoria quântica relativística para o elétron (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 248). (69)

Notemos que os autores não indicam o ano da publicação do trabalho de Uhlenbeck e Goudsmit, no qual o conceito de spin é proposto. O uso do termo “postulado empiricamente” sugere que a proposição do conceito é motivada por um quadro empírico e a menção à “teoria quântica do Spin”, formulada posteriormente por Dirac, reforça a percepção de que a proposição do conceito de spin foi impulsionada por resultados experimentais. Desse modo, o SA (69) pode ser classificado na categoria da *Experiência disponível*, uma vez que os autores destacam o aspecto empírico como justificativa para a proposição do conceito de spin.

Após a breve nota historiográfica, os autores mencionam o movimento de autorrotação do elétron.

Uma interpretação clássica do spin seria imaginá-lo como um movimento de rotação do elétron em torno do próprio eixo; entretanto, esse modelo clássico, como o modelo clássico das órbitas, não está de acordo com os resultados experimentais (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 248). (70)

Na física quântica o spin é considerado uma propriedade intrínseca do elétron; não é possível interpretá-lo classicamente (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 249). (71)

No SA (70) os autores procuram oferecer uma caracterização imagética para o conceito de spin, muito embora alertem para o impropério de tal caracterização. É importante destacar que a ideia do elétron girante foi capaz de descrever boa parte dos dados experimentais. O seu caráter *ad hoc*, ou seja, sua inclusão na teoria de Schrödinger sem uma derivação formal, bem como a persistência de algumas inconveniências (por exemplo, a velocidade de rotação ser superior a velocidade da luz) e lacunas (por exemplo, em relação ao porquê de se ter o fator giromagnético $g = 2$) conferiram à descrição do elétron girante certa rejeição. Apesar destas considerações, este SA apresenta aspectos da *Bissociação qualitativa* – “rotação do elétron em torno de seu próprio eixo” – e desse modo, pode ser classificado na referida categoria. O SA (71), por sua vez, contém aspectos conceituais já estabilizados acerca do conceito de spin do elétron, e portanto, pode ser classificado na categoria da *Literalização*.

Na sequência, os autores resgatam alguns aspectos da equação de Schrödinger, uma vez que este tópico é abordado antes do tópico sobre o spin. Os autores reafirmam o conjunto de números quânticos já abordados e agora incluem os números quânticos de spin.

[1] Devemos agora aumentar a lista de números quânticos incluindo s e m_s [...]. [2] Esse conjunto de cinco números quânticos especifica perfeitamente o estado quântico de um elétron em um átomo de hidrogênio ou em qualquer outro átomo (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 249). (72)

Todos os estados com o mesmo valor de n formam uma **camada**. Contando o número de valores permitidos de ℓ e m_ℓ e multiplicando o resultado por dois, para levar em conta os dois valores permitidos de m_s , constatamos que cada camada definida pelo número quântico n possui $2n^2$ estados (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 249, grifo do autor). (73)

Todos os estados com os mesmos valores de n e ℓ formam uma **subcamada** e possuem a mesma energia. É fácil mostrar que uma subcamada definida pelo número quântico ℓ possui $2(2\ell + 1)$ estados (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 249, grifo do autor). (74)

No SA (72) encontramos aspectos da MEIC já estabilizados. Os autores fornecem explicitamente elementos conceituais do estado quântico de um elétron em decorrência dos valores do número quântico de spin, fazendo-o de maneira completamente assertiva. Os

autores relatam também o modo como o conceito de spin modificou a descrição do átomo, modificando a relação de números quânticos. Assim, o trecho [1] do SA (72) pode ser classificado na categoria da *Reconfiguração* e o trecho [2], na categoria da *Literalização*.

O SA (73) contém a informação da quantidade de estados possíveis em cada camada eletrônica. A quantidade de elétrons em cada camada era um valor conhecido apenas empiricamente e a solução deste enigma está diretamente relacionada com a proposição do Princípio da Exclusão de Pauli e este, com os valores para o número quântico de spin (TOMONAGA, 1997). A proposição de Pauli, conforme indicamos no capítulo anterior, reconfigurou a base empírica; forneceu uma solução para o enigma da quantidade de elétrons nas camadas atômicas e lançou uma nova perspectiva acerca de sua proposição do “duplo valor peculiar e classicamente indescritível” (PAULI, 1925, p. 385). No SA (73), no entanto, esta informação é oferecida como uma consequência dos dois possíveis valores para o número quântico de spin, em combinação com os demais números quânticos (o enigma não é mencionado). Desse modo, a quantidade de elétrons em cada camada é visto como uma consequência decorrente do número quântico de spin do elétron. Tal como apresentado, o SA (74) não traz aspectos da experiência disponível, mas sim da estabilização do conceito de spin do elétron, sendo por este motivo, classificado da categoria da *Literalização*.

Vários aspectos relacionados às camadas e às subcamadas atômicas eram conhecidos mesmo antes da elaboração do conceito de spin do elétron. A quantidade de estados em função dos números quânticos n e ℓ não permitia, contudo, explicar os multipletos relacionados ao efeito Zeeman anômalo. Neste sentido, correspondiam a aspectos da *Experiência disponível*. O SA (74) pode, então, ser classificado nesta categoria.

No tópico seguinte (Seção 40-4) do manual, os autores iniciam a descrição do momento angular orbital e do momento magnético orbital, onde explicam que todo estado quântico de um elétron em um átomo possui um momento angular e um momento magnético, orbitais. E então, complementam:

Todo elétron, esteja livre ou ligado a um átomo, também possui um momento angular de spin e momento magnético de spin (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 249). (75)

Notemos, novamente, a asserção de aspectos relacionados ao conceito de spin do elétron. O SA (75) pode, portanto, ser classificado na categoria da *Literalização*, pois exprime aspectos do spin do elétron, como um conceito estabilizado.

A seguir, a expressão para o módulo do momento angular de um elétron em um átomo é apresentada, tal como indicado pela equação que segue:

$$L = \sqrt{\ell(\ell + 1)}\hbar. \quad (4.2)$$

Na equação (4.2), ℓ corresponde ao número quântico orbital e seu valor é estritamente positivo, limitado pelo valor do número quântico principal, tal que: $0 \leq \ell \leq n - 1$. Em decorrência do movimento orbital do elétron (Figura 5), há um momento magnético orbital, $\vec{\mu}_{orb}$, associado ao momento angular orbital definido por:

$$\vec{\mu}_{orb} = -\frac{e}{2m}\vec{L}. \quad (4.3)$$

Os momentos angulares orbital e magnético são antiparalelos. Devido à (4.2), os valores possíveis para $\vec{\mu}_{orb}$ são dados por:

$$\vec{\mu}_{orb} = \frac{e}{2m}\sqrt{\ell(\ell + 1)}\hbar. \quad (4.4)$$

Na expressão (4.4), e corresponde a carga do elétron, e m , a sua massa. Os autores alertam que o módulo dos vetores \vec{L} e $\vec{\mu}_{orb}$ não podem ser medidos diretamente, mas as componentes destes vetores em uma direção qualquer é quantizada, podendo ser medida aplicando-se um campo magnético \vec{B} na direção tomada como referência. Assumindo o eixo z como referência, o valor para a componente do momento magnético na referida direção é dado por:

$$\vec{\mu}_{orb,z} = -m_\ell\mu_B. \quad (4.5)$$

Na expressão (4.5), m_ℓ é o momento magnético orbital (decorrente do movimento orbital) e seus possíveis valores são dados por $m_\ell = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell$. O termo μ_B é uma constante física, denominada por *magneton de Bohr*, cujo valor é dado por:

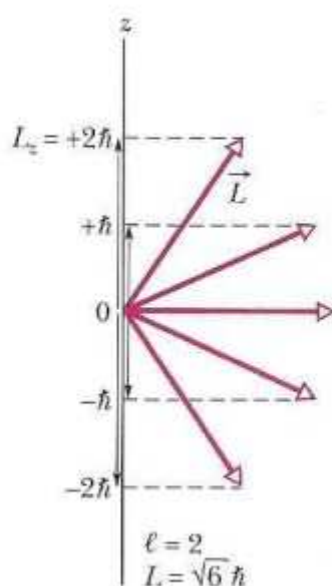
$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = 9,274 \times 10^{-24} J/T. \quad (4.6)$$

Em relação ao momento angular orbital, os autores indicam a quantização da uma das componentes (na direção z , arbitrária), dada por:

$$L_z = m_\ell \hbar. \quad (4.7)$$

A quantização da componente z do momento angular orbital é ilustrada de maneira pictórica (Figura 6) para o caso de $\ell = 2$, embora os autores alertem que “o leitor *não deve interpretar a figura literalmente* já que não é possível medir \vec{L} ” (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 250, grifo dos autores).

Figura 6 - Valores possíveis para a componente L_z , para o caso de $\ell = 2$ ($m_\ell = -2, -1, 0, +1, +2$).



Fonte: elaborado pelo autor, a partir de Halliday e Resnick (2009, p. 250). Em 14/04/2021.

A partir deste ponto, inicia-se a descrição dos momentos angular e magnético de spin. O módulo do momento angular de spin \vec{S} para um elétron livre ou ligado a um átomo é fornecido pela equação:

$$S = \sqrt{s(s+1)}\hbar. \quad (4.8)$$

A seguir, os autores definem o momento magnético de spin do elétron:

[...] um elétron possui um dipolo magnético intrínseco que está associado ao seu momento angular de spin \vec{S} . Esse dipolo magnético possui um **momento magnético de spin**, $\vec{\mu}_s$, que está relacionado ao momento angular de spin pela equação (4.9) (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 250, grifos dos autores). (76)

$$\vec{\mu}_s = -\frac{e}{m} \vec{S}. \quad (4.9)$$

No SA (76) os autores reafirmam que o elétron “possui um momento magnético de spin”, apontando também a expressão matemática (4.9) que o relaciona ao momento magnético angular de spin. Notemos que o contexto no qual estas informações estão inseridas não inclui a derivação das mesmas. Como vemos, tratam-se aqui de aspectos conceituais já estabilizados – são definições apresentadas – o que é característico do processo de *Literalização*, e desse modo, o referido SA pode ser classificado nesta categoria.

O sinal negativo na expressão (4.9) indica os vetores ali representados são antiparalelos. Uma vez que o módulo do momento angular de spin é quantizado, tal como indicado por (4.8), o módulo do momento magnético de spin também é quantizado e seu valor é definido pela substituição de (4.8) em (4.9):

$$\mu_s = \frac{e}{m} \sqrt{s(s+1)} \hbar \quad (4.10)$$

Tal como ocorre para o momento angular orbital, os autores indicam que os momentos angular e magnético de spin não podem ser medidos diretamente, ao passo que as componentes destes vetores em uma direção arbitrária (eixo z tomado como referência), além de mensuráveis são também quantizadas, tal como indicado nas expressões que seguem:

$$S_z = m_s \hbar, \quad (4.11)$$

$$\mu_{s,z} = -2m_s \mu_B, \quad (4.12)$$

onde μ_B é o magneton de Bohr, definido por (4.6).

Em relação ao termo m_s , presente nas expressões (4.11) e (4.12), os autores afirmam:

[...] m_s é o número quântico magnético de spin [...]. Esse número quântico pode ter apenas dois valores: $m_s = +1/2$ (caso em que dizemos que o elétron está com o *spin para cima*) e $m_s = -1/2$ (caso em que dizemos que o elétron está com o *spin para baixo*) (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 251, grifos dos autores). (77)

Notemos aqui mais dois aspectos do conceito de spin, a saber, os possíveis valores para o número quântico e os seus significados – *para cima* ou *para baixo*. O contexto e a forma com a qual estas informações são disponibilizadas confere à elas um papel tipicamente de definições conceituais sobre o spin, ou seja, são aspectos conceituais estabilizados, e por

isso, o SA (77) indica elementos de *Literalização* da metáfora epistêmica que originou o conceito de spin.

Ainda em relação ao SA (77), os termos de orientação, “spin para cima” e “spin para baixo”, no contexto considerado, remetem à representação vetorial tipicamente adotada nas rotações. Neste sentido, poderíamos considerar que o SA (77) apresenta, implicitamente, traços da *Bissociação qualitativa* do elétron girante. Assim, consideramos que aqueles trechos do SA podem ser classificados na referida categoria.

Os momentos angulares, magnético e de spin, bem como a quantização de suas componentes, são também representados pictoricamente, tal como indicado pela Figura 7. Ressaltamos que as equações (4.8), (4.10), (4.11) e (4.12) também indicam aspectos conceituais do spin, estes expressos matematicamente. Notemos que a exposição destas equações não são acompanhadas de maiores derivações, seja de caráter matemático ou histórico. Neste sentido, indicam aspectos conceituais indicados pelos autores de modo predominantemente assertivo. Do mesmo modo, a Figura 7 é empregada como recurso adicional para comunicar a quantização das componentes dos momentos angulares, magnético e de spin. Consideramos, portanto, que estes elementos – equações e figura – podem ser tomados como SA que refletem elementos da *Literalização* da metáfora epistêmica que originou o conceito de spin.

Adicionalmente, entendemos que a representação vetorial do momento angular de spin do elétron, \vec{S} , faz referência à ideia da bissociação do elétron auto rotativo. Neste sentido, consideramos que, em decorrência deste aspecto, a Figura 5 também pode ser entendida como um SA referente à categoria da *Bissociação imagética*.

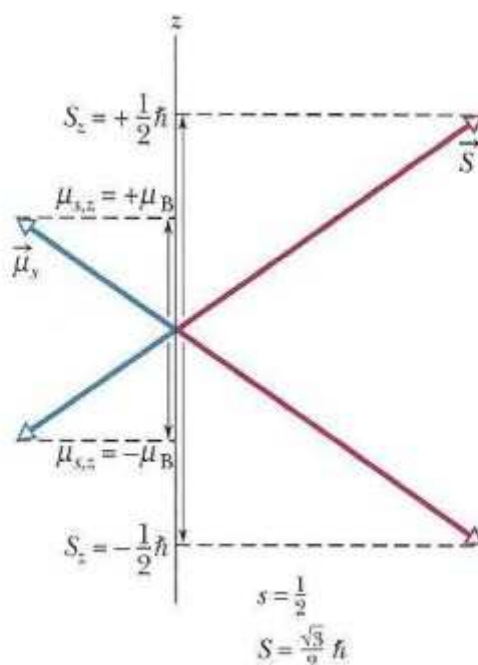
Após estabelecerem os principais aspectos conceituais para o spin do elétron, os autores abordam, em um novo tópico do capítulo em análise, a soma dos momentos angulares, orbital e de spin. O intuito é indicar que para os átomos multieletrônicos devem ser considerados todos os momentos angulares, orbital (\vec{L}) e de spin (\vec{S}), atribuídos a cada um dos N elétrons, para compor o momento angular total, \vec{J} , do átomo, tal como indicado pela expressão:

$$\vec{J} = \left(\vec{L}_1 + \vec{L}_2 + \cdots + \vec{L}_N \right) + \left(\vec{S}_1 + \vec{S}_2 + \cdots + \vec{S}_N \right). \quad (4.13)$$

O momento magnético total do átomo é apresentado com o intuito de melhor esclarecer as condições do experimento de Stern-Gerlach (ESG), que é tratado na seção

seguinte ao tópico em questão. Os autores explicam que “a soma vetorial dos momentos angulares orbitais e dos momentos angulares de spin da maioria dos elétrons de um átomo é zero” e desse modo o momento angular total, \vec{J} , se deve “à contribuição de um número relativamente pequeno de elétrons, às vezes de um único elétron de valência” (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 251).

Figura 7 - Representação dos vetores \vec{S} e $\vec{\mu}_s$ e suas componentes na direção arbitrária, z .



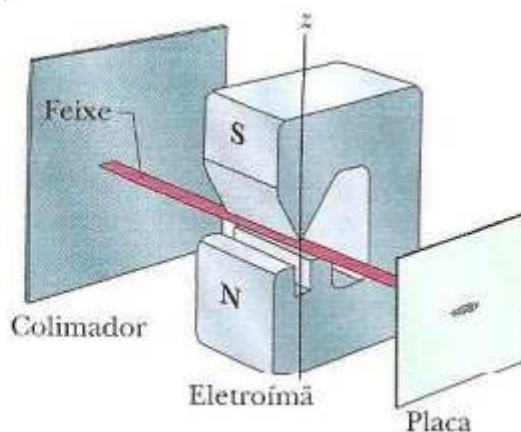
Fonte: elaborado pelo autor, a partir de Halliday e Resnick (2009, p. 251). Em 14/04/2021.

A Seção 40-5, referente ao ESG, inicia com uma breve nota historiográfica, indicando que no ano de 1922 os cientistas Otton Stern e Walther Gerlach, vinculados à Universidade de Hamburgo, na Alemanha, realizaram o experimento que leva os seus nomes. Uma breve descrição qualitativa do experimento é apresentada, bem como a Figura 8, a qual ilustra alguns dos detalhes mencionados na descrição do experimento.

Os autores explicam que no ESG átomos de prata são vaporizados em um forno, sendo então ejetados através de um colimador – fenda horizontal estreita – em direção a uma região de campo magnético, orientado verticalmente, produzido por um eletroímã. Após atravessarem a região do campo magnético, os átomos de prata atingem um anteparo de vidro, onde são depositados. De acordo com os autores, com o eletroímã desligado forma-se uma mancha estreita com a mesma forma do colimador, a ele alinhada; com o eletroímã acionado, a mancha deveria alongar-se na direção vertical, já que os átomos de prata se comportam como pequenos dipolos magnéticos.

Os átomos de prata podem ser desviados para cima ou para baixo, dependendo da orientação relativa entre seus dipolos e a direção do campo magnético aplicado, em decorrência da força magnética entre o ímã e os dipolos.

Figura 8 - Esquema do aparato experimental de Stern-Gerlach.



Fonte: elaborado pelo autor, a partir de Halliday e Resnick (2009, p. 252). Em 14/04/2021.

Após a descrição qualitativa do ESG há uma subseção onde são apresentados aspectos da interação entre campo e dipolo magnéticos. Os autores alertam que no experimento considerado, a interação magnética em questão não inclui a força de Lorentz, $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$, visto que os átomos de prata – envolvidos no experimento – são eletricamente neutros.

Os autores, então, afirmam que “o tipo de força magnética em que estamos interessados se deve à interação entre o campo magnético \vec{B} do eletroímã e os dipolos magnéticos dos átomos de prata” (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 252), e esta força pode ser obtida a partir da equação da energia potencial da interação, que é dada pela expressão:

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}. \quad (4.14)$$

A expressão acima indica o produto escalar entre os vetores momento de dipolo magnético, $\vec{\mu}$, dos átomos de prata e o campo magnético aplicado, o que é equivalente ao produto entre o módulo da projeção do momento de dipolo magnético na direção do campo magnético e o módulo do referido campo:

$$U = -\mu_z B, \quad (4.15)$$

de onde se obtêm a equação para a força magnética sobre os átomos de prata no ESG:

$$F_z = -\frac{dU}{dz} = \mu_z \frac{dB}{dz} \quad (4.16)$$

De acordo com os autores, o termo dB/dz é o gradiente do campo magnético aplicado, ao longo da direção z . Assim, um campo magnético nulo ou uniforme ($dB/dz = 0$) não atuaria sobre os átomos de prata, motivo pelo qual os ímãs do ESG apresentam um formato (indicado na Figura 8) de modo a maximizar o gradiente do campo magnético, buscando assim um efeito mais acentuado do ímã sobre os átomos de prata.

Diante deste quadro, os autores afirmam que a previsão da física clássica era de que os momentos de dipolo magnético poderiam variar continuamente, de $-\mu$ à $+\mu$. Assim, em função destes possíveis valores e do gradiente do campo magnético, diferentes átomos de prata ficariam sujeitos à forças magnéticas de diferentes intensidades e diferentes orientações – para cima ou para baixo – produzindo desvios gradativos, de modo que os átomos seriam depositados ao longo de uma região alargada e contínua, ao longo da direção de atuação do campo magnético aplicado.

Na sequência, os resultados do experimento são descritos em uma subseção intitulada como “A Surpresa”. Os autores relatam que os cientistas observaram duas manchas distintas, uma acima e outra abaixo do ponto onde os átomos de prata se acumulavam quando o campo magnético não atuava. Uma breve nota historiográfica relata o fato de que as manchas somente tornaram-se visíveis após um dos cientistas respirar sobre a amostra, exalando enxofre decorrente da fumaça de um charuto que havia fumado recentemente; a fumaça do charuto em reação com a prata formara sulfeto de prata, um composto escuro e assim, mais facilmente observável.

A interpretação dos resultados do ESG é apresentada em uma subseção à parte. Os autores reafirmam a previsão clássica bem como o resultado obtido por Stern e Gerlach (tal como descrito nos parágrafos anteriores) e concluem:

Assim, o experimento de Stern-Gerlach mostrou que a componente μ_z era quantizada, o que levou os cientistas a suspeitar (corretamente) que o vetor $\vec{\mu}$ também era quantizado. Além disso, como existe uma relação entre o momento magnético $\vec{\mu}$ e o momento angular \vec{L} tudo levava a crer que o momento angular e sua componente L_z também eram quantizados (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 253).

Esta passagem evidencia que os autores não vinculam o ESG à formulação com conceito de spin do elétron. Do ponto de vista histórico, o ESG foi, de início, equivocadamente relacionada com uma suposta quantização espacial dos planos de órbitas eletrônicas (cf. WEINERT, 1995), sendo posteriormente reinterpretado, levando em conta o conceito de spin do elétron. Os autores afirmam que “a teoria quântica moderna permite compreender melhor os resultados do experimento de Stern-Gerlach” (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 253) e apresentam uma breve digressão sobre sobre determinados aspectos dos átomos de prata, particularmente importantes para compreender o ESG.

Os átomos de prata apresentam uma quantidade ímpar de elétrons (47), sendo que a camada de valência apresenta apenas um elétron. Desse modo, têm-se um número par de elétrons nas camadas internas e devido as regras de quantização relacionadas à componente do momento angular orbital ($m_\ell = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell$), o número par de elétrons das camadas internas fechadas implica necessariamente em um momento angular orbital nulo para este conjunto de elétrons. Desse modo, o que se observa no experimento é decorrente da interação entre o momento de dipolo magnético referente ao único elétron da última camada:

[...] o momento magnético total $\vec{\mu}$ do átomo de prata é igual ao momento magnético de *spin* de um único elétron (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 253, grifo dos autores). (78)

Uma vez que já fora anteriormente estabelecido que momento magnético de spin, $\vec{\mu}_s$, possui a sua componente $\mu_{s,z}$ quantizada, combinando as expressões (4.12) e (4.16) e levando em conta os possíveis valores para o número quântico de spin, m_s , obtêm-se:

$$\begin{aligned}\mu_{s,z} &= -2 \left(+\frac{1}{2} \right) \mu_B = -\mu_B, \\ \mu_{s,z} &= -2 \left(-\frac{1}{2} \right) \mu_B = +\mu_B,\end{aligned}\tag{4.17}$$

e conseqüentemente:

$$\begin{aligned}F_z &= -\mu_B \left(\frac{dB}{dz} \right), \\ F_z &= +\mu_B \left(\frac{dB}{dz} \right).\end{aligned}\tag{4.18}$$

A expressão (4.18) indica, naturalmente, a possibilidade de separação em apenas dois feixes discretos.

Como vemos, por meio do SA (78) e das expressões (4.17) e (4.18) os autores indicam

assertivamente como o ESG deve ser corretamente interpretado a partir de elementos conceituais relacionados ao spin do elétron, ou seja, estes elementos conceituais e a correta interpretação do ESG são apresentados sem que haja menção às controvérsias que apontamos no capítulo anterior. Consideramos, portanto, que este SA e as equações à ele relacionadas podem ser classificados na categoria da *Literalização*. Uma vez que exprimem os aspectos conceituais e empíricos em sua forma final, estabilizada. Destacamos um aspecto peculiar da exposição referente ao ESG. Historicamente, o conceito de spin do elétron permitiu a reinterpretção do ESG e desse modo, esta reinterpretção corresponde a uma reconfiguração da base empírica, decorrente da MEIC da qual derivou o conceito de spin do elétron. Contudo, a exposição feita pelos autores não contempla a cronologia histórica destes eventos. A exposição de aspectos conceituais do spin do elétron, em sua forma acabada, é feita por meio de uma aplicação experimental destes conceitos – a interpretação do resultado do ESG.

Uma vez estabelecido o conceito de spin do elétron, os autores estendem o conceito ao núcleo atômico, descrevendo o fenômeno em uma seção dedicada à discussão da ressonância magnética nuclear (Seção 40-6).

O conceito de spin do elétron volta a ser considerado na Seção 40-7, a qual descreve brevemente o princípio da exclusão de Pauli – e o ano de sua proposição –, onde os autores estabelecem que “entre os números quânticos n , ℓ , m_ℓ e m_s de dois elétrons do mesmo átomo deve haver pelo menos um número diferente” (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 257). O conceito de spin do elétron também é considerado em outras duas seções, 40-8 e 40-9, que abordam, respectivamente, as armadilhas eletrônicas e a estrutura da tabela periódica. Contudo, a partir da Seção 40-6 nenhum aspecto conceitual novo, acerca do spin do elétron, é apresentado.

4.4.3 Resultados e considerações

Apresentamos no Quadro 5 o inventário dos SA que destacamos na subseção anterior. No referido quadro apresentamos os nomes das categorias analíticas, os SA indicados pela numeração, conforme a categoria analítica em que foram classificados. Na última coluna indicamos a quantidade total de SA em cada categoria – optamos por deixar esta coluna em branco para as categorias em que nenhum SA foi identificado ao longo da análise realizada. Uma vez que trechos dos SA (66) e (77) foram classificados em diferentes categorias, no

Quadro 5 estes SA aparecem repetidamente em mais de uma categoria.

Conforme indicado na seção anterior, identificamos que a bissociação qualitativa dada pelo SA (66) aparece acompanhada de uma imagem ilustrativa (Figura 5), o que nos levou a considerar mais uma categoria analítica para classificar as imagens empregadas para ilustrar bissociações, a qual denominamos por bissociação imagética.

Ao longo da análise consideramos que o SA (66), bem como a Figura 5, não correspondem diretamente à bissociações associadas à MEIC que origina o conceito de spin do elétron, e por esta razão, os respectivos SA foram indicados com (*) no Quadro 5 mas não foram contabilizados. A indicação destes SA decorre de suas funções didáticas na construção do conceito de spin do elétron no capítulo do manual ao qual esta análise se refere. Primeiramente, a estrutura matemática do momento angular de spin apresenta aspectos análogos à estrutura matemática do momento angular orbital: um momento angular (orbital ou de spin) tem a ele associado um momento de dipolo magnético (orbital ou de spin) que é antiparalelo e quantizado em uma direção arbitrária (eixo z tomado como referência) – ver equações (4.2) e (4.8), (4.7) e (4.11), (4.5) e (4.12). Em segundo lugar, a descrição do momento angular orbital é importante para a interpretação do ESG, tal como abordado no percurso didático do referido manual.

Considerando as funções didáticas do SA (66) e da Figura 5, estes elementos foram então contabilizados na categoria da *Experiência disponível*, uma vez que são apresentados como um conhecimento estabelecido e relevante para a estruturação e entendimento do conceito de spin do elétron, lembrando que este conhecimento estabelecido é ditado pelo nível de formação dos estudantes a quem o manual se destina.

Conforme indicado no Quadro 5, apenas 3 das 10 categorias analíticas são evidenciadas no capítulo analisado. Nota-se o predomínio de SA que caracterizam a *Literalização* da MEIC.

A bissociação originalmente proposta – o elétron girante – é explicitamente mencionada no SA (70) e o SA (77) apresenta traços implícitos desta bissociação. Além disso, nota-se um compromisso didático de evitar a analogia clássico/quântico, tal como indicado nos SA (70) e (71).

A quantidade de SA na categoria da *Experiência disponível* é relativamente expressiva. Consideramos que este aspecto é indicativo de um compromisso didático com a contextualização teórica e empírica na qual se insere o conceito de spin do elétron, levando em conta os conhecimentos prévios necessários aos aprendizes, conforme os objetivos de ensino de cada manual e a etapa do processo formativo a que se destinam.

Atribuímos à relativa predominância de SA na categoria referente à *Literalização* ao papel predominantemente didático dos manuais, sobretudo pelo nível introdutório do conceito de spin do elétron presente neste manual, no qual predominam definições mais diretas e poucas derivações matemáticas – características típicas de manuais introdutórios.

Quadro 5 - Inventário dos SAs identificados no Capítulo 40 do livro didático de Halliday e Resnick (2009). Itens destacados com (*) não foram contabilizados.

Categorias Analíticas	Segmentos Analíticos	Quantidade
Bissociação qualitativa	66*, 70, 77;	2
Bissociação quantitativa		
Bissociação imagética	Figura 5*; Figura 7;	1
Experiência Disponível	66, 67, 69, 74; Figura 5;	5
Critério de aceitação		
Critério de rejeição		
Contextualização		
Manifestação de aceitação		
Manifestação de rejeição		
Reconfiguração	72;	1
Literalização	68, 71, 72, 73, 75, 76, 77, 78; Figura 7; Equações 4.8, 4.10, 4.11, 4.12, 4.17, 4.18.	15

Fonte: elaborado pelo autor. Em 14/04/2021.

Consideramos que a ausência de SA relacionados à categoria da *Bissociação quantitativa* está de acordo com o nível introdutório atribuído ao referido manual. A inclusão destes elementos implicaria em aprofundamentos matemáticos relativamente complexos, tal como revelado pela análise historiográfica que apresentamos no capítulo anterior. Além disso, a associação do conceito de spin a um quadro clássico, tal como ocorreu historicamente, implicaria em uma complexa tarefa de desconstrução desta associação, uma vez que nas formulações da mecânica quântica posteriores à teoria de Dirac, esta associação já não existe.

A ausência de SA relacionados às categorias da *Contextualização*, *Critérios de aceitação/rejeição* bem como *Manifestação de aceitação/rejeição* indica a completa ausência de elementos sócio históricos e epistêmicos na abordagem adotada pelos autores. Desse modo, as tensões decorrentes da MEIC no interior da comunidade científica também não estão presentes.

Ao longo da abordagem didática analisada encontramos três trechos historiográficos –

sobre o experimento de Einstein-de Hass, a proposição do spin do elétron por Uhlenbeck e Goudsmit e a proposição do princípio de exclusão de Pauli. Consideramos como historiográficos por indicarem o ano daqueles acontecimentos, um breve relato destes acontecimentos e por indicarem os cientistas relacionados aos fatos narrados. Tratam-se, no entanto, de notas curtas, não articuladas com aspectos epistêmicos ou outros eventos correlatos, sendo, portanto, meramente informativas.

4.5 ANÁLISE DE MANUAIS: NÍVEL INTERMEDIÁRIO

Nesta seção iremos analisar o manual *Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas*²², dos autores R. Eisberg e R. Resnick. Qualificamos este manual como intermediário, uma vez que figura como bibliografia sugerida para disciplinas da etapa final de cursos de Graduação em Física Licenciatura.

4.5.1 Descrição do manual

O manual apresenta o tema referente ao spin do elétron inicialmente no Capítulo 8. No Quadro 6 apresentamos a organização dos tópicos desse capítulo:

Quadro 6 - Estrutura de tópicos referente ao Capítulo 8 do livro didático de Eisberg e Resnick (1985).

Seção	Tópico
8-1	Introdução
8-2	Momentos de Dipolo Magnético Orbital
8-3	A Experiência de Stern-Gerlach e o Spin do Elétron
8-4	A Interação Spin-Órbita
8-5	Momento Angular Total
8-6	Energia de Interação Spin-Órbita e os Níveis de Energia do Hidrogênio
8-7	Taxas de Transição e Regras de Seleção

22 EISBERG, R. M.; RESNICK, R. *Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas*. 23. ed. São Paulo: Campus, 1985.

8-8

8-8	Comparação Entre as Teorias Quânticas Moderna e Antiga
-----	--

Fonte: elaborado pelo autor, a partir de Eisberg e Resnick (1985), em 17/06/2020.

Em nossa análise iremos considerar apenas os tópicos 8-1, 8-2, 8-3 e 8-4, pois são nestes tópicos que encontramos elementos relacionados ao conceito de spin do elétron, levando em conta o recorte histórico que estamos abordando. Nos demais tópicos este conceito, ou não é mencionado, ou aparece como conceito aplicado no desenvolvimento de outros estudos.

4.5.2 Análise

Na introdução do Capítulo 8 (tópico 8-1) os autores afirmam:

Ao considerar os resultados das medidas dos momentos de dipolo magnético atômicos vamos descobrir um fato muito importante: os elétrons têm um momento angular intrínseco chamado spin, e um momento de dipolo magnético de spin a ele associado (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 345). (79)

Vemos no SA (79) que os autores já estabelecem o spin como um “momento angular intrínseco” ao elétron, caracterizando portanto a MEIC já em sua forma literalizada, muito embora trate-se do tópico introdutório do referido capítulo. Este SA, portanto, apresenta um dos elementos constitutivos da MEIC, correspondente à categoria analítica da *Literalização*.

Ainda na introdução do Capítulo 8 os autores colocam que “o efeito do spin do elétron nos níveis de energia do átomo de um elétron será então explorado” (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 345), o que indica um aspecto importante acerca do percurso didático adotado pelos autores, uma vez que, historicamente, foi a partir da exploração dos níveis de energia dos átomos de elementos alcalinos que se desenvolveu o conceito de spin do elétron. Nitidamente, os autores optam por inverter esta ordem, partido do conceito de spin para compreender os espectros de energia dos átomos de um elétron.

Na seção introdutória encontramos fragmentos de outros elementos da MEIC:

Neste capítulo, nosso tratamento vai utilizar uma combinação de teoria eletromagnética simples, teorias parcialmente clássicas como o modelo de Bohr e mecânica quântica. Um tratamento totalmente de mecânica quântica não será apresentado porque exige um conhecimento mais adiantado de teoria

eletromagnética do que foi suposto neste livro. Esse tratamento se justifica pelo fato dos resultados concordarem com os obtidos por uma abordagem puramente de mecânica quântica (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 345).

Notamos que os autores fornecem indícios do processo de bissociação que será empregado na construção do conceito de spin do elétron, uma vez que explicitam quais campos teóricos estarão envolvidos, sendo estes, a teoria eletromagnética clássica e o modelo de Bohr (o termo “combinação” é explicitamente utilizado), sem indicar, no entanto, como isto será feito. Notamos também que são oferecidas duas justificativas para o emprego dessa abordagem: uma de caráter puramente didático, relacionado ao nível de conhecimento prévio esperado dos estudantes, e outra de caráter utilitário, já que os resultados obtidos por meio da abordagem proposta concordam com aqueles obtidos por uma abordagem totalmente quântica.

Após uma breve introdução os autores iniciam o segundo tópico (8-2) onde irão discutir os momentos de dipolo magnético orbital. Utiliza-se o modelo do átomo de Bohr, onde um elétron (negativo) circunda um núcleo composto por um apenas um próton (positivo). O movimento do elétron em torno do núcleo é considerado de forma análoga ao movimento de uma corrente elétrica ao longo de uma espira circular, conforme ilustrado na Figura 9. A analogia proposta implicará em relacionar os domínios da teoria eletromagnética com o modelo atômico de Bohr, conforme indicado pelos autores:

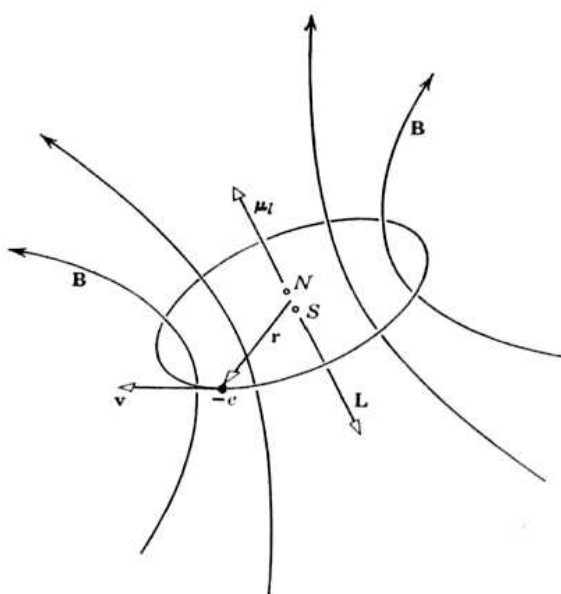
Mostra-se, na teoria eletromagnética elementar, que uma tal corrente produz um campo magnético equivalente, a grandes distâncias da órbita, a um campo produzido por um dipolo magnético localizado em seu centro e orientado perpendicularmente ao seu plano (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 346). (80)

Notamos que o SA (80) consiste em uma bissociação expressa em linguagem não matemática, caracterizando-o como uma *Bissociação qualitativa*. Além disso, a legenda da Figura 9, tal como apresentada no manual, contém uma descrição similar, onde pode ser novamente constatada uma descrição da bissociação entre a teoria eletromagnética e o modelo atômico do Bohr. Notemos, contudo, que a referida bissociação não se relaciona explicitamente ao conceito de spin, uma vez que trata-se do momento de dipolo magnético orbital do elétron devido ao seu movimento em torno do núcleo – não será, portanto, contabilizada. Outro ponto importante diz respeito ao uso de uma imagem para ilustrar esta bissociação. A imagem, acompanhada de sua legenda, tem um caráter complementar na tarefa de ilustrar a ideia contida na bissociação proposta. Poderíamos, então, categorizar a

bissociação expressa pela imagem na categoria *Bissociação imagética*.

Por outro lado, o SA (80) resgata conhecimentos anteriores, que já seriam de domínio de estudantes aptos a fazerem uso deste manual, isto é, a estratégia didática leva em conta que estes conhecimentos constituem uma base para compreender o momento angular do elétron no átomo de Bohr. Este aspecto conceitual é parte integrante de um quadro teórico empírico sobre o modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio e deste modo iremos considerar o referido SA, bem como a imagem da Figura 9, como referentes à categoria da *Experiência disponível*.

Figura 9 - Movimento do elétron em torno do núcleo, segundo o modelo atômico de Bohr.



Fonte: Eisberg e Resnick (1985b, p. 246). Em 24/05/2020.

Na Figura 9, **B** representa as linhas de campo magnético induzido pelo movimento do elétron em torno do núcleo; **L** representa o vetor de momento angular devido ao movimento circular em torno do núcleo; **r** representa o vetor de posição do elétron, em relação a um sistema de coordenadas fixo no núcleo; **v** representa o vetor velocidade do elétron em seu movimento orbital; μ_l representa o momento de dipolo magnético²³. Ao centro da figura temos os polos norte (N) e sul (S) que correspondem a um ímã fictício, o qual produziria um campo equivalente aquele induzido pelo movimento circular do elétron. Este movimento estabelece

²³ Salientamos que a notação empregada por este manual destaca as grandezas vetoriais escrevendo-as em negrito, como indicado na Figura 9, algo que pode passar despercebido. Para evitar qualquer confusão, deste ponto em diante indicaremos as grandezas vetoriais utilizando uma pequena seta acima das letras que representam estas grandezas.

uma corrente elétrica circular dada por:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{e}{T}, \quad (4.19)$$

onde e é a carga do elétron e T o período orbital. Da cinemática circular temos:

$$v = \omega r = \frac{2\pi r}{T} \rightarrow T = \frac{2\pi r}{v}. \quad (4.20)$$

Substituindo (4.20) em (4.19) obtemos:

$$i = \frac{ev}{2\pi r}. \quad (4.21)$$

O momento de dipolo magnético para uma espira circular é definido como:

$$\mu_\ell = iA. \quad (4.22)$$

No modelo de Bohr, o momento angular é quantizado de acordo com a seguinte relação:

$$L = mvr. \quad (4.23)$$

Explicitando a área de uma espira circular em (4.22) e empregando (4.21) e (4.23), obtemos:

$$\frac{\mu_\ell}{L} = \frac{ev}{2\pi r} \frac{\pi r^2}{mvr} = \frac{e}{2m}. \quad (4.24)$$

Uma vez que a razão entre o momento de dipolo magnético e o momento angular orbital, definida em (4.24), depende de uma combinação de constantes físicas, convencionou-se escrever:

$$\mu_b = \frac{e\hbar}{2m}. \quad (4.25)$$

A expressão (4.25) é definida como *magneton de Bohr*. Desse modo:

$$\frac{\mu_\ell}{L} = \frac{g_\ell \mu_b}{\hbar}, \quad (4.26)$$

onde $g_\ell = 1$ é denominado fator g orbital. Este fator, que aqui assume o valor unitário e portanto aparenta ser desnecessário, terá um papel importante em manter a simetria da equação (4.26) em relação a outras equações a serem desenvolvidas posteriormente em outros capítulos do manual, para as quais há equações análogas cujo fator g orbital assume valores diferentes (EISBERG; RESNICK, 1985). Neste ponto os autores apresentam argumentos qualitativos para estabelecer duas generalizações. Uma delas estabelece que o resultado dado por (4.26) é válido para qualquer formato de órbita, embora a dedução apresentada tenha sido pautada em termos de uma órbita circular. A outra consiste em estender a validade do resultado expresso em (4.26) para a forma vetorial:

$$\vec{\mu}_\ell = -\frac{g_\ell \mu_b}{\hbar} \vec{L}. \quad (4.27)$$

O desenvolvimento da teoria de Schrödinger para os átomos, bem como algumas de suas aplicações, são apresentados respectivamente nos Capítulos 5 e 6 do referido manual. Aspectos relacionados ao momento angular orbital \vec{L} , por sua vez, são tratados no Capítulo 7. Notamos, portanto, que ao iniciar o desenvolvimento dos conceitos relacionados ao spin do elétron, a parte introdutória da teoria quântica não relativística já foi apresentada. Desse modo, a relação $L = \sqrt{\ell(\ell+1)}\hbar$ é reintroduzida para definir o momento de dipolo magnético e sua componente z :

$$\mu_\ell = \frac{g_\ell \mu_b}{\hbar} L = \frac{g_\ell \mu_b}{\hbar} \sqrt{\ell(\ell+1)}\hbar = g_\ell \mu_b \sqrt{\ell(\ell+1)}, \quad (4.28)$$

$$\mu_{\ell_z} = -\frac{g_\ell \mu_b}{\hbar} L_z = -\frac{g_\ell \mu_b}{\hbar} m_\ell \hbar = -g_\ell \mu_b m_\ell. \quad (4.29)$$

De acordo com a teoria eletromagnética elementar, se um dipolo magnético ficar sujeito a um campo magnético haverá uma tendência de alinhamento entre o dipolo magnético e a direção do campo magnético. Esta tendência de alinhamento decorre de um torque gerado pelo campo magnético sobre o dipolo magnético:

$$\vec{\tau} = \vec{\mu}_\ell \times \vec{B}. \quad (4.30)$$

O alinhamento do dipolo magnético com o campo magnético implica também em uma variação de energia potencial, dada por:

$$\Delta E = -\vec{\mu}_\ell \cdot \vec{B}. \quad (4.31)$$

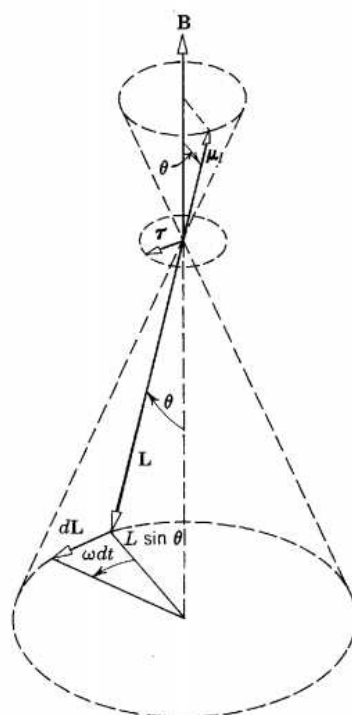
Agora, imaginemos que um pequeno dipolo magnético, digamos um pequeno ímã em forma de barra, esteja inicialmente em repouso. Ao ser submetido à ação de um campo magnético, o dipolo tenderá a se alinhar na direção deste campo. Este alinhamento consiste em uma pequena rotação, cuja causa é o torque dado por (4.30). Diríamos que o torque causou uma rotação no dipolo, de modo a alinhá-lo com o campo magnético, fazendo variar o seu momento angular, de zero para algum valor.

Ocorre, no entanto, que o dipolo magnético que estamos considerando é induzido a partir do movimento de um elétron girando em torno de um núcleo positivo. Desse modo, o sistema considerado já apresenta um momento angular (antiparalelo ao vetor de dipolo magnético, conforme Figura 9). Assim sendo, o torque decorrente da ação de um campo magnético sobre este dipolo irá provocar uma alteração no vetor momento angular \vec{L} , previamente existente. A Figura 10 ilustra a relação entre as grandezas vetoriais envolvidas na interação considerada.

Nesta figura, temos um campo magnético, \vec{B} , orientado verticalmente para cima, em interação com o momento de dipolo magnético, $\vec{\mu}_\ell$, orientado de um ângulo θ em relação a direção do campo magnético na região onde se encontra o dipolo magnético. O momento angular, \vec{L} , está orientado na direção antiparalela ao vetor momento de dipolo magnético, inclinado do mesmo ângulo θ em relação a direção do campo magnético externo.

O torque, $\vec{\tau}$, decorrente de (4.30), também indicado na figura, provocará uma variação no momento angular. Uma vez que este torque é ortogonal ao vetor momento angular, \vec{L} , não haverá alteração no módulo do momento angular, havendo, no entanto, variação na direção do mesmo. Como resultado, o vetor momento angular irá realizar uma precessão em torno do campo magnético, com uma dada velocidade ω , ocorrendo o mesmo com o vetor de dipolo magnético.

Figura 10 - Interação entre o momento de dipolo magnético induzido pelo momento do elétron em torno do núcleo atômico e um campo magnético externo.



Fonte: Eisberg e Resnick (1985, p. 349). Em 25/06/2020.

O vetor que representa a variação infinitesimal do momento angular, $d\vec{L}$, é equivalente a variação da projeção do vetor momento angular, $\vec{L} \sin \theta$, ao longo do arco ωdt . Em módulo, temos que o comprimento do vetor $d\vec{L}$ é aproximadamente igual ao comprimento do arco definido pelo produto entre o raio, $L \sin \theta$, e o arco, ωdt :

$$dL = L \sin \theta \omega dt. \quad (4.32)$$

O torque que atua sobre o momento de dipolo magnético também pode ser descrito pela 2ª Lei de Newton. Assim, empregando as relações (4.28) e (4.30) teremos:

$$\frac{dL}{dt} = \tau,$$

$$L \sin \theta \omega = \left| \vec{\mu}_\ell \times \vec{B} \right|,$$

$$L \sin \theta \omega = \mu_\ell B \sin \theta,$$

$$L\omega = \frac{g\ell\mu_b}{\hbar} LB.$$

Desse modo, obtemos para a velocidade angular de precessão:

$$\omega = \frac{g_b\mu_\ell B}{\hbar}. \quad (4.33)$$

O movimento de precessão, denominado precessão de Larmor (EISBERG; RESNICK, 1985), resulta do fato de que o torque é perpendicular ao vetor momento de dipolo magnético e, conseqüentemente, é também perpendicular ao vetor momento angular. A velocidade de precessão, dada por (4.33), é denominada frequência de Larmor (EISBERG; RESNICK, 1985). Nesta parte da exposição, os autores alertam:

A equação [4.33] foi obtida através de um tratamento clássico. Mas um tratamento quântico leva ao mesmo resultado, isto é, os *valores esperados* para as componentes perpendiculares ao campo magnético de um momento de dipolo magnético quântico variam de forma cíclica no tempo, de forma análoga às componentes perpendiculares ao campo de um momento de dipolo magnético clássico (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 349). (81)

O SA (81) sintetiza toda a argumentação que apresentamos nos parágrafos anteriores para derivar a expressão (4.33). Notadamente os autores estão mostrando como os elementos da mecânica clássica foram relacionados ao modelo de Bohr. Tal argumentação, sintetizada no referido SA, pode então ser classificado na categoria da *Bissociação qualitativa*, ao passo que o desenvolvimento matemático apresentado esboça sua correspondente *Bissociação quantitativa*. Por fim, a Figura 10 exprime a *Bissociação imagética*.

Novamente salientamos que o SA (81), a expressão (4.33) e a Figura 10 não indicam processos de bissociação relacionados ao conceito de spin do elétron. No entanto, são processos bissociativos que irão conduzir ao conceito de spin, segundo a estratégia didática adotada pelos autores do referido manual. Desse modo, consideramos que os referidos elementos textuais são empregados de modo a estabelecerem um quadro para a Experiência disponível, isto é, eles são introduzidos para estabelecer uma base teórico empírica sobre o estado do conhecimento necessário – segundo a estratégia didática adotada – para discutir o conceito de spin do elétron.

A discussão referente a interação do momento de dipolo magnético orbital com um campo magnético externo será empregada pelos autores para discutir o experimento de Stern-Gerlach. Tendo em vista esta finalidade, duas situações são discutidas. A primeira, que

acabamos de descrever, diz respeito a interação entre o momento de dipolo magnético e um campo magnético uniforme. Esta discussão é conduzida pelos autores de forma qualitativa e quantitativa, levando ao fenômeno da precessão de Larmor e sua matematização. O segundo caso, em que o dipolo magnético interage com um campo magnético convergente, ou seja, variável no espaço, é discutido apenas de modo qualitativo.

Para melhor compreender o que ocorre quando o sistema formado por um elétron girando em torno de um núcleo positivo fica sujeito a um campo magnético convergente, retomemos a Figura 9. Devemos salientar que além da interação entre o campo magnético e o momento de dipolo magnético, haverá também outra interação, esta entre o campo magnético e o elétron em movimento, descrita pela força de Lorentz:

$$F_m = q \vec{v} \times \vec{B}. \quad (4.34)$$

Se o campo magnético for uniforme e estiver orientado de modo perpendicular ao plano de órbita do elétron, este ficará sujeito a uma força magnética na direção radial e oposta a força decorrente da interação coulombiana, conforme ilustrado na Figura 11, à esquerda. Nesta situação, como já destacada anteriormente, embora haja um torque, o efeito observado será a precessão dos vetores momento de dipolo e momento angular, tal como ilustrado na Figura 10.

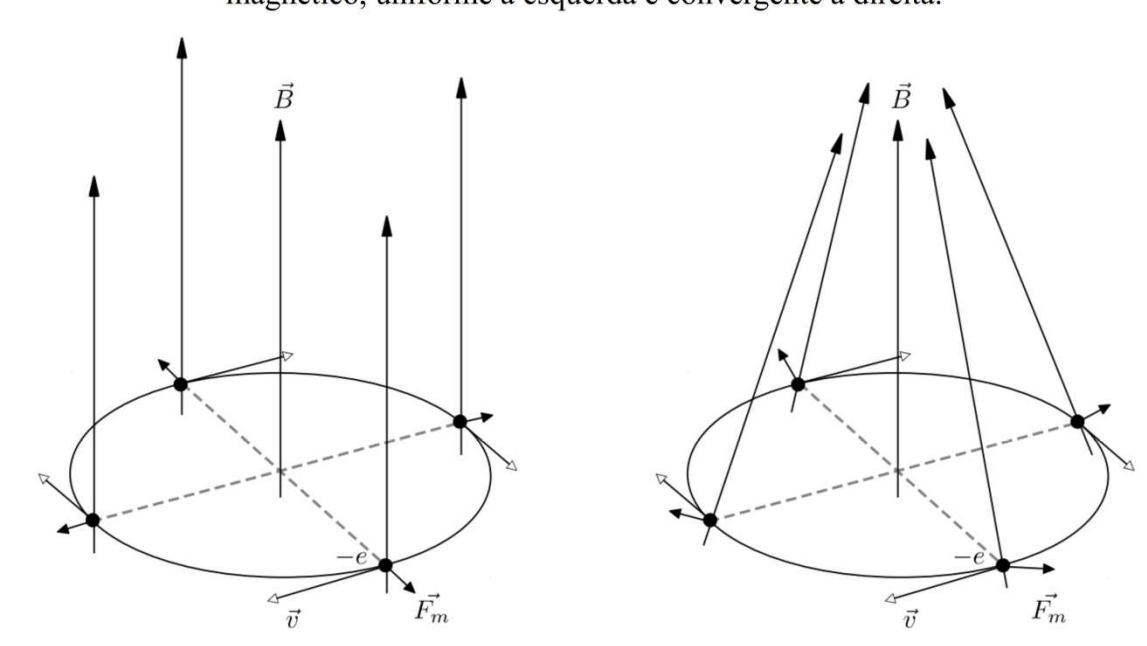
No entanto, caso haja uma variação espacial do campo magnético, de modo que ele seja convergente, tal como indicado na Figura 11, à direita, a direção da força magnética torna-se inclinada em relação ao plano de órbita do elétron, e neste caso, haverá uma componente vertical, que irá produzir uma translação orientada para onde o campo converge.

Conforme Eisberg e Resnick (1985), considerando o movimento ao longo de uma órbita completa, o efeito médio da componente radial é nulo, ao passo que o efeito médio da componente ao longo da direção de convergência do campo é dado por:

$$\overline{F_z} = \frac{\partial B_z}{\partial z} \mu_{\ell_z}. \quad (4.35)$$

Desse modo, um campo convergente produzirá dois efeitos sobre o momento de dipolo magnético: um torque, o qual produzirá o movimento de precessão no momento de dipolo magnético em torno da direção de convergência do campo; e uma translação, ao longo da direção de convergência do campo magnético, orientada de acordo com o sentido ao longo do qual a intensidade do campo aumenta.

Figura 11 - Força de Lorentz sobre um elétron em seu movimento orbital devido a um campo magnético, uniforme à esquerda e convergente à direita.



Fonte: elaborado pelo autor, a partir de Eisberg e Resnick (1985, p. 350). Em 27/06/2020.

Após estas discussões, os autores seguem para o tópico seguinte (8-3), no qual descrevem o ESG, onde aparece a primeira referência histórica:

Em 1922, Stern e Gerlach mediram os valores possíveis do momento de dipolo magnético de átomos de prata enviando um feixe desses átomos através de um campo magnético não uniforme (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 351). (82)

Notemos que o SA 82 informa quais foram os cientistas e em que ano realizaram o experimento, por meio do qual foram medidos os possíveis valores para o momento de dipolo magnético. Este SA pode ser classificado na categoria da *Experiência disponível*, uma vez que traz elementos do quadro empírico – os autores informam que os cientistas “mediram” os possíveis valores para os momentos de dipolo magnético, embora não os especifique.

Conforme indicado em (4.35), a força magnética que produz a translação dos dipolos magnéticos é proporcional a componente vertical, z , dos momentos de dipolo magnético e esta, por sua vez, é proporcional ao número quântico m_ℓ , conforme (4.29).

Desse modo, de acordo com a previsão clássica, a medição dos momentos de dipolo magnético ao longo de uma direção (vertical, por exemplo) deveria resultar numa faixa contínua. Classicamente, o momento angular pode assumir qualquer valor e ter qualquer direção espacial, de modo que sua projeção ao longo de uma dada direção (vertical, por exemplo) pode, igualmente, assumir qualquer valor. Por outro lado, a previsão quântica prevê

apenas alguns valores possíveis para as componentes do momento angular; mais especificamente, prevê que para um dado valor de ℓ , os valores para a projeção variem tal que $m_\ell = -\ell, \dots, 0, \dots, +\ell$. Estas descrições são acompanhadas de uma imagem esquemática do ESG, tal como ilustrado na Figura 12.

Os autores enfatizam que a direção vertical é tomada arbitrariamente, ou seja, os resultados do experimento não seriam afetados por uma mudança na direção de convergência do campo magnético produzido pelos ímãs no aparato experimental. Além disso, fornecem detalhes técnicos adicionais.

Stern e Gerlach descobriram que o feixe de átomos de prata era separado em duas componentes discretas, uma sendo desviada na direção de z positivo e a outra na direção de z negativo. A figura [13] mostra uma configuração típica observada na placa de detecção. Eles observaram também que esses resultados eram obtidos independentemente da escolha da direção z . Repetiu-se a experiência com vários outros tipos de átomos, e em cada caso investigado observou-se que o feixe defletido se dividia em dois ou mais componentes discretos, estes resultados são, *qualitativamente*, demonstrações experimentais diretas da quantização da componente z dos momentos de dipolo magnético dos átomos e, portanto, de seus momentos angulares. Em outras palavras, as experiências mostraram que a orientação espacial dos átomos é quantizada. O fenômeno é denominado *quantização espacial* (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 352, grifos dos autores). (83)

No extenso SA (83) verificamos como os autores estabelecem o cenário empírico decorrente do ESG. Desse modo, podemos classificá-lo na categoria da *Experiência disponível*. Devemos salientar que os autores ainda não vincularam o ESG ao conceito de spin, sobretudo porque a realização do mesmo com diferentes tipos de átomos, como relatado, leva a feixes defletidos divididos em “dois ou mais componentes discretos”. Além disso, os autores chamam a atenção para o fenômeno da “quantização espacial”, decorrente da interpretação dos resultados do experimento.

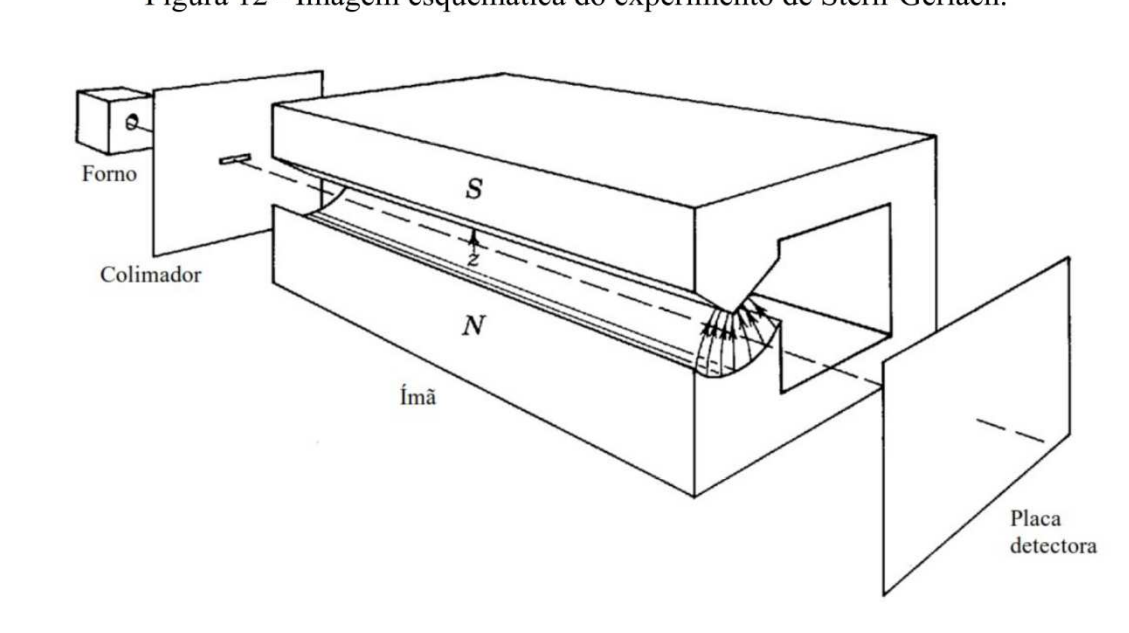
O SA (83) também se utiliza de uma imagem, tal como ilustrado na Figura 9, para esboçar os resultados do ESG ao realizarem o referido ensaio utilizando átomos de prata.

Neste ponto os autores chamam a atenção para uma divergência quantitativa entre os resultados do experimento e a previsão da “teoria quântica”, tal como estabelecida até então: uma das possibilidades para m_ℓ é o valor nulo, que aliás é sempre um dos valores possíveis. Isto implicaria que em todos os ensaios, para quaisquer tipos de átomos, deveria haver uma faixa horizontal ao centro da distribuição, indicando que uma quantidade dos átomos não foi desviada por possuir um momento de dipolo magnético nulo.

Diante desta discrepância os autores levantam duas possibilidades: ou há algo errado com a teoria de Schrödinger, ou ela está incompleta. Notemos aqui um descompasso entre o percurso didático adotado pelos autores na elaboração do manual e a cronologia dos eventos

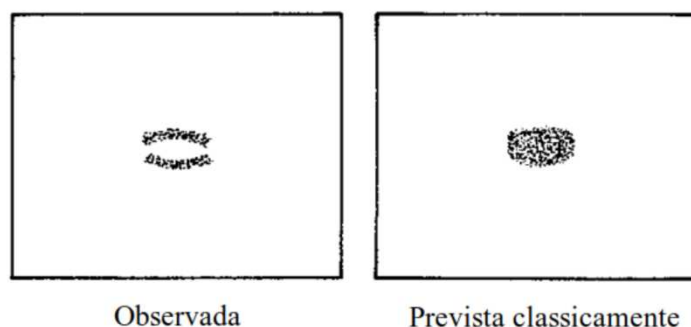
considerados. Na sequência didática do manual em questão, a teoria de Schrödinger e suas aplicações estão dispostas nos Capítulos 5, 6 e 7, enquanto o ESG é tratado no Capítulo 8. Contudo, historicamente a teoria de Schrödinger data de 1926 (KRAUGH, 1981) e o ESG, de 1922 (WEINERT, 1995). Os autores citam ainda o experimento realizado por Phipps e Taylor, o qual consiste no ESG realizado com átomos de hidrogênio, em 1927 (WEINERT, 1995). Este último fornece um resultado particularmente importante, uma vez que o átomo de hidrogênio possui apenas um elétron.

Figura 12 - Imagem esquemática do experimento de Stern-Gerlach.



Fonte: Eisberg e Resnick (1985, p. 351), adaptado pelo autor. Em 28/06/2020.

Figura 13 - À esquerda, resultado do experimento de Stern-Gerlach para os átomos de prata; à direita, a previsão clássica para o referido fenômeno.



Fonte: Eisberg e Resnick (1985, p. 352), adaptado pelo autor. Em 28/06/2020.

Assegurando-se a condição de ter o sistema no estado fundamental, portanto com $\ell = 0$ e conseqüentemente $m_\ell = 0$, o resultado esperado seria inevitavelmente uma faixa

horizontal localizada no centro da figura, sem quaisquer desvios. Contudo, foi observado que o feixe dividia-se em duas componentes, acima e abaixo, tal como representado na Figura 13, à esquerda. Diante deste quadro os autores sugerem interpretar os resultados de outra forma:

Existe, portanto, certamente algum momento de dipolo magnético no átomo que não foi levado em consideração. Uma possibilidade seria o momento de dipolo magnético associado ao movimento de cargas no núcleo. Um tal momento de dipolo seria da ordem de $e\hbar/2M$, onde M é a massa do próton. Mas o momento de dipolo magnético medido experimentalmente [...] é cerca de 2000 vezes maior. O núcleo, portanto, não pode ser responsável pelo momento de dipolo magnético observado. Sua origem deve estar ligada ao elétron (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 352–353). (84)

Conforme indicado no SA (84), uma vez mais os autores procuram estabelecer uma base empírica para fundamentar as discussões e encaminhar a introdução do conceito de spin do elétron, como veremos. O referido SA pode, portanto, ser classificado na categoria da *Experiência disponível*.

Somos levados a fazer algumas hipóteses razoáveis, corroboradas por outras evidências a serem discutidas brevemente. [1] Vamos supor que o elétron tem um momento de dipolo magnético μ_s intrínseco (inerente), consequência da existência de um momento angular intrínseco S , denominado *spin*. [2] De um ponto de vista clássico, podemos imaginar, sem muito rigor, o elétron produzindo o campo magnético de um dipolo magnético por causa da corrente associada à sua carga girando em um movimento e rotação em torno de si mesmo (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 353, grifo do autor). (85)

Como pode ser observado no trecho [2] do SA (85), os autores explicitam – pela primeira vez – a bissociação relacionada ao conceito de spin, atribuindo ao elétron uma autorrotação. Implicitamente estão sendo relacionados, a eletrodinâmica clássica e o modelo atômico de Bohr. Este trecho do SA pode, portanto, ser classificado na categoria da *Bissociação qualitativa*, visto que é expressa em linguagem não matemática. Além disso, no trecho [1] deste SA o termo *spin* é introduzido e parcialmente conceituado, ainda em termos inteiramente clássicos, mas já apresentado com algumas de suas características conceituais mencionadas diretamente, embora vinculadas aos resultados do ESG, previamente apresentados. Desse modo, entendemos que o trecho [1] do SA pode ser classificado na categoria da *Literalização*.

A seguir, os autores definem, por analogia com o momento angular orbital, as expressões para o momento angular de spin e para sua componente z :

Suporemos que a intensidade S e a componente S_z do *momento angular de spin* estão associadas a dois números quânticos, s e m_s , através de relações de quantização idênticas as do momento angular orbital (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 353, grifo do autor). (86)

No SA (86) os autores estabelecem mais alguns aspectos conceituais relacionados aos

spin do elétron. Tratam-se de *dois números quânticos*, estabelecidos a partir de relações matemáticas *idênticas as do momento angular orbital*. Como pode ser notado, não há maiores desenvolvimentos para associar a estrutura das equações entre os dois momentos angulares. Consideramos, portanto, que este SA exprime aspectos do conceito de spin do elétron já *Literalizados*.

Destacamos que atribuir ao spin do elétron a mesma estrutura matemática do momento angular orbital não configura um processo de bissociação, uma vez que não há menção a quaisquer âmbitos teóricos a serem relacionados, a partir dos quais as equações que definem os valores do spin venham a ser derivadas. Seria mais apropriado dizer que as equações do momento de dipolo magnético de spin são obtidas por analogia com o momento de dipolo magnético orbital. As equações são, então, apresentadas, tal como segue:

$$\mu_s = -\frac{g_s \mu_b}{\hbar} S, \quad (4.36)$$

$$\mu_{s_z} = -g_s \mu_b m_s, \quad (4.37)$$

onde g_s é denominado fator g de spin.

A analogia com o momento angular orbital estende-se à determinação dos números quânticos do momento angular de spin. Os autores se apoiam nos resultados do ESG para atribuir dois valores possíveis para o momento angular de spin, uma vez que o feixe se divide em duas componentes simétricas. Além disso, tal como ocorre entre ℓ e m_ℓ , os valores para m_s diferem por valores unitários, variando de $-s$ a $+s$, sem contudo admitir o valor nulo, tal como observado no referido experimento. Desse modo:

$$s = 1/2, \quad (4.38)$$

$$m_s = -1/2, +1/2. \quad (4.39)$$

Ainda referenciando o ESG, os autores irão estabelecer a magnitude do termo g_s :

Pela medida da separação dos feixes dos átomos de hidrogênio, é possível determinar a força resultante F_z exercida sobre os mesmos ao atravessarem o campo magnético. Por analogia com [4.35] e [4.37], teremos $\overline{F_z} = -(\partial B_z / \partial z) \mu_b g_s m_s$. Como μ_b é conhecido e $\partial B_z / \partial z$ pode ser medido, a experiência determina o valor da grandeza $g_s m_s$. Dentro da precisão experimental, encontrou-se que $g_s m_s = \pm 1$. Como concluímos que $m_s = \pm 1/2$, teremos $g_s = 2$ (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 353). (87)

Notamos no SA (87) que o ESG é empregado para estabelecer a magnitude de algumas grandezas relacionadas ao conceito de spin do elétron. Novamente, não há aqui nenhuma referência a qualquer bissociação, muito embora seja explícito o uso da analogia com o momento angular orbital. Como pode ser notado, o ESG é empregado como evidência experimental para estabelecer aspectos conceituais do spin, e neste sentido, estão fazendo referência a base empírica. Assim, consideramos que este SA pode ser classificado na categoria da *Experiência disponível*.

Além de empregarem o ESG como base empírica para conceituar o spin do elétron, os autores reforçam suas afirmações citando outros resultados experimentais, como o *Efeito Zeeman* e o *desvio de Lamb*.

Essas conclusões foram confirmadas por muitos experimentos diferentes. Por exemplo, no efeito Zeeman, aplica-se um campo magnético externo uniforme a um conjunto de átomos e medem-se as energias potenciais devido às orientações dos momentos de dipolo magnético dos átomos no campo externo. [...] Medidas espectroscópicas recentes de Lamb, usando técnica extremamente precisa, mostrou que na verdade $g_s = 2,00232$ (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 354). (88)

Novamente destacamos um trecho que pode ser classificado na categoria da *Experiência disponível*. Notemos, contudo, que o SA (88) não reflete o emprego da base empírica para propor uma bissociação ou seu uso como critério de aceitação/rejeição de uma bissociação. A base empírica é aqui evocada para justificar aspectos do conceito de spin do elétron, já indicados no SA (85). Notemos, também, que o problema dos multipletos é mencionado como uma comprovação adicional, quando na verdade, foi o problema dos multipletos que orientou a comunidade científica na elaboração do conceito de spin.

Como já indicado anteriormente, os autores não seguem uma ordem cronológica dos eventos históricos relacionados ao surgimento do conceito de spin do elétron. O SA (88) evidencia, uma vez mais, certo descompasso histórico entre o percurso didático proposto pelos autores e os fatos históricos. Por exemplo, os trabalhos de Peiter Zeeman (1865-1943) acerca o efeito que leva o seu nome datam de meados da década de 1890 (ZEEMAN, 1897), enquanto os trabalhos de Willis Lamb (1913-2008), aqui mencionados, datam de 1947 (LAMB; RETHERFORD, 1947). Ressaltamos que este descompasso não é explícito – os

traços da MEIC já estão apagados.

Os autores seguem apresentando alguns elementos históricos, estes, sim, em sincronia com a sucessão dos eventos, tais como ocorreram:

A ideia do spin do elétron foi introduzida algum tempo antes do trabalho de Phipps e Taylor. Na frase inicial de um artigo científico sobre espalhamento de raios X por átomos, publicado em 1921, Compton escreveu: “Posso concluir então que o próprio elétron, girando em torno de si como um pequeno giroscópio, e provavelmente a última partícula magnética”. Tratava-se na verdade mais de uma especulação do que de uma conclusão e Compton, aparentemente, nunca levou-a adiante (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 355, grifos do autor). (89)

No SA (89) podemos notar que os autores explicitam novamente, através das palavras de Compton, a ideia da autorrotação do elétron. Desse modo, este SA pode ser classificado na categoria *Bissociação qualitativa*, pois, como é evidente, a bissociação está sendo proferida em linguagem não matemática. Além disso, podemos notar que o SA contextualiza historicamente a bissociação, atribuindo os créditos a Compton e indicando não somente a data, mas também o meio pelo qual a bissociação foi materializada (neste caso, na forma de artigo científico). Estabelece, além disso, o desfecho da referida proposição, pois indica que Compton não levou sua ideia adiante.

Na sequência os autores mencionam os trabalhos de Uhlenbeck e Goudsmit, apresentando um novo elemento para compor a base empírica em que se apoiam, até então centrada no ESG:

O mérito da introdução do spin do elétron é geralmente atribuído a Goudsmit e Uhlenbeck. Em 1925, como estudantes de pós-graduação, estavam tentando entender por que certas linhas do espectro óptico do hidrogênio e de átomos alcalinos são compostas de pares de linhas muito próximas (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 355). (90)

Isto constitui a *estrutura fina*, tratada por Sommerfeld em termos do modelo de Bohr e interpretada como sendo devida ao desdobramento dos níveis de energia atômicos causada por uma contribuição pequena [...] à energia total, da variação relativística da massa do elétron com a velocidade. Os resultados de Sommerfeld estavam em bom acordo numérico com a estrutura fina observada para o hidrogênio. A situação, porém, não era tão satisfatória no caso dos átomos alcalinos (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 355, grifo do autor). (91)

No SA (90) os autores buscam estabelecer uma certa contextualização histórica. Esta característica empregada com relativa frequência, como pode ser observado nos SA (82) e (89), onde os autores apresentam fatos datados e nominam cientistas.

Notadamente, no SA (91) podemos constatar que os autores fornecem indícios de uma bissociação – aspectos da relatividade restrita agregados ao modelo de Bohr. Esta bissociação,

contudo, não tem relação com a bissociação que dá origem ao conceito de spin, como veremos, mas fornece novos elementos da base empírica, agora voltados para o contexto fenomenológico dos espectros ópticos dos átomos alcalinos, agora expondo indícios das dificuldades inerentes à problemática do spin. Desse modo, o referido SA pode ser classificado na categoria da *Experiência disponível*.

Na sequência, os autores relatam superficialmente a produção das raias do espectro óptico dos átomos alcalinos e os desdobramentos observados nestas linhas espectrais, bem como as falhas das previsões de Sommerfeld na descrição deste fenômeno (EISBERG; RESNICK, 1985). Em seguida, os autores reafirmam alguns dos aspectos relacionados ao conceito de spin do elétron.

Considerando outras possibilidades, Goudsmit e Uhlenbeck, propuseram a existência de um momento angular e momento de dipolo magnético, cujas componentes z seriam especificadas por um quarto número quântico m_s , que teria dois valores possíveis, $-1/2$ e $+1/2$. O desdobramento dos níveis de energia atômicos seria então devido à energia potencial de orientação do momento de dipolo magnético do elétron no campo magnético que existe no átomo, causado por suas partículas carregadas que se movem. A energia de orientação seria positiva ou negativa, dependendo do sinal de m_s , isto é, dependendo se o spin estiver “para cima” ou “para baixo” em relação ao campo magnético *interno* do átomo (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 356). (92)

Como pode ser observado, no SA (92) os autores reafirmam uma série de aspectos conceituais relacionados ao spin do elétron, como o fato de se tratar de um quarto número quântico, bem como seus possíveis valores. Fornecem, também, uma interpretação para o fenômeno dos multipletos, uma vez que explicam qualitativamente como o fenômeno pode ser descrito a partir da ideia de Goudsmit e Uhlenbeck. Este SA, portanto, introduz aspectos do conceito de spin já estabilizados, sem mencionar toda a controvérsia envolta na questão dos espectros ópticos dos elementos alcalinos (TOMONAGA, 1997). Desse modo, o referido SA pode ser classificado na categoria *Literalização*.

Enfatizemos, aqui, outro aspecto importante. O trecho do manual indicado pelo SA (92) é seguido por uma longa citação da obra de Jammer (1989), que traz o depoimento de Uhlenbeck, uma narrativa do episódio relacionado a proposição da ideia da autorrotação do elétron e dos problemas a ela associadas. Esta citação, que indicamos adiante como o SA (93), cumpre uma dupla finalidade. Como pode ser observado, trata-se de um registro histórico em meio ao texto didático de um manual. A narrativa de Uhlenbeck expõem elementos epistêmicos, como por exemplo, colocar a ideia da autorrotação do elétron em uma perspectiva de controvérsia científica. Por outro lado, este fragmento histórico contém uma série de elementos conceituais relacionados ao spin do elétron desempenhando, portanto, uma

função didática.

Goudsmit e eu atinamos com essa ideia ao estudarmos um trabalho de Pauli, onde o famoso princípio da exclusão (a ser tratado no Capítulo 9) era exposto e onde, pela primeira vez, eram atribuídos *quatro* números quânticos ao elétron. Isto era feito bastante formalmente; nenhuma descrição concreta lhe era associada. Para nós, isto era um mistério. Estávamos tão imbuídos da ideia de que cada número quântico corresponde a um grau de liberdade (uma coordenada independente) e por outro lado convencidos da característica puntual do elétron (que obviamente teria três graus de liberdade) que não conseguíamos imaginar um quarto número quântico. Poderíamos admiti-lo somente se assumíssemos que o elétron era uma pequena esfera que podia girar... Pouco depois, encontramos num artigo de Abraham, que Ehrenfest nos mostrou, que para uma esfera girando com carga superficial poder-se-ia justificar classicamente o fator dois necessário ao momento magnético ($g_s = 2$). Isto nos encorajou, mas nosso entusiasmo foi consideravelmente reduzido quando vimos que a velocidade de rotação na superfície do elétron deveria ser muitas vezes maior que a velocidade da luz. Lembro-me que a maioria destas ideias nos ocorreu numa tarde, no final de setembro de 1925. Estávamos entusiasmados mas não tínhamos a menor intenção de publicar nada a respeito. Parecia tão especulativo e ousado que alguma coisa devia estar errada, sobretudo tendo em vista que Bohr, Heisenberg e Pauli, nossas grandes autoridades, não tinham nunca proposto algo semelhante. Mas, é claro, falamos com Ehrenfest. Ele ficou impressionado imediatamente, sobretudo, acho, devido ao aspecto pictórico de nossa hipótese, muito de acordo com sua maneira de pensar. Ele nos fez ver vários pontos, por exemplo, o fato de que, em 1921, A. H. Compton tinha sugerido a ideia de um elétron que girava sobre si mesmo como uma explicação possível para a unidade natural do magnetismo e finalmente nos disse que tratava-se de algo muito importante ou então sem sentido e que deveríamos escrever um pequeno artigo para a *Naturwissenschaften* (uma revista de física) e entregar a ele. Ele terminou dizendo 'e então consultaremos Lorentz'. Isto foi feito. Lorentz nos recebeu com sua renomada amabilidade e ficou muito interessado, embora, eu achei, algo cético também. Prometeu pensar a respeito. E de fato, já na semana seguinte, deu-nos um manuscrito, escrito com sua bela caligrafia, contendo longos cálculos sobre as propriedades eletromagnéticas dos elétrons girantes. Não pudemos entender inteiramente, mas era claro que a imagem do elétron girante daria origem a várias dificuldades. Por exemplo, a energia magnética seria tão grande que, pela equivalência de massa e energia, o elétron teria uma massa maior que a do próton, ou então, mantendo sua massa no valor conhecido, o elétron seria maior do que o átomo! Em qualquer caso parecia um absurdo. Goudsmit e eu sentimos que seria melhor não publicar nada no momento. Mas, quando dissemos isso a Ehrenfest, ele respondeu: 'Já mandei o artigo de vocês a muito tempo. Vocês são suficientemente jovens para se permitirem algumas imprudências!' (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 356, grifos do autor).

(93)

O SA (93), como um todo, explicita uma pequena parte da contextualização histórica acerca da elaboração do conceito de spin do elétron. Além disso, do ponto de vista didático, este SA expõem alguns elementos que contribuem para estabelecer o conceito de spin do elétron (sua representação a partir de um quarto número quântico; o seu caráter abstrato; a busca por meios concretos para uma interpretação do spin e a própria ideia de autorrotação). Deste modo, consideramos que os fragmentos contidos no SA (93) podem ser classificados na categoria *Literalização*, uma vez que apresentam ideias já estabilizadas sobre o conceito de spin do elétron.

Destacamos também que outros fragmentos do SA (93) podem ser classificados nos critérios *Manifestação de aceitação* e *Manifestação de rejeição*, respectivamente as partes em

que Uhlenbeck narra a boa receptividade de Ehenfest e a manifestação de Lorentz, por meio da qual expõem seus argumentos contrários a ideia da autorrotação do elétron. Este SA inclui também fragmentos que podem ser classificados nas categorias *Critério de aceitação* e *Critério de rejeição*, pois além de exprimir o posicionamento de alguns cientistas – contra e a favor – estes fragmentos expõem os motivos pelos quais os cientistas manifestaram seus posicionamentos em relação a ideia da autorrotação. Após o SA (93) os autores dedicam alguns parágrafos para estabelecer o caráter pontual do elétron, apresentando argumentos empíricos em caráter qualitativo.

Até aqui, o percurso didático adotado pelos autores introduziu o conceito de spin do elétron em termos inteiramente clássicos, mas a partir de então, começam a ponderar as primeiras considerações não clássicas para o referido conceito.

Embora o elétron pareça ser uma partícula pontual, são necessários quatro números quânticos para especificar seus estados quânticos. Os três primeiros existem porque são necessários para descrever a localização do elétron no espaço tridimensional, três coordenadas independentes. O quarto aparece por ser também necessário descrever a orientação espacial do seu spin, que pode ser “para cima” ou “para baixo” com relação a algum eixo dos z . Para uma partícula pontual clássica só se justificam três números quânticos. Mas o elétron não é uma partícula clássica (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 357, grifos do autor). (94)

Notemos que o SA (94) estabelece novos aspectos para o conceito de spin e para o próprio elétron, atribuindo-lhes um caráter não clássico. Estes aspectos, como sabemos, são características atualmente estabilizadas, tanto para o spin, quanto para o elétron, e portanto, este SA pode ser classificado na categoria *Literalização*.

Na sequência, os autores apresentarão ainda uma breve discussão entre as equações de Schrödinger e de Dirac, enfatizando uma vez mais o caráter não clássico do spin do elétron. Lembremos a equação de Schrödinger e suas aplicações são tratadas nos Capítulos 5, 6 e 7, anteriores ao Capítulo 8, onde o conceito de spin é apresentado. Por outro lado, a teoria de Dirac não tem qualquer aprofundamento neste manual, sendo mencionada ocasionalmente em diferentes pontos, conforme indicado em seu índice analítico.

Dirac mostrou que um elétron *deve* ter um momento angular intrínseco $s = 1/2$, um momento magnético com um fator g igual a 2 e todas as demais propriedades estabelecidas anteriormente. Foi uma bela vitória para a teoria relativística e colocou o spin do elétron dentro de uma sólida estrutura teórica, evidenciando que *o spin do elétron está intimamente ligado com a relatividade* (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 357, grifos do autor). (95)

Como pode ser observado, este SA estabelece que o conceito de spin está relacionado com aspectos relativísticos, sendo a teoria de Dirac, o caminho para a derivação formal das

propriedades do spin do elétron. Por apresentar elementos conceituais já estabilizados acerca do spin do elétron, este SA pode ser classificado na categoria *Literalização*.

Os autores retomam a discussão do caráter não clássico do spin do elétron ao final do tópico referente ao ESG:

Outro aspecto do caráter não clássico do spin pode ser visto ao se observar que o número quântico s , que significa a intensidade do momento angular de spin S , tem valor fixo $1/2$. Não podemos, portanto, levar S ao limite clássico fazendo $s \rightarrow \infty$ [...]. Sendo assim, é às vezes mais perigoso do que instrutivo imaginar o spin em termos de um modelo clássico do tipo uma pequena esfera girante (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 357). (96)

Como indicado, o SA (96) reforça o aspecto não clássico do spin, apresentando tal aspecto já em sua forma estabilizada. O referido SA pode, então, ser classificado na categoria *Literalização*.

Ressaltemos que neste manual, o Capítulo 8, destinado a introduzir o conceito de spin do elétron, o faz em termos não quânticos. De acordo com a narrativa de Tomonaga (1997), a consolidação do conceito de spin em termos não quânticos ocorre com o trabalho de L. H. Thomas. Eisberg e Resnick irão apresentar aspectos do trabalho de Thomas no tópico 8-4, onde a interação spin-órbita é discutida e formalizada. Nesta formalização os autores deduzem a equação de L. H. Thomas para os desdobramentos de energia para o átomo de um elétron:

$$\Delta E = \frac{g_s \mu_B}{2emc^2 \hbar} \frac{1}{r} \frac{dV(r)}{dr} \vec{S} \cdot \vec{L} \quad (4.40)$$

O SA representado pela equação (4.40) pode ser classificado na categoria *Bissociação quantitativa*, uma vez que corresponde ao desenvolvimento matemático da bissociação apontada pelos autores em linguagem não matemática – não apresentaremos a dedução aqui. A ideia central da bissociação qualitativa pode ser observada no SA destacado a seguir.

Esta equação foi deduzida pela primeira vez por Thomas em 1926, que usou, como nós, uma combinação do modelo de Bohr, mecânica quântica de Schrödinger e cinemática relativística (EISBERG; RESNICK, 1985, p. 360). (97)

No SA (97) os autores indicam em linguagem não matemática os elementos conceituais colocados em bissociação, a partir dos quais derivam a equação (4.40). Deste modo, este SA pode ser classificado na categoria *Bissociação qualitativa*. Notemos também que os autores datam o evento e nominam o cientista que derivou a respectiva bissociação quantitativa.

4.5.3 Resultados e considerações

Apresentamos no Quadro 7 o inventário dos SA que destacamos na seção anterior. Neste quadro, indicamos os nomes das categorias, os SA identificados em cada categoria, bem como a quantidade total de SA em cada categoria – optamos por deixar esta coluna em branco para as categorias em que nenhum SA foi identificado ao longo da análise realizada. Uma vez que trechos dos SA (85) e (93) foram classificados em diferentes categorias, no Quadro 7 estes SA aparecem repetidamente em mais de uma categoria.

Salientamos que embora os SA (80) e (81) correspondam a bissociações qualitativas, tais bissociações não produzem novidade conceitual diretamente relacionada com a ideia de spin do elétron. Elas foram destacadas na análise porque fazem parte do percurso didático proposto no referido manual, desempenhando, assim, uma função didática na estruturação do conceito de spin do elétron. Além disso, estes SA agregam elementos epistêmicos; por exemplo, eles estão diretamente relacionadas com as discussões em torno do ESG, proposto pelos autores. Esta consideração aplica-se igualmente às Figuras 9 e 10, uma vez que estas estão diretamente associadas aos SA em questão. Assim sendo, embora desempenhem um papel didático e epistêmico, optamos por não contabilizá-las no inventário, destacando-as com (*).

Uma vez que optamos por não fragmentar o SA (93), pois o mesmo consiste em uma citação da obra historiográfica de Jammer (1989), este SA figurou em mais de uma categoria analítica.

Notemos que neste manual, as bissociações qualitativa e quantitativa, ainda que não diretamente relacionadas ao conceito de spin do elétron, por vezes aparecem acompanhadas de imagens. Este aspecto foi destacado na categoria *Bissociação imagética*.

Embora não tenhamos encontrado, no capítulo analisado, nenhum SA da categoria da *Bissociação imagética* que estivesse diretamente relacionado ao conceito de spin do elétron, os autores apresentam a dedução da equação de L. H. Thomas, (4.33), no Apêndice J do referido manual. Nesta dedução, algumas imagens ilustrativas sobre a ideia da autorrotação do elétron – mais precisamente, sobre o sistema de referência considerado – são apresentadas, embora tenhamos optado por não apresentá-las aqui.

Conforme indicado no Quadro 7, podemos constatar que a maioria dos elementos que caracterizam a MEIC estão presentes no texto do manual analisado. Em relação as categorias analíticas relacionadas aos tipos de bissociação, identificamos 3 SA para o tipo *qualitativa* e 1

para o tipo *quantitativa*. Isto significa que foi empregada uma dedução formal na construção do conceito de spin e, adicionalmente, a ideia da autorrotação foi destacada qualitativamente em 3 outros momentos.

Quadro 7 - Inventário dos SAs identificados no Capítulo 8 do livro didático de Eisberg e Resnick (1985). Itens destacados com (*) não foram contabilizados.

Categorias Analíticas	Segmentos Analíticos	Quantidade
Bissociação qualitativa	85, 89, 97;	3
Bissociação quantitativa	Equação 4.40;	1
Bissociação imagética		
Experiência Disponível	80, 81, 82, 83, 84, 87, 88, 90, 91; Figura 9, Figura 10; Equação 4.33;	12
Critério de aceitação	93;	1
Critério de rejeição	93;	1
Contextualização		
Manifestação de aceitação	93;	1
Manifestação de rejeição	93;	1
Reconfiguração		
Literalização	79, 85, 86, 92, 93, 94, 95, 96.	7

Fonte: elaborado pelo autor. Em 03/07/2020.

Destacamos a predominância de duas categorias: a *Experiência disponível* e a *Literalização*. Uma vez que os manuais devem ter uma natureza preponderantemente didática, a presença expressiva de SA da categoria da *Experiência disponível* pode estar indicando o uso de uma linguagem de cunho argumentativo, pautada em justificativas teóricas e/ou empíricas. A presença expressiva de SA da categoria da *Literalização* indica que os aspectos conceituais (estabilizados!) relacionados ao spin do elétron estão sendo relativamente bem enfatizados.

Não foram identificados SA da categoria *Contextualização*, indicando portanto, que no referido manual os autores não mencionam elementos sócio culturais relacionados a construção do conceito de spin do elétron.

Em nossa análise, identificamos a presença de um SA para cada uma das categorias analíticas *Critério de aceitação/rejeição* e *Manifestação de aceitação/rejeição*. Estas categorias, juntamente com a categoria da *Experiência disponível*, contém traços históricos e/ou epistêmicos – estas categorias podem instrumentalizar meios de avaliar o conteúdo histórico e epistêmico contemplados pelo manual.

4.6 ANÁLISE DE MANUAIS: NÍVEL AVANÇADO

Nesta seção iremos analisar o manual *Quantum Mechanics Volume II: Angular Momentum, Spin and Approximation Methods*²⁴, dos autores C. Cohen-Tannoudji, B. Diu e F. Laloë. Qualificamos este manual como avançado, uma vez que fazem parte da bibliografia sugerida em programas de Pós-Graduação. Este manual apresenta os conteúdos com maior nível de profundidade e complexidade, relativamente aos manuais considerados nas seções anteriores.

4.6.1 Descrição do manual

O manual é composto por dois volumes e o tópico referente ao conceito de spin do elétron é tratado no Volume II, Capítulo IX, cuja estrutura apresentamos no Quadro 8.

Quadro 8 - Estrutura de tópicos referente ao Capítulo IX do livro didático de Cohen-Tannoudji, Diu e Laloë (2020a, p. 985).

Seção	Tópico
A	Introdução ao spin do elétron
A-1	Evidência experimental
A-2	Descrição quântica: postulados da teoria de Pauli
B	Propriedades especiais e de um momento angular $\frac{1}{2}$
C	Descrição não relativística de uma partícula de spin $\frac{1}{2}$
C-1	Observáveis e vetores de estado
C-2	Cálculo de probabilidade para uma medição física

Fonte: elaborado pelo autor, a partir de Cohen-Tannoudji, Diu e Laloë (2020a), em 20/04/2021.

Na análise deste manual iremos considerar todos os tópicos da seção A, uma vez que estes apresentam elementos diretamente relacionados à elaboração do conceito de spin do elétron.

Na seção B os autores estabelecem o tratamento formal para o spin, baseado no conceito de vetores e espaço de estado – aqui, para o spin – composto por uma base

²⁴ COHEN-TANNOUDJI, C.; DIU, B.; LALOË, F. **Quantum mechanics Volume II: angular momentum, spin and approximation methods**. 2. ed. [s.l.] Wiley-VCH, 2020a. v. II.

ortonormal. Os autores empregam a notação de *brackets* – notação de Dirac – e estabelecem as relações para os operadores de spin, S^2 , e sua componente, S_z , atuando sobre os auto estados de spin que compõem o espaço de estados. As *matrizes de Pauli* são apresentadas e algumas de suas propriedades são discutidas.

Na seção C são apresentados aspectos do desenvolvimento formal que incorpora o spin do elétron ao formalismo da mecânica quântica, obtendo uma representação para caracterizar o estado completo de um elétron. Levando em conta os graus de liberdade espaciais e de spin, os *spinors* com duas componentes são introduzidos para representação do elétron. Na sequência, são apresentados os operadores de spin, orbital e mistos, sua forma estrutural e o modo como atuam sobre os vetores de estado. Por fim, os autores apresentam alguns exemplos de como obter previsões acerca de várias medições que se pode realizar à respeito do elétron.

É importante destacar que o conceito de spin é inicialmente tratado no Capítulo IV do Volume I deste manual, mas nesse contexto, voltado para ilustração de postulados da mecânica quântica. Os autores salientem que apesar da providencial simplicidade matemática, o tema abarca a importância física de ilustrar um comportamento tipicamente quântico e experimentalmente verificável (COHEN-TANNOUJJI; DIU; LALOË, 2020b). Assim, consideramos que a abordagem do conceito de spin do elétron mais diretamente relacionada à nossa análise é feita na seção A do capítulo IX, volume 2.

4.6.2 Análise

Na introdução do Capítulo IX os autores restabelecem o quadro conceitual até então elaborado nos capítulos anteriores. Neste quadro, o elétron é uma partícula pontual com três graus de liberdade, descrito por uma função de onda que depende de três coordenadas espaciais. Além dos estudos realizados para vários sistemas físicos, os autores destacam as aplicações ao átomo de hidrogênio, cujo interesse reside no grande número de experimentos que podem ser realizados para tal sistema, sobretudo com boa precisão. Para os átomos multieletrônicos são empregados métodos de aproximação que reproduzem satisfatoriamente os resultados experimentais. Os autores apontam que a complexidade envolvida com a solução exata para obtenção da função de onda já torna-se inviável para o caso do Hélio – segundo elemento da tabela periódica –, em relação ao qual uma solução exata

completamente analítica é impossível (COHEN-TANNOUDJI; DIU; LALOË, 2020a).

Os autores prosseguem:

No entanto, quando os espectros atômicos são estudados em detalhe, certos fenômenos aparecem, como veremos, que não podem ser interpretados dentro da estrutura da teoria que desenvolvemos (COHEN-TANNOUDJI; DIU; LALOË, 2020a, p. 985). (98)

Como pode ser notado no SA (98), elementos do quadro empírico são mencionados para justificar a necessidade de modificações na teoria até então apresentada para descrever o elétron, o que nos leva a classificar o referido SA na categoria da *Experiência disponível*.

O quadro apresentado, contudo, já foi objeto de discussões em seções anteriores do manual, e desse modo, os autores afirmam que:

Este resultado não é surpreendente. É claro que é necessário completar a teoria precedente por um certo número de correções relativísticas: deve-se levar em consideração as modificações introduzidas pelos relativísticos cinemáticos (variação da massa com a velocidade, etc.) e os efeitos magnéticos que negligenciamos. Sabemos que essas correções são pequenas [...]: no entanto, elas existem e podem ser medidas (COHEN-TANNOUDJI; DIU; LALOË, 2020a, p. 985). (99)

Notemos o caráter assertivo no modo como os autores indicam a solução apontada para as dificuldades relatadas no SA (99), ou seja, as dificuldades encontradas na descrição dos espectros atômicos *não é surpreendente e é clara* a necessidade de completar o quadro teórico a partir de correções relativísticas para os *efeitos magnéticos negligenciados*. Como vemos, o SA (99) trás elementos assertivos sobre a problemática e a sua solução. Neste sentido, consideramos que ele pode ser classificado na categoria da *Literalização*.

A equação de Dirac é então mencionada como solução relativística completa, à qual implica em profundas modificações na descrição quântica do elétron, em comparação ao que se obtém a partir da equação de Schrödinger, fundamentalmente no que diz respeito a uma propriedade em particular, conforme indicado no trecho que segue, acompanhado de uma nota de rodapé, destacada por (*):

além das correções já apontadas em relação às suas variáveis de posição, uma nova característica do elétron aparece: seu *spin*. Num contexto mais geral, a estrutura do grupo de Lorentz (grupo de transformações espaço temporais relativísticas) revela que o *spin* é uma propriedade intrínseca de várias partículas, em pé de igualdade, por exemplo, com a sua massa de repouso* (COHEN-TANNOUDJI; DIU; LALOË, 2020a, p. 986, grifo do autor). (100)

*Isso não significa que o *spin* tenha uma origem puramente relativística: ele pode ser deduzido da estrutura do grupo de transformação não relativística (o grupo de Galileu) (COHEN-TANNOUDJI; DIU; LALOË, 2020a, p. 986, nota de rodapé).

O SA (100) indica que o elétron apresenta uma propriedade *intrínseca* – o *spin* – e à relação com o grupo de Lorentz para as transformações espaço temporais relativísticas, muito embora, como indicado pela nota de rodapé, o *spin* possa também ser deduzido classicamente. O SA fornece, portanto, algumas dos aspectos do conceito de *spin* já cristalizados, o que nos leva a classificar o referido SA na categoria da *Literalização*.

Vale ressaltar que, historicamente, a descrição do *spin* é originalmente decorrente de uma derivação não quântica e com aspectos cinemático relativísticos, obtida alguns anos antes da teoria de Dirac para o elétron (TOMONAGA, 1997). A este respeito, destacamos o seguinte trecho, acompanhado de uma nota de rodapé, indicada por (*):

[1] Historicamente, o *spin* do elétron foi descoberto experimentalmente antes da introdução da equação de Dirac. [2] Além disso, Pauli desenvolveu uma teoria que permitiu ao *spin* ser incorporado de modo simples à mecânica quântica não relativística* por meio da adição de vários postulados suplementares. [3] As previsões teóricas para os espectros atômicos são então obtidas e estão em excelente acordo com os resultados experimentais (COHEN-TANNOUDJI; DIU; LALOË, 2020a, p. 986). (101)

*A teoria de Pauli pode ser obtida como um caso limite da teoria de Dirac quando a velocidade do elétron é pequena em comparação com a da luz (COHEN-TANNOUDJI; DIU; LALOË, 2020a, p. 986).

Neste SA destacamos três trechos – indicamos pelos números entre colchetes – a serem categorizados em diferentes categorias analíticas. Dessa forma buscamos evitar a fragmentação das ideias. O trecho [1] do SA (101) apresenta um fragmento histórico contendo aspectos da descoberta – *experimental* – do *spin* do elétron, indicando, assim, sua relação com o quadro da *Experiência disponível*.

O trecho [2] indica que o *spin* do elétron foi *incorporado à mecânica quântica não relativística* por Pauli a partir da adição de vários postulados suplementares, ou seja, o trecho traz aspectos relacionados ao conceito de *spin* do elétron já cristalizados – a teoria de Pauli *permitiu...* –, ou seja, é fato consumado. O trecho [3], por sua vez, contém a justificativa para a referida inclusão e aceitação *ad hoc* do *spin*. Nestas condições, consideramos que o trecho [2] pode ser classificado na categoria da *Literalização* e trecho [3] como *Critério de aceitação*.

Após a introdução geral inicia-se a seção de introdução ao conceito de *spin* do elétron, cujo primeiro tópico, intitulado de “Evidência experimental”, é desenvolvido em um único parágrafo, o qual fragmentamos nos seguintes segmentos analíticos:

As demonstrações experimentais da existência do spin do elétron são numerosas e aparecem em vários fenômenos físicos importantes (COHEN-TANNOUDJI; DIU; LALOË, 2020a, p. 986). (102)

Por exemplo, as propriedades magnéticas de numerosas substâncias, particularmente de metais ferromagnéticos, só podem ser explicadas se o spin for levado em consideração (COHEN-TANNOUDJI; DIU; LALOË, 2020a, p. 986). (103)

Os SA acima evidenciam aspectos empíricos relacionados ao conceito de spin do elétron, mas em diferentes âmbitos. No SA (102) os autores afirmam que há evidências empíricas que *justificam a existência do spin*, evidenciando, assim, um *Critério de aceitação*. Alertamos aqui para uma sutileza. O quadro fenomenológico que antecede a proposição de uma MEIC é considerado como *Experiência disponível*, uma vez que instiga a proposição de novas ideias mediante cenários de crise; por outro lado, a proposição de uma MEIC pode reconfigurar o quadro fenomenológico, uma vez que conduz à novas perspectivas interpretativas, e até mesmo à novos ensaios experimentais, buscando justificar/comprovar uma nova ideia. Assim, o novo quadro fenomenológico – reconfigurado, reinterpretado, estendido –, é considerado como *Critério de aceitação* para a nova ideia.

Em relação ao SA (103), este relaciona-se com a aplicação do conceito de spin do elétron na descrição das *propriedades magnéticas* de determinadas substâncias. Aqui é importante enfatizar que os estudos relacionados ao magnetismo de materiais são anteriores ao século XX, e mesmo os estudos mais recentes anteriores à mecânica quântica eram essencialmente empíricos, sendo a teoria de Bohr para o átomo de hidrogênio um dos primeiros indícios de que a origem dos fenômenos magnéticos seria essencialmente quântica (REZENDE, 2000). Conforme indicado pelos autores no SA (103), há certas propriedades magnéticas que só podem ser explicadas a partir do conceito de spin do elétron e neste sentido, consideramos que o SA exprime uma *Reconfiguração* no quadro da experiência disponível.

Apesar de indicar a relação do conceito de spin com uma gama variada de fenômenos, as discussões no capítulo considerado serão limitadas a um conjunto de experimentos simples, segundo os autores, sendo estes: a estrutura fina das linhas espectrais do átomo de hidrogênio, o efeito Zeeman e o comportamento dos átomos de prata no experimento de Stern-Gerlach.

A estrutura fina das linhas espectrais é tratada na primeira subseção (A-1-a). Os autores indicam que a estrutura das subdivisões espectrais envolvidas somente podem ser observadas a partir de um aparato de grande resolução. A descrição é breve, sendo formada

por um parágrafo e uma nota e rodapé. Vale lembrar que o tratamento para os níveis de energia do átomo de hidrogênio foi considerado em um capítulo anterior, mas sem levar em conta os efeitos decorrentes do spin.

O efeito Zeeman anômalo é tratado na subseção seguinte (A-1-b). A discussão inicia-se considerando a aplicação de um campo magnético uniforme que leva à uma separação equidistante dos níveis de energia da estrutura fina. A separação observada é proporcional ao campo magnético aplicado, o que caracteriza o “efeito Zeeman”, cuja origem “pode ser facilmente compreendida” (COHEN-TANNOUDJI; DIU; LALOË, 2020a, p. 987 grifo dos autores) a partir das discussões realizadas em capítulos anteriores.

Os autores, então, resgatam as equações que relacionam o vetor campo magnético, \mathbf{M} , aplicado, com o vetor momento angular, \mathbf{L} , do elétron:

$$\mathbf{M} = \frac{\mu_B}{\hbar} \mathbf{L}, \quad (4.41)$$

onde μ_B é o *magneton de Bohr*:

$$\mu_B = \frac{q\hbar}{2m_e}. \quad (4.42)$$

Faz-se, então, a distinção entre os efeitos Zeeman, *normal* e *anômalo*. De acordo com os autores, os experimentos confirmam a teoria que deriva a separação das linhas a partir da interação entre o campo magnético externo e o momento angular do elétron, mas apenas para alguns casos – os quais caracterizam o efeito Zeeman normal. Em outros casos, para os quais a referida teoria não é capaz de fornecer uma descrição quantitativa para o fenômeno, configura-se o efeito Zeeman anômalo. A este respeito, os autores complementam:

A “anomalia” mais marcante aparece para átomos com número atômico ímpar (em particular, para o átomo de hidrogênio): seus níveis são divididos em um número par de subníveis Zeeman, enquanto, de acordo com a teoria, esse número deve ser sempre ímpar, sendo igual a $(2\ell + 1)$ com ℓ um número inteiro (COHEN-TANNOUDJI; DIU; LALOË, 2020a, p. 987, grifo dos autores). (104)

O SA (104) indica elementos empíricos relacionados às dificuldades enfrentadas pelos cientistas na descrição dos espectros atômicos, quando modificados pela presença do campo magnético externo. Estas dificuldades caracterizavam uma *anomalia*, que não era adequadamente prevista pela teoria vigente. Neste sentido, o referido SA está referenciando

aspectos da *Experiência disponível*, enquanto conhecimentos anteriormente trabalhados com estudantes de física.

O ESG é então abordado na última subseção do primeiro tópico (A-1-c). Os autores relatam a dificuldade de interpretar os resultados experimentais decorridos da separação do feixe de átomos de prata em apenas duas componentes. De acordo com o autores, esta divisão sugere valores semi inteiros para o momento angular, o que conflita diretamente com o fato de que, para uma partícula como o elétron, tal grandeza poderia assumir somente valores inteiros – lembremos que o ESG esteve inicialmente associado com a medição das possíveis orientações espaciais do momento angular –. A este respeito, os autores afirmam:

Mesmo em átomos com vários elétrons, cada um deles tem um momento angular orbital integral, [...] nessas condições, o momento angular orbital total do átomo é necessariamente integral. A existência de momentos angulares semi inteiros, portanto, não pode ser explicada sem hipóteses suplementares (COHEN-TANNOUDJI; DIU; LALOË, 2020a, p. 987). (105)

Neste SA os autores relacionam o ESG com a problemática do spin. Embora não seja historicamente consistente, ao menos em relação as primeiras realizações do experimento (WEINERT, 1995), esta relação cumpre um papel didático, buscando estabelecer um quadro empírico, o qual sugere valores semi inteiros para o número quântico de spin. Neste sentido, consideramos que o SA (105) fornece elementos para estabelecer aspectos da *Experiência disponível*, considerando o percurso didático proposto no referido manual.

Observemos que os autores não deixam de indicar o aspecto predominantemente qualitativo da relação entre o ESG e o spin do elétron. Em uma nota final da subseção relacionada ao referido experimento, os autores advertem que, diferentemente para os átomos de prata, os elétrons possuem carga elétrica e portanto não estariam isentos à força de Lorentz ($q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$), à qual suplantaria a interação magnética entre o campo e o momento magnético envolvidos.

Após estabelecer algumas das evidências empíricas para o spin do elétron na seção inicial, a segunda seção incia com exposição da hipótese de Uhlenbeck e Goudsmit sobre o spin do elétron:

[1] A fim de resolver as dificuldades precedentes, Uhlenbeck e Goudsmit (1925) propuseram a seguinte hipótese: o elétron “gira” [2] e isso lhe dá um momento angular intrínseco que é chamado de spin (COHEN-TANNOUDJI; DIU; LALOË, 2020a, p. 988, grifo dos autores). (106)

Para interpretar os resultados experimentais descritos [...], deve-se também assumir que um momento magnético M_S está associado a [um] momento angular S (COHEN-TANNOUDJI; DIU; LALOË, 2020a, p. 988). (107)

$$M_S = 2 \frac{\mu_B}{\hbar} S. \quad (4.43)$$

Observemos que o trecho [1] do SA (106) apresenta a hipótese do elétron girante – termo entre aspas! –. Vemos, portanto, a expressão da *Bissociação qualitativa* proposta por Uhlenbeck e Goudsmit. O trecho [2] do SA desempenha o papel de estabelecer um dos aspectos conceituais relacionados ao conceito de spin do elétron, pois indica que este apresenta um *momento angular intrínseco*. Desse modo, entendemos que além de evidenciar a bissociação da MEIC, o referido SA também apresenta elementos conceituais já cristalizados, ou seja, apresenta também aspectos da *Literalização* da MEIC em questão – o elétron girante.

No SA (107) podemos constatar que, à semelhança do que já fora colocado para o momento angular orbital, o mesmo se dá com o momento angular magnético, ou seja, ele está associado a algum momento magnético. Este aspecto é reforçado pela comparação entre as equações (4.43) e (4.41), em relação às quais os autores destacam que a razão giromagnética de spin é duas vezes maior que razão giromagnética orbital. Neste sentido, consideramos que estes SA – (107) e (4.43) – estabelecem, assertivamente, aspectos conceituais acerca do spin do elétron e deste modo, exprimem a *Literalização* de elementos conceituais decorrentes da bissociação do elétron girante.

Após estabelecerem a ideia imagética para o spin – elétron girante – os autores mencionam os desenvolvimentos de Pauli para incorporar o conceito de spin do elétron à mecânica quântica não relativística. Algumas das consequências deste trabalho são assim relatadas:

Aos postulados gerais da mecânica quântica que apresentamos [...] deve ser adicionado um certo número de postulados relativos ao spin (COHEN-TANNOUDJI; DIU; LALOË, 2020a, p. 988). (108)

O SA (108) exprime claramente uma *Reconfiguração* da base conceitual da mecânica quântica, decorrente da bissociação do elétron girante, ou seja, temos aqui um registro da reconfiguração da base empírica decorrente da MEIC, tal como indicado por Palma (2015).

A seguir são indicados vários aspectos formais relacionadas às grandezas *posição*, \mathbf{r} , e *momento*, \mathbf{p} , incluindo sua relação com os *observáveis* \mathbf{R} e \mathbf{P} , atuando no espaço de estados

relacionado às funções de onda. Assim, “todas as grandezas físicas são funções das variáveis fundamentais \mathbf{r} e \mathbf{p} , e as regras de quantização nos permitem associar à elas observáveis agindo [no] *espaço de estado orbital*” (COHEN-TANNOUDJI; DIU; LALOË, 2020a, p. 988, grifo dos autores). Ao espaço de estado orbital devem ser adicionadas as variáveis de spin, satisfazendo um conjunto de quatro postulados, três dos quais destacamos abaixo, conforme Cohen-Tannoudji, Diu e Laloë (2020a, p. 988-989):

- i. *O operador de spin \mathbf{S} é um momento angular.* Isso significa [...] que seus três componentes são observáveis que satisfazem as relações de comutação [4.44] e as duas fórmulas que são deduzidas por permutação cíclica dos índices x, y, z .
- ii. Os operadores de spin atuam em um novo espaço, o “*espaço de spin*” ε_s , onde \mathbf{S}^2 e S_z constituem um conjunto completo de observáveis que comutam. O espaço ε_s é, portanto, abrangido pelo conjunto de auto estados $|s, m\rangle$ comuns a \mathbf{S}^2 e S_z [dado por 4.45]. De acordo com a teoria geral do momento angular [...], sabemos que s deve ser um número inteiro ou semi-inteiro, e que m assume todos os valores incluídos entre $-s$ e $+s$ diferindo desses dois números por um inteiro (que pode ser zero). Uma determinada partícula é caracterizada por *um valor único de s* : diz-se que essa partícula tem um spin s . O espaço de estado de spin ε_s é, portanto, sempre de dimensão finita $(2s + 1)$, e todos os estados de spin são auto vetores de \mathbf{S}^2 com o mesmo auto valor $s(s + 1)\hbar^2$. (109)
- iii. [...]
- iv. *O elétron é uma partícula de spin $1/2$ ($s = 1/2$) e seu momento magnético intrínseco é dado pela fórmula [4.43]. Para o elétron, o espaço ε_s é, portanto, bidimensional.*

$$[S_x, S_y] = i\hbar S_z, \quad (4.44)$$

$$\mathbf{S}^2 |s, m\rangle = s(s + 1)\hbar^2 |s, m\rangle, \quad (4.45)$$

$$S_z |s, m\rangle = m\hbar |s, m\rangle.$$

Todos os SA, (109), (4.44) e (4.45), são assertivos com relação ao quadro conceitual relacionado ao spin do elétron. Eles exprimem, ainda que em parte, a *Literalização* da MEIC do elétron girante. Em parte, porquê os termos e o formalismo (representação, significados e resultados) contidos nos SA considerados já apresentam elementos de uma mecânica quântica formalmente estruturada, que de um ponto de vista histórico é posterior à proposição do elétron girante – já não se faz referência a uma entidade da realidade, mas a um operador. Independentemente desta representação, a exposição das ideias corresponde a um quadro conceitual estabilizado.

Por fim, destacamos um SA que encerra a seção que estamos analisando. Nele os autores apresentam dois comentários finais, onde abordam aspectos qualitativos do conceito

de spin:

[1] Para explicar a existência do spin, poderíamos imaginar que uma partícula como o elétron, em vez de ser um ponto, tem uma certa extensão espacial. Seria então a rotação do elétron em torno de seu eixo que daria origem a um momento angular intrínseco. [2] No entanto, é importante notar que, para descrever uma estrutura mais complexa do que um ponto material, seria necessário introduzir mais de três variáveis de posição. Se, por exemplo, o elétron se comportasse como um corpo sólido, seis variáveis seriam necessárias: três coordenadas para localizar um de seus pontos escolhidos de uma vez por todas, como seu centro de gravidade, e três ângulos para especificar sua orientação no espaço. [3] A teoria que estamos considerando aqui é radicalmente diferente. Ele continua a tratar o elétron como um ponto (sua posição é fixada por três coordenadas). O momento angular de rotação não é derivado de nenhuma variável de posição ou momento. Spin, portanto, não tem análogo clássico (COHEN-TANNOUJJI; DIU; LALOË, 2020a, p. 989). (110)

No trecho [1] do SA (110) a bissociação do elétron girante, tal como originalmente proposta, é evocada com o intuito de busca uma representação imagética para o conceito de spin, para rapidamente ser confrontada, no trecho [2], com argumentos que desqualificam a ideia de um elétron girante. Por fim, no trecho [3] do referido SA, o vínculo com a ideia do elétron girante é definitivamente rompida, estabelecendo, portanto, que o conceito de spin do elétron é uma propriedade quântica, por excelência.

Considerando estes aspectos, destacamos que os trechos destacadas, além de cumprirem papéis didáticos, podem ser classificados nas seguintes categorias analíticas: o trecho [1] do SA (110) pode ser classificado na categoria *Bissociação qualitativa*; o trecho [2], na categoria *Critério de rejeição*; o trecho [3] apresenta um aspecto conceitual do spin – o de ser uma grandeza essencialmente quântica – plenamente estabilizado que, embora não seja diretamente decorrente da proposição de Uhlenbeck e Goudsmit, é sem dúvida um aspecto conceitual cristalizado que tem raízes na bissociação do elétron girante, evidenciando, assim, elementos da *Literalização* do conceito de spin do elétron, já modificado.

4.6.3 Resultados e considerações

Apresentamos no Quadro 9 o inventário dos SA que destacamos na seção anterior. Neste quadro, indicamos os nomes das categorias, os SA identificados em cada categoria, bem como a quantidade total de SA em cada categoria – optamos por deixar esta coluna em branco para as categorias em que nenhum SA foi identificado ao longo da análise realizada. Uma vez que trechos dos SA (106) e (110) foram classificados em diferentes categorias, no Quadro 9

estes SA aparecem repetidamente em mais de uma categoria.

Nossa análise indicou que 6 das 10 categorias estão presentes ao longo do texto. As categorias de *Bissociação quantitativa e imagética*, *Contextualização*, *Manifestação de aceitação* e de *rejeição* não foram identificadas ao longo do texto analisado.

Conforme indicado no quadro abaixo, 2 dos 20 SA que destacamos exprimem a *Bissociação qualitativa* do elétron em rotação. Apesar desta associação, a imagem do elétron em rotação não é explicitamente vinculada à sua proposição original. Ao que parece, busca-se oferecer uma realização imagética do spin do elétron, muito embora seja enfatizado que este conceito não tem análogo clássico.

Não identificamos SA que pudessem indicar *Bissociações imagéticas* ou *Bissociações quantitativas*, relacionadas ao movimento de autorrotação do elétron. Uma vez que trata-se de um manual que figura como bibliografia de cursos de Pós-Graduação em Física, entendemos que o nível de complexidade envolvido não seria um obstáculo. Independentemente das razões pelas quais os autores tenham optado por esta ausência, tal escolha contribui para o apagamento dos traços da MEIC da qual derivou o conceito de spin do elétron. Por fim, consideramos que a ausência de SA das duas categorias de bissociações – quantitativa e imagética – é coerente com o compromisso dos autores em estabelecer de spin do elétron como um conceito quântico, sem análogo clássico. A ausência de SA relacionados à bissociação quantitativa é coerente com o fato de que o conceito de spin do elétron é apresentado sem deduções formais relacionadas com a autorrotação do elétron.

Identificamos 4 SA que exprimem aspectos da *Experiência disponível* e outros 3 SA que exprimem critérios de *aceitação* e/ou *rejeição*. A quantidade de SA relacionados na categoria da *Experiência disponível* é relativamente expressiva em relação às demais categorias, à exceção da categoria da *Literalização*.

Conforme indicado no Quadro 9, a categoria predominante é a da *Literalização*, na qual destacamos 10 SA ao longo da análise do referido manual. Este quantitativo indica que os aspectos conceituais referentes ao spin do elétron são apresentados e sua forma literalizada, ou seja, é apresentado como um conceito estabilizado.

Não identificamos SA da categoria *Contextualização*. Isto indica que no referido manual não há menção à elementos sócio culturais no percurso didático relacionado à construção do conceito de spin do elétron. Do mesmo modo, não foram identificados SA relacionados às categorias de *Manifestação de aceitação* e de *rejeição*.

Quadro 9 - Inventário dos SAs identificados no Capítulo IX do livro didático de Cohen-Tannoudji, Diu e Laloë (2020a).

Categorias Analíticas	Segmentos Analíticos	Quantidade
Bissociação qualitativa	106, 110;	2
Bissociação quantitativa		
Bissociação imagética		
Experiência Disponível	98, 101, 104, 105;	4
Critério de aceitação	102;	1
Critério de rejeição	101, 110;	2
Contextualização		
Manifestação de aceitação		
Manifestação de rejeição		
Reconfiguração	103;	1
Literalização	99, 100, 101, 106, 107, 109, 110; Equações 4.43, 4.44, 4.45.	10

Fonte: elaborado pelo autor. Em 02/03/2021.

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta seção buscaremos enfatizar alguns aspectos gerais da análise que julgamos pertinentes ao nossos objetivos. Reafirmamos que não estamos comprometidos em comparar os manuais analisados, tampouco qualificar ou julgar a adequação dos mesmos quanto ao papel didático que podem desempenhar.

Para enfatizar os elementos da análise que são de nosso interesse apresentamos no Quadro 10 o quantitativo dos SA destacados em cada manual em cada uma das categorias analíticas consideradas. Optamos por deixar em branco aquelas categorias para as quais nenhum SA foi encontrado.

Como pode ser observado no Quadro 10, a categoria da *Literalização* é predominante nos três manuais analisados. De acordo com Palma (2015) toda ME exitosa tende ocultar seu caráter metafórico, sobretudo quando a ideia que ela inaugura passa a ser incorporada ao conjunto de conhecimentos de um campo científico.

Considerando as metáforas científicas no interior de uma comunidade científica específica, como é o caso das MEIC que estamos propondo, e também que os manuais

cumprem funções formativas, instrucionais e disciplinares (FLECK, 2010; KUHN, 1970), a predominância do quantitativo da categoria *Literalização* nos manuais parece refletir o fato de que os novos conhecimentos, oriundos de ME exitosas, uma vez validados e devidamente significados por uma dada comunidade científica, devam figurar nos manuais.

Quadro 10 - Comparativo entre os manuais analisados.

Categorias Analíticas	Halliday e Resnick (introdutório)	Eisberg e Resnick (intermediário)	Cohen-Tannoudji, Diu e Laloë (avançado)
Bissociação qualitativa	2	3	2
Bissociação quantitativa		1	
Bissociação imagética	1		
Experiência Disponível	5	12	4
Critério de aceitação		1	1
Critério de rejeição		1	2
Contextualização			
Manifestação de aceitação		1	
Manifestação de rejeição		1	
Reconfiguração	1		1
Literalização	15	7	10

Fonte: elaborado pelo autor. Em 06/07/2021.

Por outro lado, a ausência ou pouca presença de SA nas demais categorias analíticas relacionadas aos demais elementos constituintes do processo da MEIC reflete, em alguma medida, o papel predominantemente utilitário aos manuais, como mencionado por Tomonaga (1997).

Destacamos também a presença de elementos relacionados à *Bissociação qualitativa* do elétron girante nos três manuais analisados. A tentativa de conferir uma interpretação pictórica em termos clássicos para o conceito de spin do elétron é um aspecto histórico e desempenhou importante papel na elaboração do referido conceito. Em um dos manuais analisados, a imagem do elétron em rotação parece cumprir um papel unicamente didático, isto é, a *Bissociação imagética* foi identificada, contudo seu papel histórico não é mencionado. Ao contrário, os textos didáticos analisados exprimem explícita e enfaticamente que não há análogo clássico ao spin do elétron.

Tal como verificado para a categoria da *Bissociação qualitativa*, SA relacionados com a categoria da *Experiência disponível* também foram identificados nos três manuais analisados, de modo significativo em relação às demais categorias analíticas.

Nenhum dos manuais apresentou SA relacionados às categorias da *Bissociação imagética* ou *Contextualização*, e em relação às categorias *Manifestação de aceitação/rejeição*, em apenas um dos manuais analisados foi destacado a ocorrência de um SA em cada uma destas duas categorias. A categoria da *Contextualização* está relacionada com aspectos históricos extracientíficos – sociais, culturais, políticos, econômicos, etc. – e a ausência de SA nos manuais analisados indica que os elementos extracientíficos não são contemplados pela proposta didática dos manuais considerados. As categorias de *Manifestação de aceitação/rejeição* também refletem aspectos históricos, uma vez que relacionam-se aos posicionamentos de cientistas daquele período histórico em favor ou contra a bissociação do elétron girante. Tais manifestações de aceitação/rejeição constituem importantes indicativos de aspectos epistêmicos e filosóficos relacionados à atividade científica. Destacamos ainda a presença relativamente expressiva de SA nas categorias da *Experiência disponível* e *Critério de aceitação/rejeição* nos manuais analisados. Estas categorias também são importantes indicativos de aspectos epistêmicos e filosóficos, muito embora sua presença, desarticulada à manifestações de aceitação/rejeição ou historicamente descontextualizadas, pouco contribuem para uma abordagem histórica da ciência (MARTINS, 1993).

Por fim, destacamos dois aspectos que julgamos importantes para os nossos objetivos. Em primeiro lugar, conforme indicamos anteriormente, a análise dos manuais tem caráter complementar à análise historiográfica da elaboração do conceito de spin do elétron. Neste sentido, a predominância do quantitativo da categoria da *Literalização* nos manuais é para nós um importante fator de corroboração da hipótese da MEIC, reforçando assim o que já fora demonstrado no capítulo em que apresentamos a análise dos documentos historiográficos e históricos relacionados a elaboração do conceito de spin do elétron. Em segundo lugar, o papel dos manuais na formação docente e no ensino de ciências pode ser considerada sob a perspectiva das metáforas epistêmicas, possibilitando assim diálogos com outras linhas de pesquisa relativamente bem desenvolvidas, como é o caso do uso de analogias e metáforas no ensino de ciências, a abordagem da filosofia da ciência, da história da ciência e da natureza da ciência no ensino de ciências e na formação docente.

Na sequência, apresentaremos algumas considerações que julgamos importantes, sobre como, agora sim, a noção da MEIC pode dialogar com outras linhas de investigação, de modo a contribuir com as pesquisas relacionadas ao ensino de ciências e com a formação docente.

Referências

BACHELARD, G. O novo espírito científico. In: BACHELARD, G. (Ed.). . **Bachelard. Os pensadores**. São Paulo: Abril Cultural, 1978. p. 89–179.

COHEN-TANNOUDJI, C.; DIU, B.; LALOË, F. **Quantum mechanics Volume II: angular momentum, spin and approximation methods**. 2. ed. [s.l.] Wiley-VCH, 2020a. v. II

COHEN-TANNOUDJI, C.; DIU, B.; LALOË, F. **Quantum mechanics Volume I: basics concepts, tools and applications**. 2. ed. [s.l.] Wiley-VCH, 2020b. v. I

DUNCAN, A.; JANSSEN, M. On the verge of Umdeutung in Minnesota: Van Vleck and the correspondence principle. Part one. **Archive for History of Exact Sciences**, v. 61, n. 6, p. 553–624, 9 out. 2007.

EISBERG, R. M.; RESNICK, R. **Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. 23. ed. São Paulo: Campus, 1985.

FLECK, L. **Gênese e desenvolvimento de um fato científico**. Belo Horizonte: Fabrefactum editora, 2010.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos da Física: óptica e física moderna**. 8. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2009. v. 4

HESLOT, A. Classical mechanics and the electron spin. **American Journal of Physics**, v. 51, n. 12, p. 1096–1102, dez. 1983.

IRZIK, G.; NOLA, R. New Directions for Nature of Science Research. In: MATTHEWS, M. R. (Ed.). . **International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. p. 999–1021.

JAMMER, M. **The conceptual development of quantum mechanics**. Maryland: Tomash Publishers, 1989. v. 12

KOESTLER, 2016. Artigo, Koestler, 2016, [metafora]-Uma contração de 15 músculos faciais-web.pdf. 2016.

KRAGH, H. The genesis of dirac's relativistic theory of electrons. **Archive for History of Exact Sciences**, v. 24, n. 1, p. 31–67, 1981.

KRIPKA, R. M. L.; SCHELLER, M.; BONOTTO, D. DE L. Pesquisa documental: considerações sobre conceitos e características na pesquisa qualitativa. **Atas CIAIQ2015**, v. 2, p. 243–247, 2015.

KUHN, T. S. **A estrutura das revoluções científicas**. 5. ed. São Paulo: Perspectiva, 1970.

KUHN, T. S. Metaphor in science. In: ORTONY, A. (Ed.). . **Metaphor and thought**. 2. ed. Cambridge [England]; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993. p. 532–550.

KUHN, T. S. A tensão essencial: tradição e inovação na pesquisa científica. In: **A tensão essencial: estudos selecionados sobre tradição e mudança científica**. São Paulo: Editora UNESP, 2009. p. 241–255.

LAMB, W. E.; RETHERFORD, R. C. Fine Structure of the Hydrogen Atom by a Microwave Method. **Physical Review**, v. 72, n. 3, p. 241–243, 1 ago. 1947.

MARTINS, L. A.-C. P. História da ciência: objetos, métodos e problemas. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 11, n. 2, p. 305–317, ago. 2005.

MARTINS, R. DE A. Abordagens, métodos e historiografia da história da ciência. In: MARIA, Â. (Ed.). **O tempo e o cotidiano na história**. Série Ideias. São Paulo: Fundação para o Desenvolvimento da Educação, 1993. p. 73–78.

MARTINS, R. DE A. Ciência versus historiografia: os diferentes níveis discursivos nas obras sobre história da ciência. In: GOLDFARB, A. M. A.; BELTRAN, M. H. R. (Eds.). **Escrevendo a história da ciência: tendências, propostas e discussões historiográficas**. 1. ed. São Paulo: EDUC/Livraria da Física/Fapesp, 2004. p. 115–147.

PALMA, H. El desarrollo de las ciencias a través de las metáforas: un programa de investigación en estudios sobre la ciencia. **Revista CTS**, v. 20, n. 6, p. 45–65, dez. 2005.

PALMA, H. **Metáfora e modelos científicos: a linguagem no ensino de ciências**. São Paulo: Edições SM, 2009.

PALMA, H. **Ciencia y metáforas: crítica de una razón incestuosa**. Buenos Aires: Prometeu Libros, 2015.

PAULI, W. Über den Einfluß der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Elektronenmasse auf den Zeemaneffekt. **Zeitschrift für Physik**, v. 31, n. 1, p. 373–385, fev. 1925.

PULACZEWSKA, H. Metaphors, particles, terminology: from objectivist to cognitivist approach in physics and linguistics. In: WITCZAK-PLISIECKA, I. (Ed.). **Pragmatic Perspectives on Language and Linguistics: Pragmatics of Semantically-Restricted Domains**. New Castle: Cambridge Scholars Publishing, 2010. v. Iip. 377–391.

REZENDE, S. M. Magnetismo na Terra Brasilis. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 3, p. 6, 2000.

TOMONAGA, S. **The story of spin**. Chicago: The University of Chicago Press, 1997.

TURBAYNE, C. M. **El mito de la metáfora**. [s.l.] Fondo del Cultura Económica, 1974.

WEINERT, F. Wrong theory - right experiment: the significance of the Stern-Gerlach experiments. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 26, n. 1, p. 75–86, abr. 1995.

ZEEMAN, P. The effect of magnetisation on the nature of light emitted by a substance. **Nature**, v. 55, n. 1424, p. 347–347, 11 fev. 1897.

5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A NOÇÃO DE METÁFORA EPISTÊMICA INTRACIENTÍFICA NA EDUCAÇÃO CIENTÍFICA

Resumo:

Apresentamos potenciais contribuições da noção de metáfora epistêmica intracientífica na educação científica. Consideramos três temáticas: 1) analogias e metáforas no ensino de ciências; 2) natureza da ciência na educação científica; 3) ensino de mecânica quântica. As áreas de pesquisa consideradas não esgotam as possíveis relações de nossas investigações com o ensino de ciências; tratam-se de conexões que julgamos mais evidentes. As áreas foram tratadas individualmente. Para cada uma apresentamos um breve estudo bibliográfico, procurando ressaltar trabalhos seminais, cânones, investigações que nortearam os avanços da área e as problemáticas de maior relevância para nossos objetivos. Após esta breve exposição, procuramos argumentar em favor das potenciais contribuições de nossos estudos, pontuando as problemáticas anteriormente estabelecidas. Uma vez que nossos objetivos consistem em evidenciar possíveis contribuições, nossa exposição não constitui uma investigação criteriosa, isto é, não estamos oferecendo resultados de pesquisa. No entanto, consideramos que a argumentação apresentada é suficiente para mostrar a pertinência da noção de metáfora epistêmica como instrumento pedagógico e analítico. A dimensão dos impactos para o ensino de ciências – em particular para a física – e para a formação docente necessitam de investigação, e neste sentido, nossa exposição irá argumentar em favor destas investigações.

Palavras-chave: metáfora, analogia, natureza da ciência, ensino de mecânica quântica, história e filosofia da ciência.

Abstract:

We present potential contributions of the notion of intrascientific epistemic metaphor in science education. We consider three themes: 1) analogies and metaphors in science teaching; 2) nature of science in science education; 3) teaching quantum mechanics. The research areas considered do not exhaust the possible relationships of our investigations with the teaching of science; these are connections that we think are most evident. The areas were treated individually. For each one, we present a brief bibliographical study, seeking to highlight seminal works, canons, investigations that guided the advances in the area and the most

relevant issues for our objectives. After this brief exposition, we tried to argue in favor of the potential contributions of our studies, pointing out the problems previously established. Since our objectives consist of highlighting possible contributions, our presentation does not constitute a thorough investigation, that is, we are not offering research results. However, we consider that the argument presented is sufficient to show the pertinence of the notion of epistemic metaphor as a pedagogical and analytical tool. The dimension of the impacts for science teaching – particularly for physics – and for teacher training need investigation, and in this sense, our presentation will argue in favor of these investigations.

Keywords: metaphor, analogy, nature of science, teaching quantum mechanics, history and philosophy of science.

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo faremos alguns apontamentos acerca de possíveis implicações para a educação científica, decorrentes da noção de metáfora epistêmica intracientífica – MEIC –. Como iremos argumentar, a noção de MEIC mostra-se potencialmente relevante para algumas áreas de pesquisa, dentre as quais iremos destacar: o uso didático de analogias e metáforas (AM) no ensino de ciências, a abordagem de aspectos da natureza da ciência na educação científica e a abordagem de conceitos de Física Moderna no ensino básico de ciências e no ensino especializado de física.

De um modo geral, estamos considerando que nossos estudos podem dialogar com o ensino de ciências (EC), este compreendendo as áreas da Física, Química, Biologia e Geociências, ou seja, estamos considerando que em nosso trabalho o termo intracientífico aplica-se às ciências básicas mencionadas. Esta afirmação, contudo, nos serve apenas para demarcar os limites de uma primeira aproximação. Neste sentido, tal consideração não corresponde a uma restrição, mas sim a uma delimitação da pesquisa.

Assumindo que a noção de MEIC pode, como recurso metodológico, trazer contribuições não apenas para o ensino *de* ciências, mas também para um ensino *sobre* as ciências, a proposição da referida noção traz novas perspectivas, as quais iremos abordar adiante. Primeiramente indicaremos, de um modo relativamente geral, a maneira como a noção de MEIC pode desempenhar um papel didático no EC.

Considerando a metodologia que empregamos anteriormente para apontar a plausibilidade da *hipótese* da MEIC, iremos tomá-la agora como um conceito, ou seja, a *noção* de MEIC. Os aspectos conceituais de tal noção manifestam-se a partir da análise histórica de episódios científicos – em nosso caso, a elaboração do conceito de spin do elétron (CSE) –, pautada por documentos históricos e materiais historiográficos, destacando-se nestes materiais um conjunto de *segmentos analíticos* que evidenciam as características da noção de MEIC, classificados de acordo com o seguinte conjunto de *categorias analíticas*: processos de *bissociação* (1) *qualitativa* e (2) *quantitativa*; a (3) *experiência disponível*; os *critérios de* (4) *aceitação* e (5) *rejeição*; as *manifestações de* (6) *aceitação* e (7) *rejeição*; a (8) *contextualização* sócio histórica do período considerado; a (9) *reconfiguração* do quadro teórico empírico; a (10) *literalização* da MEIC.

O produto extraído da análise genealógica de uma MEIC consiste em uma narrativa histórica ampla, rica em aspectos conceituais contextualizados e em aspectos da natureza da ciência, com contribuições de diferentes autores da História das Ciências. O parâmetro que regula e indica o satisfatório nível da pluralidade autoral é a quantidade de segmentos analíticos evidenciados e o modo mais ou menos homogêneo como estes segmentos analíticos se distribuem entre as diferentes categorias analíticas adotadas na análise.

Importa destacar que tal metodologia foi desenvolvida e aplicada objetivando verificar a plausibilidade da *hipótese* da MEIC. Apesar da necessidade de possíveis adequações consideramos que seja possível, partindo da análise genealógica de uma MEIC, elaborar o que denominaremos de *narrativa histórica de metáfora epistêmica* (NHME). Uma NHME encapsula, portanto, a história formativa de uma MEIC, ou seja, contém as características da noção de MEIC, tendo como pano de fundo um episódio da história da ciência, referente a produção de um dado conhecimento científico. Estamos empregando o termo *narrativa* numa perspectiva semelhante àquela adotada por Norris *et al.* (2005, p. 538), isto é, “atos verbais consistindo em alguém dizendo a alguém que algo aconteceu”, onde pode-se encontrar referências a um narrador, a um leitor e a eventos passados, possuindo características como estrutura, agentes (atores) e uma finalidade ou propósito (NORRIS *et al.*, 2005).

A depender do contexto de ensino em que uma NHME venha ser empregada, pode-se conferir a uma NHME maior ou menor complexidade, profundidade, abrangência, etc. Em suma, o uso didático de uma NHME pode implicar em um processo de didatização da mesma.

Defendemos, portanto, que a NHME é potencialmente útil para o EC, mais especificamente em abordagens didáticas que levem em conta o uso de metáforas e/ou analogias, história da ciência, a natureza da ciência e, considerando o estudo de caso que

desenvolvemos, o ensino de conceitos de física moderna. Em uma NHME o conceito científico implicado na MEIC apresenta-se de modo contextualizado no campo de conhecimento ao qual pertence²⁵, e a narrativa histórica incorpora naturalmente aspectos históricos, filosóficos e sociológicos da ciência. Vejamos.

Os segmentos analíticos presentes na NHME associados às categorias de *bissociação quantitativa* e *qualitativa* possibilitam evidenciar o uso de metáforas ou analogias no processo de produção de conhecimento científico, bem como os aspectos criativos e subjetivos²⁶ dessa produção, uma vez que processos de bissociação constituem o marco inaugural das metáforas epistêmicas, e conforme expusemos, trata-se de uma ação individual deflagrada em nível psicológico (KOESTLER, 2014). Por outro lado, a proposição de diferentes processos bissociativos exprime tanto o caráter tentativo, quanto o caráter subjetivo da atividade científica.

A categoria da *experiência disponível* possibilita destacar a importância da evidência empírica²⁷ como guia para elaboração de metáforas e/ou analogias, bem como a pertinência e a influência dos conhecimentos teóricos para a (re)interpretação²⁸ dos experimentos, ilustrando que no âmbito científico, as metáforas e/ou analogias estão fortemente comprometidas com aspectos teóricos e/ou empíricos do conhecimento científico já estabelecido.

Os *critérios de aceitação/rejeição* e as *manifestações de aceitação/rejeição* evidenciam o emprego de regras, valores e compromissos assumidos²⁹, tanto pela comunidade científica, quanto individualmente pelos cientistas (PALMA, 2015), o que permite explicitar aspectos sociológicos da atividade científica, bem como os dispositivos de controle da

25 Em nosso estudo de caso, o CSE é amplamente associado aos dados empíricos e é derivado a partir de diferentes processos bissociativos; em cada um dos processos, diferentes argumentos qualitativos e quantitativos são apresentados para sua aceitação/rejeição; o CSE é também relacionado com o princípio da exclusão de Pauli (cf. NHME, cap. 2).

26 Em nosso estudo de caso, diferentes bissociações foram sugeridas pelos cientistas para descrever os problemas dos multipletos, algumas envolvendo elementos de matrizes conceituais de tipos unicamente não relativísticos ou combinando elementos não relativísticos com relativísticos (cf. NHME, cap. 2).

27 Em nosso estudo de caso, vários critérios de rejeição foram pautados pelos dados empíricos. É o caso, por exemplo, do motivo de aceitação da equação empírica para os níveis de separação das linhas espectrais, proposta por Landé a partir da equação de Sommerfeld para o átomo de hidrogênio – foi considerada plausível por reproduzir adequadamente os dados empíricos; do mesmo modo, a tentativa de Landé em derivar a equação empírica por meio de uma bissociação quantitativa fracassou, dentre outros aspectos, em reproduzir os dados experimentais, sendo este um dos motivos de rejeição desta ideia (cf. NHME, cap. 2).

28 A correção de Thomaz ao mecanismo proposto por Uhlenbeck e Goudsmit – elétron girante – foi capaz de convencer até mesmo Pauli, devido a correta descrição dos dados empíricos (cf. NHME, cap. 2). O CSE, uma vez estabelecido, permitiu, também, a reinterpretção do experimento de Stern-Gerlach (WEINERT, 1995).

29 Lorentz se opôs a ideia do elétron girante por ela violar aspectos conceituais da teoria clássica do elétron – é um critério coletivo –. Um dos argumentos de Pauli inicialmente empregado para rejeitar a ideia do elétron girante era o fato de estar associada a uma descrição não relativística – um critério não necessariamente coletivo – (cf. NHME, cap. 2).

comunidade para estabelecer as relações de comparação entre os domínios envolvidos no processo metafórico.

A categoria da *contextualização* sócio histórica permite evidenciar a influência de certas tensões externas sobre o empreendimento científico; são aspectos políticos, sociais e culturais³⁰, os quais exercem influências sobre a atividade científica, no que diz respeito a proposição, interpretação, aceitação e rejeição de novas ideias carreadas por processos bissociativos (PALMA, 2015).

As categorias que refletem a *reconfiguração* e a *literalização* de uma MEIC são meios de evidenciar o caráter provisório e dinâmico da produção do conhecimento científico³¹, bem como o papel das teorias para a interpretação das evidências empíricas.

Além dos aspectos já destacados, salientamos que o estudo de caso que desenvolvemos leva em conta conceitos de física moderna, contextualizados em âmbito teórico, empírico e histórico. O ensino destes conceitos na educação básica tem sido objeto de investigações e a literatura da área tem apontado algumas dificuldades. Assim, estaremos considerando o uso didático da noção de MEIC também nesta área de pesquisa.

Embora não seja nossa intenção produzir articulações mais profundas, algumas análises preliminares do panorama das pesquisas produzidas nos campos de estudo que estamos levando em conta, indicam potenciais contribuições do conceito metafórico que estamos propondo. A seguir, apresentaremos uma breve exposição de algumas das problemáticas apontadas pela literatura em determinados campos de pesquisa relacionados ao EC, buscando apontar as potenciais contribuições da noção de MEIC, estabelecendo, deste modo, possibilidades para futuras investigações.

Reconhecendo a importância dos estudos já realizados, bem como a pertinência das proposições didáticas e metodológicas que derivam destes estudos, chamamos a atenção para algumas possibilidades promissoras que decorrem do uso da noção da MEIC no contexto didático, ou seja, para o EC e para a formação de professores, as quais abordaremos nas seções seguintes.

30 Através do depoimento de Dirac, evidenciamos a influência do ambiente sócio político pós primeira guerra mundial, como fator de influência para o uso da Teoria da Relatividade de Einstein. Também destacamos o posicionamento de Sommerfeld em defender esta mesma teoria contra as críticas da ala direita da física alemã, sendo este um posicionamento motivado por critérios políticos (cf. NHME, cap. 2).

31 A literalização (estabilização) do CSE reconfigurou o quadro da experiência disponível de diferentes modos: possibilitou a reinterpretação da estrutura fina do átomo de hidrogênio, permitiu uma explicação para o quantitativo de elétrons nos diferentes níveis de energia por meio do princípio da exclusão de Pauli, o que também implicou em adequações na teoria de Schrödinger (cf. NHME, cap. 2). A reinterpretação do experimento de Stern-Gerlach (WEINERT, 1995) é também uma evidência da reconfiguração do quadro teórico empírico decorrente de uma ME exitosa.

5.2 ANALOGIAS E METÁFORAS NO ENSINO DE CIÊNCIAS

Nesta seção empregaremos o acrônimo AM para referenciar analogias e metáforas, indiscriminadamente. Por vezes, quando for necessário ou pertinente direcionar uma discussão ou apontamento, mais diretamente relacionado às analogias ou às metáforas, ou para manter certa relação de coerência com a terminologia adota por autores a quem estejamos pontualmente nos referindo, estes termos serão explicitamente empregados. Do contrário, o uso do acrônimo AM indica que o tema em foco aplica-se aos dois casos, ou a um dos dois sem prejuízo ou comprometimento ao outro.

As investigações sobre o papel de AM no ensino das ciências naturais (ECN) vêm sendo realizadas desde meados da década de 1970 (DUIT, 1991). Nas décadas de 1980 e 1990 diferentes estudos possibilitaram a elaboração de um quadro teórico e empírico, especializado e abrangente, acerca do uso didático das AM no EC (DAGHER, 1995; DUARTE, 2005; MOZZER; JUSTI, 2015) – Dagher (1995) destaca o volume especial do periódico *Journal of Research of Science Teaching*³², integralmente dedicado à temática do papel da analogia na ciência e no EC. O papel das analogias no EC apoia-se fundamentalmente em dados empíricos e em contribuições de diferentes áreas do campo multidisciplinar denominado por Ciências Cognitivas, dentre as quais a Psicologia, Filosofia da Ciência, Linguística, Neurociência e Inteligência Artificial (DUARTE, 2005).

No cenário brasileiro, os estudos que abordam o uso didático de AM no ECN intensificaram-se a partir do início dos anos 2000 e tem sido fortemente guiado pela literatura internacional, como pode ser constatado a partir das publicações em periódicos dedicadas ao tema (MOZZER; JUSTI, 2015), bem como sua presença marcante em eventos da área da área de ECN (SANTOS; SANTANA, 2018).

As investigações sobre o uso de AM em situações de ensino mostram que este campo de pesquisa tem produzido numerosos e significativos resultados, e alguns estudos buscam sintetizar as contribuições oriundas das principais publicações sobre o tema (CRUZ-HASTEINREITER, 2015; DUARTE, 2005; DUIT, 1991; MOZZER; JUSTI, 2015; SANTOS; SANTANA, 2018).

A produção científica nacional acerca do uso didático de AM tem sido intensa e diversificada. As publicações investigam, por exemplo, o uso de AM em livros didáticos de

32 Volume 30, Edição 10, dezembro de 1993, em <<https://onlinelibrary.wiley.com/toc/10982736/1993/30/10>>. Acesso em: 28/07/2021.

ciências da natureza (AMARAL; SOARES; MELO, 2020; KOPP; ALMEIDA, 2019; SOUZA; ROCHA, 2017), o uso didático das AM na educação básica (BOZELLI; NARDI, 2012; RAMOS; MENDONÇA; MOZZER, 2019) e na formação docente (ALMEIDA, 2019; ALMEIDA; DINIZ, 2020; OLIVEIRA; MOZZER, 2017). Também podem ser encontrados na literatura, investigações acerca das AM no contexto da divulgação científica em textos jornalísticos (KINOUCI, 2012) e em obras paradidáticas (SANTANA, 2019; SOUZA; NEVES, 2016).

De um modo geral, as AM são comumente assumidas como formas de comparação entre dois domínios. No contexto do ECN, uma analogia é considerada como uma comparação explícita entre dois domínios, enquanto em uma metáfora a comparação entre os domínios ocorre implicitamente (DUIT, 1991).

A literatura apresenta amplo conjunto de justificativas para o emprego de AM no EC (DUARTE, 2005; DUIT, 1991; MOZZER; JUSTI, 2015). Fundamentalmente, a analogia cumpre um importante papel como estratégia instrucional, uma vez que o pensamento análogo constitui um dos *conhecimentos prévios* da teoria de Ausubel “que pode ser usado para facilitar a aquisição, organização e recuperação de novos conhecimentos” (REIGELUTH, 1983, p. 198). A possibilidade de compreensão de algo desconhecido (em muitos casos, um domínio abstrato) a partir de um domínio conhecido (geralmente concreto) têm sido apontada como uma das grandes potencialidades do uso didático das analogias (CURTIS; REIGELUTH, 1984). Além deste aspecto em particular, outras potencialidades são destacadas, tais como a organização da percepção, o estímulo à criatividade e a tomada de decisões, o estímulo aos processos de mudança conceitual, possibilidade de evidenciar e identificar conhecimentos prévios ou concepções alternativas (bem como e a possibilidade de modificá-las), evidenciar conhecimentos apreendidos e a compreensão dos estudantes acerca de conceitos científicos e da própria atividade científica (DUARTE, 2005; DUIT, 1991; OLIVEIRA; MOZZER, 2017; TREAGUST; HARRISON; VENVILLE, 1996).

Além das potencialidades cognitivas, pesquisas tem apontado que o uso das analogias também podem ser empregadas com potencialidades atitudinais (MOZZER; JUSTI, 2015), promovendo habilidades como a argumentação, a negociação, estruturação e revisão de ideias, o trabalho coletivo, colaborativo e reflexivo (ALMEIDA; DINIZ, 2020; RAMOS; MENDONÇA; MOZZER, 2019) operando, assim, como importantes recursos metodológicos para o ensino investigativo (OLIVA *et al.*, 2001) e para a aprendizagem significativa (REIGELUTH, 1983).

Contudo, as potencialidades relacionadas ao uso das analogias somente podem ser

adequadamente exploradas quando as relações analógicas são acessíveis – explícitas, compreensíveis – aos estudantes e além disso, quando o domínio análogo apresentar, preferencialmente, várias relações de similaridades com o domínio a ser aprendido (REIGELUTH, 1983).

Estudos realizados nos anos de 1990 já apontavam várias das limitações e inadequações no uso de AM em situações de ensino, conforme levantado por Bozelli e Nardi (2006). De acordo com o levantamento de Mozzer e Justi (2015), investigações realizadas na primeira década dos anos 2000 ainda evidenciavam limitações no uso didático de AM pelos professores, dentre as quais: o repertório limitado e por vezes inadequado de analogias; o emprego de analogias como objeto didático *per se*, não necessitando de maiores cuidados, e conseqüentemente, não sendo necessário maiores esclarecimentos aos estudantes; o emprego de domínios pouco familiares e por vezes mais complexos do que aquele que se pretende ensinar; a confusão entre analogias e outras formas de comparação e a falta de cuidado em ressaltar as limitações envolvidas na comparação dos dois domínios envolvidos.

De um modo geral, parte das dificuldades e limitações relacionadas ao uso de AM nas situações de ensino são decorrentes de seu *uso espontâneo* (DUIT, 1991) – improvisado, não sistematizado ou não consciente. Assim, nas situações de ensino em que AM estejam envolvidas, suas potencialidades tornam-se limitadas ou inexploradas (GLYNN, 1994). É necessário, portanto, promover o uso crítico das analogias (OLIVA, 2008). Além disso, no uso didático das analogias é importante que as relações de comparação sejam descritas antes e durante o processo de ensino de um novo conhecimento (REIGELUTH, 1983).

A teorização e a sistematização do uso didático de analogias fundamenta-se a partir de diferentes proposições conceituais – teorias, modelos, metodologias, estratégias, abordagens –, dentre as quais destacam-se: Structure Mapping Theory (SMT), por D. Gentner; Analogical Mapping by Constraint Satisfaction, por K. Holyoak e P. Thagard; Bridging Analogies, por D. Brown e J. Clement; Analogy Teaching Model, por J. Dupin e S. Joshua; Teaching-With-Analogy (TWA), por S. Glynn; General Model of Analogy Teaching, por H. Zeitoun; Focus-Action-Reflexion, por D. Treagust e colaboradores; Metodologia de Ensino com Analogia (MECA) – baseada na TWA – por R. Nagem, D. Carvalhes e J. Dias; Modelo Didático Analógico, por L. Galagovisky e A. Adúriz-Bravo; Modelo de Ensino Assistido por Analogias, por A. Cachapuz (CLEMENT, 1993; DUIT, 1991; GALAGOVISK; ADÚRIZ-BRAVO, 2001; GENTNER, 1983; HOLYOAK; THAGARD, 1989; NAGEM;

CARVALHAES; DIAS, 2001; TREAGUST, 1993)³³. Tais proposições teóricas, além de orientarem as investigações em relação ao uso didático de analogias, desempenham também importante papel em subsidiar pesquisas as empíricas (FERRY; PAULA, 2017b; OLIVEIRA; MOZZER, 2017; RAMOS; MENDONÇA; MOZZER, 2019; TREAGUST; HARRISON; VENVILLE, 1996).

Com relação a sistematização do uso de analogias no EC destaca-se, também, o sistema de Curtis e Reigeluth (1984), proposto para categorizar as analogias identificadas em livros didáticos. As analogias encontradas são distribuídas em categorias (e subcategorias): *relação analógica* (estrutural, funcional, estrutural funcional); *formato de apresentação* (verbal, pictórico verbal); *condição* (concreto/concreto, abstrato/abstrato, concreto/abstrato, abstrato/concreto); *posição* (início da instrução, embutida na instrução, após a instrução); *nível de enriquecimento* (simples, enriquecida, estendida). Os autores incluem, com base no sistema de classificação sugerido, um conjunto de instruções para orientar o uso didático de analogias³⁴. Em relação ao formato de apresentação do tipo pictórico verbal, Glynn (1994) ressalta que o uso de gráficos ou mapas imagéticos contribuem para ativar processos cognitivos, como a formação de imagens mentais, permitindo aos estudantes formarem melhores representações das analogias.

A distinção entre analogia e outras formas de comparação é também apontado como um aspecto relevante para a compreensão e análise das analogias empregadas em situações de ensino; várias pesquisas têm dirigido esforços para esta problemática (MOZZER; JUSTI, 2015) – por exemplo: Oliva (2008) diferencia a analogia de outros recursos (modelos, exemplos e experimentos mentais) e indica a necessidade de pesquisadores e professores serem capazes de distingui-los; Ferry e Paula (2017a) empregaram uma metodologia baseada na STM, a qual possibilitou não apenas distinguir analogias de outras formas de comparação, como também explorar com profundidade as relações estruturais carreadas por uma dada analogia; Oliveira e Mozzer (2017) empregaram a STM para analisar as concepções de um grupo de licenciandos, e os resultados obtidos evidenciaram algumas limitações dos futuros docentes em relação ao papel das analogias, sua definição e distinção em relação a outras formas de comparação.

33 Algumas dos instrumentos indicados relacionam-se de modo complementar, como é o caso da TWA e FAR; outros instrumentos são proposições sem relações ou implicações para as demais; há também concepções relativamente concorrentes, como é o caso da proposição de mapeamento analógico, por K. Holyoak & P. Thagard (HOLYOAK; THAGARD, 1997; THAGARD, 1992), que apresenta críticas à SMT de D. Gentner (cf. GENTNER, 1989);

34 Para uma descrição detalhada do sistema de classificação e das instruções dele derivadas, ver (CURTIS; REIGELUTH, 1984).

Dificuldades decorrentes da não observância ou desconsideração das relações de correspondência entre os domínios envolvidos na comparação analógica também vem sendo apontados (AMARAL; SOARES; MELO, 2020; KOPP; ALMEIDA, 2019; RAMOS; MENDONÇA; MOZZER, 2019). Nestes casos, o aprendizado dos estudantes é comprometido, uma vez que tal negligência pode levar à assimilações distorcidas, incompletas, ou mesmo evocar concepções alternativas, desvirtuando as intenções e objetivos de ensino do professor.

Tão importante quanto considerar as relações de correspondência é evidenciar os aspectos não relacionáveis e as limitações envolvidas na analogia, pois estas ações contribuem para evitar as excessivas generalizações (REIGELUTH, 1983). Além disso, estabelecer os limites de uma analogia contribui para a percepção crítica dos estudantes no processo interpretativo das analogias, e nestes casos, até mesmo uma analogia não necessariamente adequada pode cumprir algum papel quando devidamente explorada (OLIVA, 2008).

Em relação aos domínios analógicos empregados, alerta-se para a necessidade de considerar sua pertinência e adequação em relação à condição cognitiva dos estudantes (CURTIS; REIGELUTH, 1984), sob pena de que não compreendam as relações analógicas entre os domínios envolvidos ou transfiram para o domínio que intencionam conhecer, todas as características do domínio análogo (TREAGUST; HARRISON; VENNVILLE, 1998).

Thagard (1992) propõem que a criação de analogias pelos próprios estudantes é uma estratégia útil. Apesar do conhecimento limitado que os estudantes possam apresentar acerca do domínio análogo, conduzindo assim à analogias inadequadas, o autor afirma que discutir os limites e equívocos destas analogias é útil para ampliar o conhecimento dos estudantes e conduzir a formulação de analogias melhores.

O uso espontâneo das AM está diretamente relacionado à ausência de conhecimento ou imperícia do professor em relação ao emprego destes recursos linguísticos. Treagust, Harrison e Venville (1998) salientam que mesmo havendo conhecimento técnico sobre as analogias, o planejamento pedagógico é também indispensável, sobretudo para evitar as situações de improviso durante a atividade instrucional. Deve-se ressaltar que a falta de preparo e/ou de planejamento pedagógico pode impactar as situações de ensino mesmo que o professor não intencione ou não seja requisitado à empregar AM, afinal, estas permeiam os livros didáticos, e assim, poderão fazer-se presentes nas situações de ensino.

Em relação ao preparo formal de professores para o uso didático de AM, alguns autores (ALMEIDA, 2019; ALMEIDA; DINIZ, 2020; BOZELLI; NARDI, 2012; OLIVEIRA; MOZZER, 2017) têm apontado a necessidade de considerar a abordagem teórica

e prática acerca destes recursos linguísticos na formação docente inicial e sugerem, inclusive, possíveis alterações curriculares nos cursos de licenciatura em ciências naturais, de modo a sistematizar a instrumentação destes conhecimentos.

O potencial criativo das analogias é também explorado por alguns autores, a partir dos quais podem-se estabelecer conexões com o ensino de ciências. Tratam-se de episódios emblemáticos da história das ciências, como o coração bomba de Harvey (DELIZOICOV; CARNEIRO; DELIZOICOV, 2004), o fluido eletromagnético de Maxwell (NERSESSIAN, 1992) e o gás de fótons de Einstein (GINGRAS, 2015).

5.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A NOÇÃO DE METÁFORA EPISTÊMICA INTRACIENTÍFICA E O USO DIDÁTICO DE ANALOGIAS E METÁFORAS

Observa-se na literatura especializada que em relação ao uso didático das AM no EC, frequentemente procura-se estabelecer uma distinção conceitual entre as analogias e as metáforas e, de um modo geral, no âmbito destas pesquisas as metáforas são relativamente pouco consideradas como objeto de investigação ou mesmo como recurso didático para o EC.

Na perspectiva da noção que estamos propondo, tal distinção é irrelevante, uma vez que a MEIC é um processo mais amplo, e embora compartilhe algumas das características das metáforas literárias, possui características próprias (PALMA, 2015), como já indicado anteriormente. Assim, para melhor conduzir as discussões que iremos apresentar nesta seção, primeiramente buscaremos localizar a noção da MEIC em relação ao emprego dos termos *analogia* e *metáfora* e aos seus significados, costumeiramente encontrados na literatura relacionada ao uso didático destas figuras de linguagem.

Consideremos a definição aristotélica de metáfora: “A metáfora consiste no transportar para uma coisa o nome de outra, ou do gênero para a espécie, ou da espécie para o gênero, ou da espécie de uma para a espécie de outra, *ou por analogia*” (ARISTÓTELES, 1994, p. 134, grifo nosso). Como vemos, a despeito de outros modos de proferir uma metáfora, a analogia é uma das possíveis formas de fazê-lo. Para Aristóteles, a diferença entre uma analogia e os demais modos de empreender uma metáfora está na forma como a comparação é feita: se relacionada à natureza das palavras empregadas (algumas palavras são espécies de algum gênero); ou, se relacionada à posição em que as palavras são dispostas em uma frase

(formando, então, uma relação de analogia)³⁵. Em suma, de acordo com Aristóteles, uma analogia é um tipo de metáfora.

Em relação ao EC a literatura considera a analogia como uma forma de comparação que permite uma margem mais estreita para as interpretações possíveis, enquanto que em uma metáfora as possibilidades de interpretação são mais amplas; diz-se que nas analogias as relações de comparação são relativamente mais explícitas do que nas metáforas ou, que em uma analogia os domínios comparados são relativamente mais próximos do que em uma metáfora (DUIT, 1991). O uso de AM permite, dentre outras coisas, evidenciar a existência de certas relações entre os dois domínios conceituais empregados na comparação. Tais domínios são distintos e assim permanecem.

Não obstante, a partir do século XX os estudos sobre as metáforas ampliaram-se consideravelmente (CAVALCANTE; FERREIRA; GUALDA, 2016) e, de acordo com Black (1955), as metáforas criam relações entre dois domínios, isto é, fazem surgir relações onde antes não havia nenhuma, ou seja, metáforas possuem um caráter fundacional. Sob esta perspectiva, as relações de similaridade estabelecidas a partir de uma metáfora inauguram um novo olhar sobre os domínios envolvidos na expressão metafórica (BLACK, 1955). No que diz respeito a noção de MEIC, o ato inaugural – a bissociação sincrônica – corresponde a uma síntese de ideias que conduz a uma nova ideia (KOESTLER, 2014). Não trata-se, portanto, de mera comparação.

Como quer que seja, em relação ao conceito de MEIC que estamos propondo, a distinção entre *analogia* e *metáfora* é irrelevante, afinal, as interpretações possíveis para as comparações que se buscam estabelecer, bem como os domínios associados a partir de uma MEIC exitosa, têm seus limites e significados fortemente demarcados pela comunidade científica pertinente, ou seja, as interpretações possíveis já foram delimitadas. Resta enfatizar que a noção de MEIC corresponde a um processo metafórico com historicidade própria, o qual incorpora elementos metafóricos e/ou analógicos, indistintamente; uma MEIC exitosa inaugura um novo conjunto de relações entre dois domínios, fornecendo assim uma nova perspectiva.

Primeiramente é importante destacar a concepção – consensual – de que, nas situações de ensino, AM são empregadas como figuras de linguagem. De fato, no uso pedagógico o seus empregos têm sido marcados pela concepção de que AM são formas de comparação – implícita no caso das metáforas e explícita no caso das analogias. Neste sentido, as metáforas seriam menos indicadas para fins didáticos, uma vez que a não observância da estrutura das

35 Uma descrição detalhada pode ser encontrada na obra de Aristóteles (ARISTÓTELES, 1994).

relações entre dois domínios comparados tem sido apontada como fator limitante para o bom uso das comparações analógicas e/ou metafóricas – em suma, o uso de metáforas é potencialmente danoso no que diz respeito à observância das relações de comparação entre dois domínios, dando margem a interpretações menos adequadas em relação a aqueles pretendidos pelos objetivos de ensino.

Com relação à noção de MEIC, salientamos que este conceito não corresponde a uma figura de linguagem (PALMA, 2015). O processo metafórico que estamos considerando evolui temporalmente, a partir de um ato inaugural (bissociação sincrônica), no qual as relações entre diferentes domínios são metodicamente estabelecidas. Falamos aqui de um processo metafórico que possui em sua historicidade própria um conjunto de demarcações conceituais, epistêmicas, sociais e culturais. O êxito de uma MEIC somente pode ser atingido mediante a validação do conhecimento novo que ela inaugura; neste processo de estabilização conceitual (literalização diacrônica), uma MEIC torna-se exitosa somente porque passou pelo julgamento da comunidade científica, no interior da qual ela circulou, foi criticada, significada, ressignificada e então assimilada. Em suma, as relações estabelecidas entre os domínios envolvidos no processo metafórico atendem aos requisitos da comunidade científica que a produziu. Além disso, a noção de MEIC corresponde a um fenômeno metafórico subjacente ao processo de produção do conhecimento científico, com funções cognoscitivas e epistêmicas específicas (PALMA, 2015).

Levando em conta a exposição sobre a noção de MEIC e sobre a NHME apresentada na introdução deste capítulo, bem como o panorama que apresentamos na seção anterior, iremos agora pontuar potenciais contribuições para o uso de analogias e metáforas no EC.

Estudos indicam que a percepção de docentes em relação ao papel constitutivo das AM na produção de conhecimentos científicos não é adequada (OLIVEIRA; MOZZER, 2017), e a literatura também aponta a importância da história da ciência para evidenciar este papel, a partir de analogias presentes no trabalho de diferentes cientistas (OLIVA, 2008). Neste sentido, uma NHME mostra-se potencialmente útil, pois ela própria é o relato histórico de um episódio científico autêntico; ela constitui a história evolutiva de uma MEIC, da qual originou-se um conhecimento científico novo; uma NHME é, portanto, potencialmente útil para evidenciar o papel constitutivo de AM na produção de conhecimentos científicos.

O processo formativo de uma MEIC exitosa, encapsulado em uma NHME, permite explicitar não somente as relações entre os domínios envolvidos na bissociação, como também os critérios e valores – conceituais, sociais, culturais, epistêmicos – empregados em sua validação. O que estamos afirmando é que uma NHME possibilita evidenciar

naturalmente as relações de comparação – estas, sujeitas a critérios e valores para sua aceitação – que levaram à produção de um conhecimento novo a partir da proposição de uma MEIC. As relações de comparação, enfatizamos, são metodicamente demarcadas pela comunidade científica. Conforme indicamos anteriormente, a literatura da área ressalta a importância de que as relações comparativas entre os domínios envolvidos sejam explícitas e compreensíveis aos estudantes (REIGELUTH, 1983). Em relação a este aspecto, nas situações de ensino, uma NHME é potencialmente útil para explicitar e discutir as relações entre os domínios comparados, além do que, uma NHME permite evidenciar quais foram os limites interpretativos, estabelecidos pela comunidade científica, para os domínios associados em uma MEIC.

Em algumas situações de ensino, o uso de AM pode envolver campos conceituais alheios ao âmbito científico, em especial, nas situações que os estudantes são estimulados à elaborar suas próprias analogias (RAMOS; MENDONÇA; MOZZER, 2019). Por outro lado, o uso de domínios pouco familiares ou relativamente complexos pode implicar em AM inadequadas para o EC, ocasionando dificuldades aos estudantes (MOZZER; JUSTI, 2015). Ressaltamos que a noção de MEIC é subjacente à produção de conhecimento científico, isto é, implica em um processo metafórico que envolve campos conceituais originalmente científicos, além do que, em toda MEIC exitosa os campos conceituais são explicitamente considerados e as relações entre eles são minuciosamente estabelecidas. Lembremos que toda MEIC exitosa passou pelos critérios de validação da comunidade científica onde foi proposta – são critérios lógicos, formais, metodológicos, empíricos, epistêmicos, que vigoram no interior de todo campo de conhecimento científico, reconhecido como tal (PALMA, 2015). Desse modo, uma NHME é potencialmente útil para amenizar as dificuldades quanto à clareza e entendimento dos domínios conceituais envolvidos e quanto a adequação/inadequação das AM envolvidas no processo de MEIC.

O uso espontâneo (improvisado, não sistematizado ou não consciente) é uma das causas das dificuldades e limitações para o uso didático de AM no EC (DUIT, 1991; GLYNN, 1994). Mesmo quando professores estão conscientes e intencionam o uso de AM, seu emprego como recurso didático *per se* é igualmente problemático (MOZZER; JUSTI, 2015). É necessário, portanto, que os professores disponham de conhecimentos técnicos e pedagógicos sobre AM (TREAGUST; HARRISON; VENVILLE, 1998). Consideramos que a noção de MEIC é potencialmente útil como ferramenta analítica, da qual professores em formação podem se beneficiar; o exercício de produção de NHME é potencialmente útil para aquisição de conhecimentos técnicos e pedagógicos acerca do uso de AM, enriquecendo sua

percepção sobre as limitações e potencialidades didáticas destes recursos, além de ampliar seu repertório de analogias.

Nesta seção buscamos apontar algumas possíveis contribuições da noção de MEIC no contexto do uso de AM no EC. Diante do exposto, defendemos que a noção de MEIC e a NHME são potencialmente úteis nas situações de ensino básico ou especializado de ciências (instrumento didática) e na formação de professores (instrumento metodológico).

Apesar do aspecto relativamente especulativo de nossa argumentação, julgamos ter identificado potenciais contribuições que justificam um futuro esforço de pesquisa. Reconhecemos, portanto, a necessidade de uma maior imersão na literatura da área para melhor articular a noção de MEIC com as pesquisas sobre AM.

5.4 HISTÓRIA, FILOSOFIA E NATUREZA DA CIÊNCIA NA EDUCAÇÃO CIENTÍFICA

Nesta seção iremos apresentar algumas considerações sobre as potenciais contribuições que a noção de MEIC pode agregar à Educação Científica e à Didática das Ciências. Estamos cientes das dificuldades presentes nos campos de investigação que iremos considerar e salientamos que não é nosso objetivo, ao menos neste momento, analisar criticamente tais problemáticas, cujo esforço estaria além dos objetivos assumidos neste trabalho. Isto, contudo, não nos impede de apontar alguns caminhos e possibilidades para pesquisas futuras. Para tanto, iremos contextualizar a discussão a partir uma breve exposição acerca de como da temática da natureza da ciência constituiu-se enquanto campo de pesquisa, algumas das dificuldades encontradas, avanços conquistados e seu estado atual. Frente a este quadro buscaremos apontar algumas potenciais contribuições da noção de MEIC para o referido campo de pesquisa.

O termo “natureza da ciência” será empregado para nos referirmos a aspectos da atividade científica, que podem ser mais específicos de uma dada especialidade das ciências básicas ou então características do empreendimento científico como um todo, não necessariamente fazendo referência à definições estritas ou concepções presentes na literatura da área. Por outro lado, o termo Natureza da Ciência (NdC), que pode ser encontrado na literatura de modo relativamente diversificado, será por nós empregado nas situações em que desejarmos fazer referência à natureza da ciência enquanto objeto de estudo definido, delimitado, enfim, constituído por um dado campo de investigação.

De acordo com Driver *et al.* (1996), se a partir da ciência escolar existir a pretensão de promover uma compreensão popular adequada do empreendimento científico, enquanto instituição social, interagente com a cultura mais ampla, seus objetivos, propósitos, métodos, seu conhecimento e sua relevância para a sociedade e para ampliar a participação cidadã nas democracias modernas, é necessário também desenvolver a própria compreensão que os estudantes têm acerca da ciência, seus limites e seu alcance:

Este é o conhecimento sobre a ciência em oposição ao conhecimento científico (conhecimento sobre o mundo natural). Uma vez que um aspecto do conhecimento sobre ciência é *conhecimento sobre conhecimento científico*, é importante tornar essa distinção o mais clara possível. O conhecimento científico é expresso em uma linguagem que se refere aos objetos, fenômenos e eventos do *mundo real*. (Isso não significa, é claro, afirmar que a linguagem simplesmente *descreve* o mundo real ou corresponde a ele precisamente.) Falar sobre conhecimento científico é diferente; é expresso em uma linguagem que se refere aos *objetos* da própria ciência: teoria, observação, lei e assim por diante. Quando falamos sobre o conhecimento científico, estamos usando uma metalinguagem: uma linguagem sobre uma linguagem. (DRIVER *et al.*, 1996, p. 3, grifos do autor).

A compreensão pública da ciência, segundo estes autores, abrange três aspectos: a compreensão de aspectos relacionados ao conteúdo científico; a compreensão acerca a abordagem investigativa da ciência; a compreensão da ciência como empreendimento social.

Segundo Driver *et al.* (1996), a compreensão acerca da abordagem investigativa leva em conta um importante aspecto epistemológico, a saber, que a dependência da investigação empírica em relação ao quadro teórico e conceitual em questão. O aspecto epistemológico relaciona-se também com uma maior clareza dos limites do que a ciência pode e não pode realizar, e também uma melhor distinção entre as atividades científica e não científica. A compreensão da ciência como empreendimento social, por sua vez, permite explicitar os mecanismos de comunicação para receber, verificar e validar os conhecimentos científicos, bem como reconhecer o papel de compromissos e de valores sociais e culturais, assumidos pelos cientistas, e suas possíveis influências nas decisões e interpretações científicas. Por fim, a compreensão do conteúdo científico não é obtida diretamente pela contemplação da natureza. Ao contrário, conhecimento científico é requerido para que se possa descrever, à luz da ciência, que um objeto do mundo real seja tratado, por exemplo, como um “ponto material”, sujeito à uma “força” e em decorrência disso descreva determinada “trajetória”. Assim, quando estudantes aprendem sobre as Leis de Newton, estão sendo levados a aceitar

ideias científicas (abstrações) e suas imitações quanto aos tipos de fenômenos e as condições as quais podem ser aplicadas (em outras palavras, que a ciência trabalha com idealizações). Neste sentido, importa que sejam instruídos também a respeito da natureza do conteúdo científico.

A compreensão inequívoca do que é a atividade científica permanece um problema em aberto (ALLCHIN, 2017). A importância em considerar a estrutura conceitual da ciência como parte da educação científica vem sendo enfatizada ao longo de todo o século XX (ABD-EL-KHALICK; LEDERMAN, 2000b; IRZIK; NOLA, 2014) e apesar da ausência de uma definição acerca do que seja a atividade científica, isto não impediu a formação de consenso na didática das ciências acerca da importância e consequente necessidade de considerar aspectos da natureza da ciência como um dos objetivos centrais da educação científica (ABD-EL-KHALICK; LEDERMAN, 2000a). Assim, documentos de reforma curricular da educação científica de vários países têm enfatizado a importância não apenas dos conteúdos da ciência, mas também sobre as ciências, considerando estes, elementos indispensáveis para compreender a ciência como empreendimento humano e suas implicações para a democracia e exercício pleno da cidadania (IRZIK; NOLA, 2014).

De acordo com Duschol (2008), as modificações curriculares referentes ao EC podem ser divididas em dois grandes períodos. O primeiro ocorre entre 1950 e 1970, motivado pelo lançamento do primeiro satélite artificial, Sputnik, que mobilizou grandes esforços da Nacional Science Foudation – NFS – (nos Estados Unidos) e da Nuffield Foundation (no Reino Unido). Um dos objetivos principais destas propostas curriculares era promover um EC que levasse os estudantes a pensar como os cientistas e aumentar o interesse pelas carreiras científicas. A partir dos anos 1980 novas reformas curriculares ocorridas nos países mencionados passam a considerar a importância da educação científica da população, voltada para a formação de indivíduos capazes de participar das agendas democrática e econômica das sociedades de ciências, tecnologia, engenharia e matemática (CTEM), cada vez mais focadas no mercado global. A partir dos anos 1990 um novo enfoque para a educação científica passa a ser defendido, no qual o EC deveria ser pautado por uma perspectiva cultural:

A perspectiva do imperativo cultural vê disciplinas [CTEM], conhecimento e práticas como tecidos na própria estrutura de nossas nações e sociedades. O que o imperativo cultural fornece que os imperativos democráticos e econômicos não fazem é o reconhecimento de importantes dimensões sociais e epistêmicas que estão embutidas no crescimento, avaliação, representação e comunicação de conhecimentos e práticas [CTEM]. Novas perspectivas e entendimentos nas ciências

da aprendizagem sobre ambientes de aprendizagem e aprendizagem, e nos estudos científicos sobre conhecer e investigar, destacam a importância do ensino e aprendizagem da educação em ciências harmonizando objetivos de aprendizagem conceituais, epistemológicos e sociais. (DUSCHL, 2008, p. 268).

Mais recentemente, as razões que sustentam objetivos educacionais que levem em conta a natureza da ciência incluem a formação de sujeitos mais críticos e integrados ao contexto em que vivem (MOURA, 2014), a necessidade de uma melhor compreensão das múltiplas dimensões da ciência – epistêmica, histórica, sociológica, ética e política – (MOURA; GUERRA, 2016; VITAL; GUERRA, 2014), a ampliação da compreensão do empreendimento científico e das profundas implicações sócio políticas dos produtos tecnológicos da ciência, a necessidade de dirimir posicionamentos ilógicos e não racionais que geralmente têm em sua base uma má compreensão da ciência (MCCOMAS; ALMAZROA; CLOUGH, 1998) e ter uma percepção humanizada da ciência para compreendê-la como parte de um herança cultural (DRIVER *et al.*, 1996).

De acordo com estes objetivos, um sujeito cientificamente alfabetizado necessita, além dos conceitos científicos, conhecer a natureza da ciência, o que inclui conhecer aspectos da natureza da atividade científica e também da natureza do conhecimento científico (BEJARANO; ADURIZ-BRAVO; BONFIM, 2019).

Vários estudos realizados nas últimas décadas do século XX apontavam a necessidade de uma revisão dos objetivos da educação científica para torná-la mais significativa, indicando a necessidade de abordagens mais explícitas sobre a construção do conhecimento científico, passando a considerar não apenas os produtos da ciência, mas também os seus processos (VITAL; GUERRA, 2014).

Estabelecer um significado para o construto denominado por Natureza da Ciência – NdC – não é tarefa fácil, sobretudo porque este incorpora aspectos de vários campos de conhecimento (ARTHURY; TERRAZZAN, 2018), como a História da Ciência (HdC), a Filosofia da Ciência (FdC) e a Sociologia da Ciência (SdC), além de aspectos cognitivos, sociais, éticos, culturais, políticos e econômicos (IRZIK; NOLA, 2014; MOURA, 2014).

Para Irzik e Nola (2014), sob a denominação de NdC busca-se descrever a ciência como um sistema cognitivo – um corpo de conhecimento teórico e empírico organizado e logicamente estruturado – e como prática comunitária – cooperativa e competitiva, com valores, normas éticas e sociais³⁶ e um sistema próprio de validação e divulgação de

³⁶ De acordo com Irzik e Nola (2014), um dos primeiros estudos sobre as normas institucionais de comunidades científicas foi realizado pelo sociólogo da ciência, Robert Merton, nos anos 1930, a partir de

conhecimento – buscando também contemplar interações de regulação e interdependência entre o empreendimento científico e a sociedade (MCCOMAS, 2008).

De acordo com esta perspectiva, o EC deve, portanto, levar em conta o contexto em que os conhecimentos científicos foram desenvolvidos, com destaque para as evidências que os fundamentam e também para a dinâmica aceitação/rejeição, com base em dados empíricos, mas também pautada por outros valores (MENDONÇA, 2020). Neste sentido, a conceitualização do que seria a natureza da ciência sujeita-se, em parte, aos desenvolvimentos que ocorrem nos campos de conhecimento que integram o construto NdC, ou seja, os desenvolvimentos na história, filosofia e sociologia da ciência refletem inevitavelmente na forma de conceber a natureza da ciência (ABD-EL-KHALICK; LEDERMAN, 2000b); conseqüentemente, “as concepções de [NdC] são provisórias e dinâmicas” (LEDERMAN *et al.*, 2002, p. 499). Além destes aspectos, certa pluralidade de expressões, que fazem referência à natureza da ciência, pode ser identificada na literatura e em documentos oficiais, e trazem consigo, implicitamente, as percepções epistêmicas de seus propositores, isto é, “há na denominação um ressaltado da forma de se aproximar epistemologicamente de certa característica da ciência que é eleita como principal, a despeito de outras” (BEJARANO; ADURIZ-BRAVO; BONFIM, 2019, p. 973), tendendo a desequilibrar os pesos dados aos aspectos experimental, conceitual e social da atividade científica.

No âmbito da educação científica o uso do construto NdC têm sido defendido mediante argumentos que ressaltam diferentes papéis: utilitário – para a compreensão de objetos e processos tecnológicos da vida cotidiana –; democrático – participação cidadã na tomada de decisões sócio científicas –; cultural – para a compreensão da ciência como cultura humana –; moral – identificação de compromissos morais assumidos pelas comunidades científicas, reconhecidos como valores importantes pela sociedade –; aprendizagem de ciências – como facilitador da aprendizagem de conhecimentos científicos – (DRIVER *et al.*, 1996; LEDERMAN, 2007; MCCOMAS; ALMAZROA; CLOUGH, 1998). Em suma, argumenta-se que para promover uma melhor compreensão pública da ciência, é necessário que aspectos da natureza da ciência sejam contemplados pela educação científica.

Apesar da reconhecida importância da NdC para os objetivos da educação científica, vários estudos apontam limitações de compreensão acerca da natureza da atividade científica, presentes na percepção de cientistas, professores e estudantes de ciências em todos os níveis de ensino (ABD-EL-KHALICK; LEDERMAN, 2000b; HARRES, 1999; LEDERMAN,

um estudo empírico baseado em entrevistas com diversos cientistas, publicado em 1973 na obra *The Sociology of Science: Theoretical and Empirical Investigations*.

1992; MARTINS, 2015; PÉREZ *et al.*, 2001). Assim, além dos papéis atribuídos à NdC no cumprimento de alguns dos objetivos da educação científica, deve-se também considerar a necessidade de instruir os sujeitos sobre o que é a ciência, tanto no ensino básico de ciências quanto na formação inicial e continuada de professores (ARTHURY; TERRAZZAN, 2018; BARBOSA; AIRES, 2018).

Neste contexto, apesar do consenso estabelecido acerca da importância do papel da NdC na educação científica (BARTHOLOMEW; OSBORNE; RATCLIFFE, 2004), algumas dificuldades emergiram e tornaram-se objeto de intensos debates, dentre os quais iremos destacar algumas problemáticas que julgamos passíveis de contribuição a partir do uso da noção de MEIC, dentre as quais destacamos as discussões em torno das questões sobre *porquê* e *como abordar* a NdC na EC e na formação de professores, e sobre *quais características* da natureza da ciência devem ser abordadas no EC. Em suma, iremos discutir aspectos relacionados aos objetivos, justificativas, métodos e características da natureza da ciência na educação científica. Antes, contudo, verifiquemos a pertinência legal desta temática para a educação científica no contexto brasileiro.

Considerações sobre a presença da NdC nos currículos da Educação Científica básica está associada à necessidade de abordar concepções sobre as ciências, consideradas mais adequadas ao século XXI. Vários países contemplam a NdC em suas diretrizes de ensino, seja de modo explícito ou implícito (ACEVEDO *et al.*, 2005; DRIVER *et al.*, 1996; MOURA, 2014).

No Brasil, o conteúdo de vários documentos oficiais leva em conta aspectos da NdC. De acordo com os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio, um dos objetivos explicitamente atribuídos à área das Ciências é “compreender as Ciências da Natureza como construções humanas e a relação entre conhecimento científico tecnológico e a vida social e produtiva” (BRASIL, 2000, p. 11). Além disso, a contextualização sócio cultural dos conhecimentos científicos é uma das competências almejadas, associando-se à esta, um conjunto de habilidades a serem desenvolvidas, incluindo reconhecer o sentido histórico da ciência, isto é, sua influência nos processos tecnológicos e nas transformações sociais, bem como compreender sua produção como um processo de construção humana, localizados no tempo e no espaço, ou seja, inserida em um contexto social e cultural (BRASIL, 2000, 2002).

As Diretrizes Curriculares Nacionais Gerais para o Ensino Básico (BRASIL, 2010), consideram que o conhecimento científico contemporâneo requer das escolas um compromisso com a história, a compreensão e valorização da ciência e da tecnologia, como condição para o exercício da cidadania dos educandos, proporcionando-lhes uma formação

“que articule trabalho, ciência, tecnologia e cultura na perspectiva da emancipação humana” (BRASIL, 2010, p. 35).

De acordo com as Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (BRASIL, 2011), a educação escolar é concebida como um direito social e como meio de socialização e difusão sistemática dos conhecimentos científicos construídos pela humanidade, segundo valores e padrões culturais e ético-morais, representando assim, um importante componente para o exercício da cidadania, para as práticas sociais, para a reflexão crítica dos padrões culturais e tendências sociais – suas concepções, problemas e crises.

Dentre os pressupostos e fundamentos para um ensino de qualidade social, as diretrizes curriculares para o ensino médio consideram que:

A ciência, portanto, que pode ser conceituada como conjunto de conhecimentos sistematizados, produzidos socialmente ao longo da história, na busca da compreensão e transformação da natureza e da sociedade, se expressa na forma de conceitos representativos das relações de forças determinadas e apreendidas da realidade. [...] Conhecimentos assim produzidos e legitimados socialmente ao longo da história são resultados de um processo empreendido pela humanidade na busca da compreensão e transformação dos fenômenos naturais e sociais. Nesse sentido, a ciência conforma conceitos e métodos cuja objetividade permite a transmissão para diferentes gerações, ao mesmo tempo em que podem ser questionados e superados historicamente, no movimento permanente de construção de novos conhecimentos. (BRASIL, 2011, p. 19).

O texto da Base Nacional Comum Curricular para o Ensino Médio (BRASIL, 2018), no que diz respeito a área das Ciências da Natureza e suas Tecnologias, atribui às ciências básicas – Química, Física e Biologia – um conjunto de competências e habilidades comuns, que contemplam várias aspectos relacionados com a temática da NdC, dentre os quais destacamos: a importância atribuída às implicações éticas, políticas, sociais, culturais e econômicas, associadas aos temas científicos; o reconhecimento da cultura científica, produzida em diferentes contextos históricos e sociais, como uma das possíveis formas de organização dos conhecimentos elaborados pelo homem; a importância e a ênfase dada às relações entre tecnologia e sociedade e às questões socioambientais; a relevância da evolução histórica de conceitos científicos, suas diferentes interpretações, as situações de controvérsia e o reconhecimento das limitações e imprecisões do conhecimento científico.

O Edital de Convocação para o Processo de Inscrição e Avaliação de Obras Didáticas para o Programa Nacional do Livro e do Material Didático (BRASIL, 2017) – PNLD 2019 –

apresenta, dentre os critérios de avaliação, a necessidade de que as obras didáticas proporcionem à busca pela formação cidadão, favorecendo que os estudantes possam estabelecer julgamentos, tomar decisões e atuar criticamente em questões de contexto social, científico, tecnológico, cultural e econômico. Além disso, as obras didáticas devem propiciar situações de ensino e aprendizagem que contribuam efetivamente para a compreensão de processos sociais, científicos, culturais e ambientais, bem como devem abordar temáticas contemporâneas que impactem a vida humana, dentre as quais a preservação do meio ambiente, a ciência e a tecnologia.

Conforme expusemos, vários documentos oficiais do estado brasileiro trazem orientações, diretrizes e normas que contemplam aspectos da NdC na educação científica nacional. Passemos agora a considerar algumas das dificuldades apontadas pela literatura, relacionadas à compreensão de aspectos da natureza da ciência e ao uso da NdC na educação científica.

Uma vez evidenciada a pertinência da NdC nos documentos legais que norteiam e regulamentam a educação científica no Brasil, passemos a considerar aspectos relacionados com os métodos e justificativas de abordagem da NdC nas situações de ensino.

O EC transmite visões de ciência que podem ser notoriamente distantes das concepções mais contemporâneas acerca da atividade científica (FORATO; MARTINS; PIETROCOLA, 2012a), podendo converter-se em obstáculos para a aprendizagem, fomentar o descontentamento dos estudantes em relação às disciplinas científicas (BARBOSA; AIRES, 2018), contribuindo para uma percepção popular caricata, inadequada e fragilizada da ciência.

A literatura é consensual quanto a importância da HdC e da FdC para o EC (VITAL; GUERRA, 2014) e argumentos que ressaltam esta importância vem sendo oferecidos desde meados do século XX (BEJARANO; ADURIZ-BRAVO; BONFIM, 2019). Tais abordagens são úteis para diferentes propósitos, como para a elaboração de estratégias didáticas que facilitem a compreensão de conceitos científicos e para a problematização de aspectos relacionados à NdC (DE OLIVEIRA; SILVA, 2012; FORATO; PIETROCOLA; MARTINS, 2011; SOUZA *et al.*, 2021). Falar da NdC implica também em considerar o contexto da produção do conhecimento, levando em conta que este conhecimento “é obra humana, e como homens pertencentes a uma sociedade – com seus modelos culturais, políticos, históricos, econômicos etc. –, eles trazem à Ciência suas concepções, crenças e anseios” (MOURA, 2014, p. 36). Neste sentido, a HdC e FdC podem prover muitos exemplos das relações de influência entre os sujeitos, o conhecimento que produzem e os contextos sócio culturais em que estão inseridos.

A constituição da história da ciência como disciplina de estudos começa a institucionalizar-se no início do século XX (BASSALO, 1992), embora sua incorporação no EC pode ser encontrada, ainda que de forma tênue, já no final do século XIX e início do século XX (MATTHEWS, 1992; MCCOMAS; ALMAZROA; CLOUGH, 1998). Nos anos de 1970 sua legitimidade como conteúdo curricular nos cursos de formação científica encontra-se no centro de uma importante controvérsia acerca do uso da história das ciências na formação de cientistas (VILAS BOAS *et al.*, 2013).

Brush (1974) reúne um conjunto de argumentos defendidos por cientistas, historiados, filósofos e professores de ciências que, em suma, evidenciam a lacuna cada vez maior entre as pretensões do historiador e as do professor de ciências. O contexto desta discussão está inserido na fase *pós revolução kuhniana*, onde duras críticas estão sendo produzidas sobre as ideias de Kuhn. Brush assim argumenta:

Meu ponto é que, se os professores de ciências desejam usar a história da ciência, e se desejam obter suas informações e interpretações de escritos contemporâneos de historiadores da ciência, em vez de mitos e anedotas transmitidos de uma geração de escritores de livros para a próxima, eles não podem evitar ser influenciados pelo tipo de ceticismo sobre a objetividade que agora é tão difundido. (BRUSH, 1974, p. 1170).

Este autor é um crítico da *nova historiografia* da ciência, que alega ter sido inaugurada por Koyré e generalizada por Kuhn (BRUSH, 1974), sobretudo porque ela inverte a questão filosófica da precedência da experimentação sobre a teoria, resultando em uma modificação da imagem científica quanto a sua objetividade; inevitavelmente, repassar as interpretações da nova historiografia aos estudantes teria como efeito confundi-los com relação a imagem da ciência e a atividade dos cientistas (VILAS BOAS *et al.*, 2013).

Argumentos contrários ao uso da história da ciência no EC foram também defendidos por T. Kuhn, notório defensor do papel da história para a compreensão dos processos de produção do conhecimento científico (VILAS BOAS *et al.*, 2013). Deve-se considerar, no entanto, que para Kuhn a história da ciência a ser evitada no EC é aquela expressa pela *nova historiografia*, em favor da qual ele advoga como imprescindível para a compressão da ciência. Na formação dos futuros cientistas, contudo, a história presente nos manuais é distorcida; e para Kuhn, assim deve ser (SIEGEL, 1979), afinal, não há outra forma de apresentar a *ciência normal* que não seja aquela relacionada a uma tradição consistente e

irreparável; se existe a pretensão de formar cientistas competentes “é melhor mantê-los longe da história não distorcida da ciência e apresentar ao aluno uma visão *inequívoca*, limitada pelo paradigma, da tradição da disciplina” (SIEGEL, 1979, p. 112, grifos do autor).

Em linhas gerais, a oposição de T. Kuhn fundamenta-se na ideia de que nos períodos de *ciência normal*, uma dada comunidade científica encontra-se em um estado caracterizado por certo dogmatismo, onde os cientistas em atuação (e em formação) estão diante de um conjunto de conhecimentos relativamente bem estabelecidos, isto é, correspondem ao “resultado estável das revoluções passadas” (KUHN, 1970, p. 174). Nos períodos de *ciência normal* os esforços concentram-se na aplicação (e apreensão) dos conhecimentos estabilizados, onde o esforço de pesquisa está voltado para a resolução de problemas (KUHN, 1970). Trata-se de uma atividade pautada pelo pensamento convergente, que se apoia em um consenso fortemente estabelecido, primeiramente adquirido pela formação inicial do cientista e reforçado na atuação profissional seguinte (KUHN, 2009a).

Para Kuhn, o treinamento de cientistas não deve considerar à história da formação de seu campo de estudos, afinal, não há sentido em disseminar práticas e conhecimentos científicos que foram descartados pelas gerações anteriores; seria um desperdício de tempo: “por que honrar o que os melhores e mais persistentes esforços da ciência tornaram possível descartar?” (KUHN, 1970, p. 176). Para Kuhn, a educação científica é estruturada para conduzir rigorosamente o iniciante a um pensamento convergente, o qual contempla as soluções admitidas como corretas pela comunidade científica, sendo esta uma das razões pelo atual status alcançado pelo empreendimento científico (KUHN, 2009a).

No entanto, o autor está ciente das consequência de tal desprendimento, que embora pedagogicamente importante, não deixa de produzir seus efeitos, sendo um deles a percepção ilusória de que o conhecimento científico avança linearmente e de forma cumulativa, e neste sentido, a omissão dos embates e das controvérsias nos manuais³⁷ contribui para a invisibilidade das revoluções científicas (KUHN, 1970).

Em suma, a problemática Kuhn-Brush pode ser assim colocada: Kuhn defende a omissão da *nova historiografia* na formação científica, mas é tolerante à *distorção histórica* presente nos manuais; Brush é um crítico da *distorção histórica* advogada por Kuhn, mas também da *nova historiografia* da ciência. Diante deste contexto, Siegel (1979) apresenta um

³⁷ Importa destacar, como já dito anteriormente, que o argumento de Kuhn recai mais especificamente sobre as ciências naturais – puras ou básicas –, dentre estas a Química, a Física, a Biologia, a Astronomia e a Geologia, nas quais a instrução recorre ao uso de *manuais*, cujo formato é pautado pela resolução de problemas, sem no entanto apresentar diferentes abordagens para um mesmo campo de problemas; ao contrário, os problemas e as abordagens são justamente aqueles que a comunidade científica acabou considerando como *paradigmas* (KUHN, 2009a).

contraponto interessante, em oposição à *distorção histórica*, mas em defesa do uso da *nova historiografia* da ciência nos manuais e na educação científica.

Em relação ao primeiro ponto, o autor considera que a *distorção histórica* fere preceitos morais da educação:

Os alunos não são objetos com os quais podemos, como educadores de ciências, fazer o que desejamos – eles são pessoas e merecem o respeito por sua personalidade que exigimos para nós mesmos. No mínimo, esse respeito exige honestidade em nossas relações com eles. (SIEGEL, 1979, p. 113).

Em relação ao segundo ponto, o autor questiona se o contato dos estudantes com os aspectos turbulentos da produção do conhecimento científico seriam de fato prejudiciais. A esse respeito, apresenta argumentos bastante convincentes em favor da *nova historiografia* da ciência, que apontam tanto para uma formação mais consistente no paradigma vigente, quanto para a compreensão do futuro campo de atuação científica, ou seja, uma melhor compreensão de aspectos da natureza da ciência:

[...] os relatos alternativos, retirados de paradigmas descartados do passado, podem ser ensinados como tais – como tentativas anteriores de organizar e explicar uma determinada parte da natureza que, por razões e deficiências especificáveis, foi substituída por um paradigma atualmente considerado mais adequado para a tarefa. Demonstrar desta forma a eficácia do novo paradigma aumentaria muito a compreensão do aluno desse paradigma. Por analogia, também demonstraria ao aluno a falibilidade da teoria científica atual e, assim, estimularia no aluno uma postura crítica e orientada para o aprimoramento em relação à teoria atual. Isso parece altamente desejável. (SIEGEL, 1979, p. 113).

Além da argumentação apresentada, o autor oferece uma extensa análise de trechos extraídos da obra didática *Project Physics Course* (PPC)³⁸, a partir da qual evidencia a presença de elementos filosóficos e históricos que considera não distorcidos. Assim, embora o

38 O PPC foi um curso de física de nível introdutório, idealizado por uma equipe liderada por Gerald Holton, que contou com a colaboração de vários especialistas da diversas áreas, dentre os quais cientistas, filósofos e historiadores da ciência. Desenvolvido nos Estados Unidos no início dos anos 1960, foi encomendado pela National Science Foundation, sediada em Washington. Voltado para o ensino de física, tinha a ambição de atrair a juventude para as carreiras científica e tecnológica, com o intuito de manter a hegemonia econômica e tecnológica americana, frente aos avanços da União Soviética nestas áreas. Inicialmente denominado por Harvard Project Physics, além dos conteúdos de física, seus autores buscaram elaborar uma proposta humanística e historicamente orientada, estabelecendo interconexões entre a física, suas ciências próximas e seus contextos histórico e cultural (cf. HOLTON, 2003).

PPC tenha sido uma exceção em seu tempo, ele foi apontado por Seigel como exemplo de que uma educação científica comprometida com a história e filosofia da ciência seria uma proposta viável, o que veio a ser corroborado por estudos posteriores que se embasaram no conjunto de evidências geradas a partir da aplicação do PPC em larga escala (MATTHEWS, 1992).

A história da ciência no EC, a despeito da problemática levantada por Kuhn, é indispensável para uma boa compreensão do empreendimento científico e de como ele progride, ou seja, abordagens históricas desempenham o importante papel em questionar a visão ingênuo da ciência, mantida por muitos estudantes e pelo público em geral, propagada de diferentes modos, inclusive pelos livros didáticos (KRAGH, 1992). Algumas abordagens históricas presentes implícita ou explicitamente em textos didáticos de EC, denominada *quase-história*, constituem “uma história mítica preparada especialmente para a doutrinação de certos pontos de vista metodológicos e didáticos” (KRAGH, 1992, p. 351). De acordo com Kragh (1992), é possível conciliar a história da ciência e o EC:

Por razões práticas, não é possível (nem, penso eu, desejável) ensinar uma matéria científica em uma perspectiva inteiramente histórica; mas é bem possível, e altamente lucrativo, focar em estudos de caso selecionados. Isto é, usar eventos históricos exemplarmente. (KRAGH, 1992, p. 350).

Nas décadas de 1980 e 1990 vários estudos consolidam-se como importantes referenciais na defesa do papel da história, filosofia e sociologia da ciência na educação científica. Se no início dos anos 1900 a compreensão da NdC era equivalente a compreender o método científico, nos anos de 1970 a mudança na forma de conceber a NdC tornara-se bastante perceptível, passando a incorporar outros aspectos ao conhecimento científico – provisório, compartilhável, replicável, relativamente incerto, humanístico, histórico, holístico, empírico – e a partir dos anos 1980, fatores psicológicos são também contemplados – criatividade, o papel central da teoria na elaboração e interpretação do experimento – bem como novos fatores sociológicas – estrutura social das organizações científicas, o papel do discurso social na validação das afirmações científicas – (ABD-EL-KHALICK; LEDERMAN, 2000b).

De acordo com Abd-El-Khalick e Lederman (2000b), a sociologia da ciência emerge como campo de pesquisa com os trabalhos pioneiros de Robert Merton, na primeira metade

do século XX, muito embora voltado para a investigação da ciência enquanto coletivo de sujeitos, mas não contemplando uma descrição social do conhecimento científico. Por outro lado, a filosofia da ciência pós-Kuhniana da segunda metade do século XX impulsionou uma nova sociologia da ciência – dentre os quais, o *Programa Forte* da sociologia do conhecimento – que buscou produzir análises sociológicas da produção do conhecimento e do discurso dos cientistas, buscando situar o empreendimento científico em contextos sociais e culturais (ABD-EL-KHALICK; LEDERMAN, 2000b).

Vários argumentos são apresentados para que novas perspectivas da ciência sejam incorporadas à educação científica (DE OLIVEIRA; SILVA, 2012), dentre os quais merecem destaque os elencados por Michael R. Matthews, para quem a história, filosofia e sociologia da ciência (HFSC) não têm todas as respostas para os problemas da educação científica de seu tempo, mas certamente podem trazer grandes contribuições. Segundo Matthews, a inclusão de tais áreas:

[...] pode humanizar as ciências e torná-las mais vinculadas às questões pessoais, éticas, culturais e políticas; pode tornar as salas de aula mais desafiadoras e atenciosas e, assim, aprimorar as habilidades de pensamento crítico; pode contribuir para o entendimento mais completo do assunto científico – pode contribuir um pouco para superar o “mar de falta de sentido” [nas] salas de aula de ciências, onde fórmulas e equações são recitadas, mas poucas pessoas sabem o que significam; pode melhorar o treinamento do professor, auxiliando no desenvolvimento de uma epistemologia da ciência mais rica e autêntica, ou seja, uma maior compreensão da estrutura da ciência e de seu lugar no esquema intelectual das coisas. (MATTHEWS, 1992, p. 11–12).

Segundo McComas, Almazroa e Clough (1998), apesar dos esparsos estudos, publicadas ao longo do século XX, que sugerem considerar aspectos relacionados à natureza da ciência na educação e no EC, professores e currículos de ciências continuam firmemente limitados à tradição de comunicar os fatos e produtos da ciência, geralmente negligenciando as suas origens.

Nas décadas de 1980 e 1990 alguns sinais da reaproximação entre HFSC e a educação científica começam a tornar-se mais evidentes, dentre os quais, o crescente número de eventos dedicados a referida temática e as modificações curriculares ocorridas em alguns países (MATTHEWS, 1992).

Os currículos de ciências passam então a considerar aspectos meta científicos, não

pela sua inclusão como disciplinas de estudo, mas por considerar uma contribuição mais geral de temas meta científicos para o ensino dos conteúdos científicos. A educação científica pretendida – e também a formação de professores – deve ensinar as ciências em seus diferentes contextos (social, histórico, filosófico, ético, tecnológico). É, portanto, uma educação *em e sobre* ciências, e o termo Natureza da Ciência, empregado como referência à esta proposta educativa, aparece originalmente no Currículo Nacional Britânico (MATTHEWS, 1992).

Matthews (1992) reúne estudos de vários pesquisadores e aborda a temática em muitos contextos diferentes, evidenciando a presença e a importância da história e da filosofia da ciência em orientações curriculares, na psicologia da aprendizagem, no EC, formação de professores, etc. O autor reconhece que dentre as tarefas pedagógicas, uma delas consiste em realizar uma história simplificada, mas não inadequada, das ciências, e discute os problemas relacionados ao papel da idealização na elaboração das teorias científicas e na resolução de problemas, enfatizando a grande lacuna deixada pela ausência de uma perspectiva filosófica que permita a estudantes e professores compreender melhor a distinção entre os objetos da ciência e as coisas do mundo real, sendo este, na visão do autor, um subestimado problema pedagógico relacionado a compreensão do conhecimento científico:

Brincar com, ou olhar prolongadamente para objetos materiais reais, não irá gerar as massas pontuais, corpos inerciais, definições de força, geometria e cálculo que são todas partes essenciais dos objetos teóricos da mecânica. Os primeiros entram na ciência quando são descritos em termos dos últimos. Uma vez assim vestidos, e no sistema, eles podem ser operados pelo aparato conceitual da ciência. (MATTHEWS, 1992, p. 27).

A ausência de uma compreensão mínima acerca das rupturas entre o mundo real e o mundo dos objetos da ciência não deixa de ser uma fragilidade na educação científica, pois as lacunas deixadas por um EC que não discute o que é e o que não é um sistema ideal, não deixa de alimentar ideias anticientíficas (MATTHEWS, 1992). As dificuldades de estudantes em enxergar alguma conexão entre o mundo real em que vivem com as situações idealizadas da ciência podem ser superadas por uma educação científica comprometida com a história e a filosofia da ciência e exercida por professores com conhecimentos nestas áreas. Consequentemente, a filosofia da ciência é igualmente relevante para a elaboração de orientações curriculares, afinal, há poucas chances de que um EC seja coerente com uma

visão filosófica contemporânea da ciência quando as diretrizes normativas não o são.

Adicionalmente, a formação de professores deve contemplar aspectos da HFSC, pois não basta haver diretrizes curriculares para o EC se os professores não forem capazes de compreender, valorizar e reconhecer a importância e finalidade de tais diretrizes para a prática docente (BARBOSA; AIRES, 2018), afinal, como um dos principais atores deste processo, são os professores que “traduzem o currículo escrito em um formulário pronto para aplicação em sala de aula e decidem o que, como e por que aprender” (MCCOMAS; ALMAZROA; CLOUGH, 1998, p. 523), atuando “ativamente ao construir suas práticas adaptando, reformulando, descaracterizando, ou simplesmente ignorando os ditames dos órgãos superiores na hierarquia do sistema educacional” (VITAL; GUERRA, 2014, p. 250). Neste sentido, também os professores precisam ser educados levando em conta perspectivas da HFSC, assumindo um compromisso ético e moral com uma educação científica que incorpora tais perspectivas. Além de saber resolver problemas, um professor de ciências deve ser capaz de *falar sobre* leis, modelos, teorias, fatos, evidências, métodos, ou seja, deve ter algum conhecimento mais sofisticado *sobre* a ciência, seus limites e sobre as suas dimensões histórica e cultural (MATTHEWS, 1992). Neste sentido, a HFSC pode contribuir decisivamente para enriquecer a compreensão dos professores sobre a ciência que lhes compete ensinar, e conforme apontado por Matthews (1992), a instrução de professores quanto aos assuntos da HFSC deve ser predominantemente prática ou aplicada e não puramente teórica.

Em estudo recente, Ferreira e Custódio (2021) analisaram documentos curriculares de cursos de Licenciatura em Física, ofertados por Instituições de Ensino Superior da rede pública no Brasil. Os autores afirmam que os temas relativos à natureza da ciência são ainda timidamente presentes na formação docente, correspondendo a menos de 5% da carga horária total destes cursos formativos, além do que, a maior ênfase destas abordagens circunscreve-se aos aspectos mais conceituais – relacionados à história e filosófica da ciência –, em detrimento dos conhecimentos pedagógicos, ou seja, colocando em segundo plano suas possíveis contribuições para o ensino e para a produção de materiais didáticos.

No que diz respeito ao papel da HFSC no EC, de acordo com McComas, Almazroa e Clough (1998), a partir de meados dos anos 1990 o cenário começa a mudar rapidamente e a obra de Michael Matthews, *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science*, publicada em 1994, torna-se uma importante referência e nela o autor apresenta uma longa extensiva argumentação em favor do uso da natureza da ciência na didática das ciências.

Recentemente, a importância da HdC e da FdC para o EC têm sido amplamente

reconhecida (ARTHURY; TERRAZZAN, 2018) e neste cenário destaca-se o projeto europeu *History and Philosophy in Science Teaching* (HÖTTECKE; HENKE; RIESS, 2012), destacado pelo periódico *Science & Education* na publicação de sua edição especial no ano de 2012³⁹.

No Brasil, trabalhos relacionados às temáticas da história, filosofia e sociologia da ciência estão presentes de forma significativa nos eventos de ensino de física, como o Simpósio Nacional de Ensino de Física (SNEF) e o Encontro de Pesquisa em Ensino de Física (EPEF) (DE OLIVEIRA; SILVA, 2012). A publicação de trabalhos em periódicos é igualmente significativa (TEIXEIRA; GRECA; FREIRE JR., 2012) e a referida temática também está presente na produção de Teses e Dissertações de vários programas de Pós-Graduação brasileiros⁴⁰ (DAMASIO; PEDUZZI, 2017).

Apesar do alcance e abrangência das investigações realizadas nas últimas décadas no campo da HdC, dos avanços ocorridos na historiografia da história da ciência e das prescrições atuais da historiografia, as versões mais recorrentes no ambiente escolar ainda contemplam aspectos já superados por este campo de pesquisas, como é o caso das interpretações anacrônicas, lineares e cumulativas da produção de conhecimento científico, a quase história e o whignismo (FORATO, 2008). Vários estudos procuraram desenvolver propostas metodológicas com o intuito de sistematizar processos de produção textual, objetivando estabelecer uma base teórica e metodológica de referência para o trabalho docente na tarefa de levar a HFC para as situações de ensino (IRWIN, 2000; KLASSEN, 2009; NORRIS *et al.*, 2005; STINNER *et al.*, 2003).

A despeito dos benefícios que a HFC pode incorporar às situações de ensino de ciências, sua implementação enfrenta desafios (HÖTTECKE; HENKE; RIESS, 2012). Neste contexto, há um conjunto de diretrizes que podem ser consideradas elementares:

Mesmo no ambiente escolar, nunca se deve entregar-se à história “suave” da ciência: é necessário seguir as diretrizes da historiografia moderna da história da ciência, fornecendo relatos bem fundamentados e fiéis. Além disso, o uso da história e da filosofia da ciência no ensino de ciências deve ser informado por noções adequadas sobre o que é a ciência e como ela é construída (FORATO; MARTINS; PIETROCOLA, 2012b, p. 658, grifo dos autores).

39 Disponível em <<https://link.springer.com/journal/11191/21/9/page/1>>. Acesso em 20/07/2101.

40 Deve-se ressaltar que, em sua investigação, Damasio e Peduzzi (2017) identificaram 41 trabalhos (33 Dissertações e 8 Teses) em 11 programas de Pós-Graduação, no período de 2005 à 2014; destes, 34% “não declararam seu aporte filosófico ao defenderem o uso didático da história e filosofia da ciência” (2017, p. 5).

De um modo geral, os objetivos da educação científica contemporânea levam em conta as potenciais contribuições que a HFSC podem oferecer na tarefa de conjugar, “harmoniosamente, a dimensão conceitual da aprendizagem disciplinar com a dimensão formativa e cultural” (FORATO; MARTINS; PIETROCOLA, 2012a, p. 124). Por outro lado, as diretrizes educacionais sugerem abordagens cada vez mais interdisciplinares e transdisciplinares, exigindo de professores com uma formação específica, certo domínio de outras áreas do saber. Uma vez que a HFSC constituem campos de saber com objetivos, métodos e procedimentos próprios, em suma, não são instrumentos didático metodológicos *per se*, o uso da HFSC como objeto pedagógico requer uma formação docente para este propósito e, adicionalmente, deve-se levar em conta as práticas educativas irão refletir, explícita ou implicitamente, as concepções de ciência que os professores possuem (FORATO; MARTINS; PIETROCOLA, 2012a, 2012b).

Diante deste quadro, Forato *et al.* (2012a) consideram que os pressupostos da atual historiografia da HdC, aliado as metodologias educacionais, são de fundamental importância para a elaboração dos saberes escolares, que no caso em questão referem-se a produção de narrativas históricas e aos aspectos epistemológicos que elas possuem. Neste sentido, estes autores falam em uma transposição didática (TD) dos conhecimentos de HFC, que assumem como saber sábio aqueles conhecimentos produzidos pelo historiador das ciências (através de suas obras historiográficas), pelos cientistas (através dos documentos originais) e demais sujeitos que contribuem para a construção das ciências. Segundo os autores, este processo revela-se complexo, pois exige a superação de obstáculos, alguns deles relacionados com as especificidades próprias dos campos da HFC e a necessidade de transpô-los, enquanto saberes sábios, e a necessidade de haver sintonia entre as concepções sócio históricas pretendidas acerca da construção das ciências e os métodos adotados para o seu ensino e aprendizagem (FORATO; MARTINS; PIETROCOLA, 2012a).

Atualmente a HdC é considerada como uma importante estratégia para abordagem de aspectos da NdC no EC. Apesar do consenso dentro da didática das ciências a respeito da importância da NdC para a educação científica (MCCOMAS; ALMAZROA; CLOUGH, 1998), algumas questões foram levantadas acerca de seus objetivos, das formas de sua abordagem e das razões para a adoção da NdC na educação científica. De início, tal motivação foi pouco esclarecida e pouco justificável (cf. ALLCHIN, 2017).

De acordo com Driver *et al.* (1996), compreender as justificativas é imprescindível para estabelecer quais aspectos da natureza da ciência devem ser contemplados na educação científica, e seu argumento central “é que uma compreensão da natureza da ciência é um

aspecto essencial da compreensão pública da ciência” (DRIVER *et al.*, 1996, p. 10), a qual é amplamente justificada pelo impacto dos produtos científicos e tecnológicos na vida cotidiana. McComas, Almazroa e Clough (1998) discutem os resultados de um amplo conjunto de estudos, indicando que a literatura apresenta uma gama variada de justificativas para a abordagem que leve em conta a NdC: ela possibilita o enriquecimento da aprendizagem dos conteúdos científicos, colocando os estudantes diante de uma *percepção dinâmica* do desenvolvimento científico, em oposição a uma percepção estática, onde a ciência é caracterizada como um conjunto de fatos e conhecimentos verdadeiros que não se modificam; a NdC possibilita uma compreensão mais rica da ciência, uma vez que permite discutir suas possibilidades, limitações, o caráter durável, porém revisional das ciências e outros aspectos meta-científicos, enriquecendo a concepção de professores e estudantes; a NdC potencializa aspecto afetivos em relação ao aprendizado das ciências, uma vez que humaniza a atividade científica, tornando o ensino mais prazeroso e culturalmente significativo; a dimensão histórica da NdC possibilita aos estudantes um contato com ideias científicas já superadas, e por vezes estas ideias apresentam alguma similaridade com as concepções do senso comum e com as quais os estudantes se identificam, e nestes casos, o uso da NdC pode contribuir para a superação daquelas ideias trazidas pelos estudantes, uma vez que a abordagem histórica pode por em evidência a evolução das ideias científicas, podendo, assim, estar a serviço da psicologia cognitiva; em relação às dificuldades relacionadas com a superação das concepções de senso comum dos estudantes, algumas das dificuldades encontram-se também nos professores que, mantendo a percepção equivocada de que o conhecimento científico seja puramente objetivo, não são capazes de compreender que parte do entendimento dos fatos da natureza depende da percepção subjetiva dos sujeitos e dos conhecimentos prévios destes sujeitos, as atividades de ensino não se resumem, portanto, a substituir o conhecimento inadequado dos estudantes pelo conhecimento descoberto como correto pela ciência.

Um dos objetivos da educação científica deve ser o de formar indivíduos conscientes das complexas relações entre a ciências, seus produtos e a sociedade (HODSON, 1994), e capazes de atuar em contextos sócio políticos, exercendo sua cidadania por meio da participação na tomada de decisões em questões sócio científicas e tecnocientíficas. (DRIVER *et al.*, 1996).

Acevedo *et al.* (2005) questionaram o uso da NdC como meio para atingir tal finalidade educativa, ou seja, dúvidas foram levantadas sobre o *argumento democrático* de que uma melhor compreensão da NdC pelos estudantes lhes permitiria formar opiniões mais críticas e tomar decisões mais equilibradas diante de questões tecnocientíficas de interesse

coletivo. Os autores apontaram estudos onde assuntos tecnocientíficos foram objeto de discussões por professores e estudantes em situações simuladas e os resultados apontaram a pouca ou nenhuma influência dos conhecimentos sobre NdC dos participantes. Nesta perspectiva, a alfabetização científica para tomada de decisões tecnocientíficas é considerada como um mito memorável, pois considera que o cidadão não pode alcançar o conhecimento científico necessário para entrar no debate científico; nem mesmo as melhores escolas seriam capazes de informar os sujeitos com um grau profundo de conhecimentos que as questões tecnocientíficas implicam (ACEVEDO *et al.*, 2005).

Um contraponto à esta crítica foi apresentado por Praia, Gil-Pérez e Vilches (2007). Estes autores sustentam que o *argumento democrático* ocupa uma posição central em todas as instâncias onde a alfabetização científica e tecnológica é vista como essencial para uma educação voltada para a cidadania. Apesar de concordarem ser improvável que sujeitos não especializados possam dominar a complexidade dos conceitos científicos inerentes à muitas problemáticas tecnocientíficas, os autores argumentam que até mesmo os indivíduos não especializados têm um papel coletivo de cunho ético, cuja principal função é a de legitimar as decisões tomadas. Além disso, os autores argumentam que os especialistas, mesmo possuidores de profundos conhecimentos específicos, não são capazes de captar todas as perspectivas nem de prever todas as implicações futuras, sendo justamente em relação a este aspecto que os não especialistas podem contribuir, com suas percepções e interesses mais amplos, prorrogando a adoção apressada de inovações em relação as quais ainda não se conhece claramente a relação custo-benefício. Tal participação exige conhecimentos científicos mínimos para compreender a problemática em debate e as opções disponíveis em situações polêmicas e controversas (PRAIA; GIL-PÉREZ; VILCHES, 2007).

Estas situações costumam relacionar-se com estudos de caso associados a problemas tecnocientíficos contemporâneos. Conforme apontado por Allchin, Andersen e Nielsen (2014), estudos têm indicado que no uso pedagógico de estudos de casos contemporâneos nos quais questões éticas e políticas entrem em jogo, estudantes tendem a formar posicionamentos fortemente pautados por valores não científicos por eles adotados, em detrimento de concepções científicas, ou inclinando-se à selecionar evidências que favorecem seus valores.

Apesar das críticas, Allchin, Andersen e Nielsen (2014) reforçam que os estudos de casos contemporâneos podem evidenciar de modo marcante o caráter aberto da ciência, por meio da problemática em questão, uma vez que tratam de situações ainda em discussão no âmbito científico. Estes estudos de caso permitem aos estudantes entrar em contato com diferentes aspectos da produção do conhecimento científico, como “incerteza, tentativa,

subjetividade, perspectivas múltiplas, o papel do financiamento, interesses políticos e inserção social da ciência” (2014, p. 467). Os autores, contudo, alertam para o fato de que estes tipos de estudos de caso podem não propiciar condições para a instrução dos estudantes acerca de como a ciência aborda as situações de incerteza e nem como a ciência avalia as evidências empíricas, bem como o papel dos fatores subjetivos em tal avaliação. Assim, os estudos de casos históricos podem oferecer importantes contribuições (ALLCHIN; ANDERSEN; NIELSEN, 2014).

A proposição de uma educação científica demasiadamente voltada para a formação cidadã, em detrimento de uma formação mais voltada para os aspectos conceituais, tem fomentado críticas e resistências por parte dos professores, por vezes relacionando-se com a forma distorcida com a qual concebem seu papel (VITAL; GUERRA, 2014) e assim, costumam atribuir mais importância à tarefa de formar cientistas do que de formar cidadãos capazes de decidir sobre questões que não lhes são acessíveis (PRAIA; GIL-PÉREZ; VILCHES, 2007). Estas duas finalidades, contudo, não são excludentes, mas sim compatíveis sob certas circunstâncias (HODSON, 1992). De todo modo, pode-se concordar que a formação de profissionais destinados às ciências puras, em nível superior, requeira uma educação rígida e especializada, muito embora o inventor e o cientista aplicado também possam beneficiar-se de uma educação científica mais ampla e menos rígida (KUHN, 2009a).

Em termos práticos, contudo, o currículo de ciências deve cumprir igualmente a função de fornecer os primeiros conhecimentos científicos, tanto para aqueles que irão se profissionalizar nas ciências, quanto para aqueles que não irão, e apesar de possíveis tensões e diferenças curriculares, estes dois propósitos distintos, de acordo com Driver *et al.* (1996), apresentam ao menos dois objetivos comuns:

Em primeiro lugar, ambos têm o objetivo de ajudar os alunos a compreender algumas partes do corpus do conhecimento científico substantivo. As prioridades e a profundidade do tratamento podem diferir, mas, na medida em que a compreensão da natureza da ciência e do conhecimento científico sustentam o aprendizado bem-sucedido das ciências, isso se aplica igualmente a ambas. Em segundo lugar, os cientistas também são cidadãos. O objetivo de uma ampla alfabetização científica se aplica tanto ao aspirante a especialista quanto ao aluno que escolherá uma carreira não científica. A perícia científica é limitada a uma estreita área de especialização; tanto como indivíduo quanto como cidadão, um cientista pode ter que tomar decisões que envolvam ideias fora de sua área restrita de especialização. Nessas áreas, o cientista é, em muitos aspectos, um “leigo instruído” (DRIVER *et al.*, 1996, p. 9, grifos dos autores).

Além destes dois fatores em comum, os autores lembram que os cientistas precisam comunicar seus conhecimentos especializados ao público em geral e para que essa comunicação cumpra seu papel, espera-se que a audiência seja capaz de compreender minimamente o que está sendo comunicado. Adicionalmente, os cientistas devem ter um entendimento mais amplo da ciência que praticam, da dependência de sua atividade em no que diz respeito ao controle social e político (DRIVER *et al.*, 1996).

Por outro lado, as investigações em didática das ciências vem apontando que mesmo a educação científica predominantemente orientada com ênfase nos aspectos conceituais, em todos os níveis, não têm sido bem sucedida; por outro lado, investigações têm indicado que o aprendizado significativo dos conceitos científicos é favorecido nas situações de ensino que levam em conta elementos da investigação científica que integram os aspectos conceituais, procedimentais e axiológicos, contexto no qual a NdC desempenha um importante papel (HODSON, 1992; PRAIA; GIL-PÉREZ; VILCHES, 2007).

Como quer que seja, além da participação democrática em decisões tecnocientíficas, uma educação científica que promova uma melhor compreensão da ciência serve a um outro propósito democrático, que relaciona-se com o reconhecimento e a valorização da ciência pelos indivíduos, afinal, o apoio da sociedade contribui de modo decisivo na destinação de recursos humanos e financeiros para a atividade científica (VITAL; GUERRA, 2014).

O construto denominado por NdC envolve as dimensões da história, filosofia e sociologia da ciência. Notadamente, estas dimensões, enquanto campos de conhecimento, apresentam cada qual uma pluralidade de visões acerca do empreendimento científico, o que torna a tarefa de definir o que seja a ciência um problema bastante complexo. No contexto da educação científica, esta problemática conduz, inevitavelmente à questão sobre *quais aspectos da natureza da ciência devam ser ensinados* (MARTINS, 2015).

De acordo com Mendonça (2020), do ponto de vista estritamente pedagógico, alguns autores assumem como pressuposto a impossibilidade de definir o que é a ciência, incorporando assim a denominada *visão essencialista* da ciência; como consequência, consideram que não há uma maneira única de caracterizar a ciência para fins pedagógicos, e assim sendo, defendem que a descrição da atividade científica leve em conta um conjunto de características *consensuais*, algumas pautadas em diretrizes presentes em documentos oficiais de diferentes instituições, outras levantadas a partir de consultas à especialistas, como professores de ciências, cientistas e filósofos, sociólogos e divulgadores da ciência.

Por outro lado, as abordagens consensuais são fortemente dependentes da forma como

as meta ciências são priorizadas por aqueles que opinam sobre quais seriam as características da ciência e costumam apresentar uma inclinação predominantemente epistêmica, em detrimento de aspectos mais sociológicos, tecnológicos e culturais, dando margem à críticas que consideram como uma das fragilidades da *listas consensuais* a incapacidade de captar a heterogeneidade da ciência (MENDONÇA, 2020).

No que diz respeito a *visão consensual*, e aqui assumimos uma posição especulativa e despreziosa em relação à esta problemática, talvez as suas limitações possam ser consideradas de uma perspectiva semelhante ao problema já abordado por Kuhn (2009b) em relação a História da Ciência, que diz respeito à duas tendências historiográficas que consideram, cada qual, o empreendimento científico em um de dois extremos: um deles que trata a ciência como uma coleção de campos científicos distintos, muito bem demarcados e vagamente conexos, no interior do qual seus praticantes são altamente especializados em um conjunto de técnicas experimentais e teóricas; e o outro, que trata da ciência como um empreendimento amplo, desconsiderando quase por completo o conteúdo conceitual especializado, mas voltando sua atenção para a “mudança da matriz intelectual, ideológica e institucional no âmbito da qual a ciência se desenvolve” (KUHN, 2009b, p. 57). Assumindo como verdadeiro o fato de que as ciências básicas são diversas em seus conteúdos, problemas, técnicas e produção de conhecimentos, aqueles que pretendam extrair uma lista de características inequívocas e aplicáveis a todas às ciências puras só poderão obter êxito se ficarem restritos a uma visão mais holística da ciência limitando-se, portanto, a fazer afirmações generalizáveis à todas as ciências – básicas, técnicas, aplicadas. Assim, tal como apontado por Kuhn (2009b) em relação à História da Ciência, também aqui possa ser útil considerar uma posição intermediária entre os dois extremos considerados.

Como quer que seja, a proposição de diferentes *listas consensuais* é outro aspecto problemático apontado pelas pesquisas (BEJARANO; ADURIZ-BRAVO; BONFIM, 2019), uma vez que evidenciam – ironicamente – a ausência de consenso entre as listas consensuais. Algumas críticas também apontam inconsistências e contradições entre algumas das asserções contidas nestas listas, enquanto outras denunciam o empobrecimento das situações de ensino pautadas pelo uso sistemático, não reflexivo e descontextualizado das *listas consensuais*, por vezes conferindo-lhes um forte caráter prescritivo e de pouca relevância para a educação científica (KELLY, 2008).

McComas e Olson (2002) analisam um conjunto de documentos balizadores de padrões para o EC, propostos na década de 1990 em diferentes países – Austrália, Canadá, Estado Unidos, Inglaterra, Nova Zelândia. Estes autores buscaram identificar, no conteúdo

destes documentos, pontos de concordância sobre como a ciência opera e embora admitam que esta metodologia implique inevitavelmente em certa descontextualização, argumentam que tal sacrifício é justificável em virtude do caráter sistemático que o método permite empregar. Apesar das críticas em desfavor da *visão consensual*, esta investigação empírica apresenta alguns méritos, dentre os quais, o de apontar que as concepções de natureza da ciência que figuram nos documentos somente podem ser adequadamente compreendidas a partir de diferentes disciplinas, isto é, o construto NdC “não é simplesmente um sinônimo de filosofia da ciência, mas é um domínio híbrido informado principalmente por estudos descritivos de uma variedade de disciplinas” (MCCOMAS; OLSON, 2002, p. 49), dentre as quais, filosofia, história, sociologia e psicologia da ciência.

Neste sentido, o consenso de que se fala diz respeito à inclusão de aspectos da NdC nos objetivos da educação científica, mas não em relação às características da ciência. Assim, a elaboração de uma lista de *princípios da natureza da ciência (tenets)* leva em conta apenas os aspectos comuns, presentes nos documentos considerados na análise (MARTINS, 2015; MOURA; GUERRA, 2016).

De acordo com Allchin (2017), um das principais falhas da *visão consensual* decorre de sua ampla aceitação sem razões ou justificativas claras, uma espécie de compromisso tacitamente assumido em torno de considerações pragmáticas e políticas. O caráter relativamente artificial inerente às primeiras formas de abordagem da NdC no EC, pautadas essencialmente pelas *listas consensuais*, fez emergir posicionamentos em defesa do uso da NdC por meio abordagens que evitassem a flagrante *descontextualização* inerente à propostas pedagógicas pautadas pelo uso de *listas consensuais* como modo mais prescritivo de caracterizar a ciência:

[...] aprender NdC significativamente exigiria pensar ou agir com ciência e sobre a ciência, revisar casos concretos, olhar as questões dentro de contextos e não somente seguir afirmações ditas consensuais que, de alguma maneira, traem a natureza filosófica da reflexão meta científica, que estabelece um olhar crítico e coloca em dúvida verdades monolíticas. (BEJARANO; ADURIZ-BRAVO; BONFIM, 2019, p. 972).

A descontextualização é apontada como um fator limitante aos objetivos finais da educação científica (BEJARANO; ADURIZ-BRAVO; BONFIM, 2019) e neste sentido, atividades investigativas e estudos de caso, históricos e contemporâneos, têm sido propostos,

inclusive de um modo integrado, como métodos complementares, para contornar as limitações apontadas (ALLCHIN; ANDERSEN; NIELSEN, 2014). Além disso:

Entre outras coisas, as listas de consenso confundem características epistemológicas, ontológicas, sociológicas, éticas e filosóficas da ciência e – por serem gerais em muitos domínios científicos – tendem a renderizar de forma imprecisa práticas científicas reais em domínios específicos e distorcer representações históricas da ciência. (ALLCHIN; ANDERSEN; NIELSEN, 2014, p. 463).

Cabe ressaltar que em seu estudo, estes autores relatam que professores do ensino básico de ciências, quando apresentados e instruídos acerca de uma lista de princípios sobre NdC, não os consideraram incorretos mas encontraram grandes dificuldades em proceder o seu uso pedagógico, isto é, não foram capazes de implementar uma instrução sobre NdC em termos dos princípios considerados; dito de outro modo, a lista foi considerada útil, mas pedagogicamente não operacional (ALLCHIN; ANDERSEN; NIELSEN, 2014).

Por outro lado, como já enfatizado, os estudos de caso contemporâneos podem não ser capazes de retratar determinados aspectos da *natureza da científica*, muitos dos quais somente é possível evidenciar recorrendo-se à história da ciência. De acordo com Allchin, Andersen e Nielsen (2014), investigações evidenciam que os estudos de casos históricos contribuem para que os estudantes formem uma visão mais sofisticada dos fundamentos empíricos da atividade científica, a pluralidade metodológica, o esforço despendido pelos cientistas e a diversidade colaborativa, o papel das teorias e sua capacidade preditiva, a relevância e natureza dos experimentos e observações, o caráter criativo/subjetivo das interpretações e o contexto sociocultural da prática científica. Os autores afirmam que:

Nem todos os casos históricos incorporarão lições da [NdC]. No entanto, quando a história é apresentada especificamente em um contexto histórico – como ciência em formação – e seguida até a ciência feita, ela pode promover uma compreensão de como os processos científicos levam a conclusões confiáveis. (ALLCHIN; ANDERSEN; NIELSEN, 2014, p. 475, grifos dos autores).

As *listas consensuais* são fechadas e pretende-se que reflitam as características da natureza da ciência, mas seu emprego levou à práticas pedagógicas que dificultam atingir os objetivos pretendidos por uma educação científica que tenha a ambição de contemplar a

natureza da ciência, uma vez que tais práticas reduziram-se à tentativas de reconhecer características da atividade científica de forma altamente prescritiva e descontextualizada. Buscando superar as alegadas limitações das *listas consensuais*, algumas abordagens renovadas surgem como alternativas às abordagens tradicionais da NdC, muitas delas impulsionadas pelos avanços teóricos no campo da didática das ciências (FERREIRA; CUSTÓDIO, 2021).

Allchin (2011, 2017), por exemplo, sugere caracterizar a NdC sob a perspectiva de dimensões de confiabilidade da ciência – observacional, conceitual e sociocultural – sob a denominação de *Ciência Completa (Whole Science)*. O autor sustenta que, em relação aos aspectos que caracterizam a natureza da ciência, é possível ser seletivo sem ser restritivo, mas para tanto deve-se recorrer aos casos concretos históricos ou contemporâneos, pondo em evidência os contextos humanos, culturais e investigativos da atividade científica, assegurando que os estudantes tenham contato com uma ampla gama de características associadas às dimensões de confiabilidade propostas (ALLCHIN, 2017). A lista de características agrupadas nas três dimensões de confiabilidade propostas por Allchin (2017) não encerra-se em si mesma, isto é, o autor reconhece a impossibilidade de caracterizar totalmente a natureza da ciência e, mais do que isto, defende que as dimensões observacional, conceitual e cultural sejam contextualizadas a partir uma gama variada de casos autênticos, visto que, sozinho, nenhum episódio histórico ou contemporâneo é capaz de encerrar todas as características da natureza da ciência. Além disso, argumenta em favor de uma formação educativa que ofereça competências e perspectivas que permitam aos sujeitos continuar a aprender sobre NdC para além da sala de aula, reconhecendo, portanto, a inerente incompletude que certa as questões relacionadas à atividade científica.

Irzik e Nola (2014) buscam contornar a problemática relacionada à impossibilidade de caracterizar inequivocamente a ciência em decorrência da ampla diversidade da própria ciência. A proposta destes autores baseia-se na ideia de *semelhança familiar*, originalmente desenvolvida pelo filósofo Ludwig Wittgenstein, a partir da qual pretende-se estabelecer um conjunto de características comuns a todas as ciências – reconhecendo que estas características não são suficientes para definir o que seja a ciência –, cuja finalidade mais importante é a forma sistemática e abrangente com a qual é capaz de contemplar de modo pedagogicamente útil, boa parte dos resultados das investigações da área, de modo que tanto as categorias quanto os itens que se enquadram nelas formem um todo integrado e articulado (IRZIK; NOLA, 2014).

Por outro lado, Arthury e Terrazzan (2018) argumentam que mais importante do que a

busca pelo estabelecimento de uma visão de NdC é a busca por estabelecer processos de ensino/aprendizagem que permitam abordar aspectos da natureza da ciência em consonância com os avanços apontados pela literatura da área, afinal, “existem diferentes tipologias para o modus operandi da ciência, e, para qualquer tentativa de explicação ou caracterização da atividade científica, haverá críticas ou contrapontos” (2018, p. 2).

De todo modo, salientamos a importância atribuída aos episódios da ciência como meio de contextualizar as questões sobre NdC. Em relação às abordagens históricas, Moura e Guerra (2016) chamam a atenção para a não trivialidade em relacioná-las com as discussões sobre NdC, ou seja, o uso pedagógico da HdC para promoção de uma melhor compreensão dos estudantes acerca de aspectos da NdC apresenta desafios a serem superados. Estes autores defendem que uma abordagem histórica voltada para as práticas científicas pode ser exitosa em oferecer caminhos alternativos à caracterizações essencialistas do conhecimento científico. Tal abordagem corresponde ao uso pedagógico da *História Cultural da Ciência*, que em linhas gerais consiste no desenvolvimento de narrativas históricas, voltadas para o EC, que alternativamente permitem evitar recorrer aos pontos de vista historiográficos mais metodológicos, estes caracterizados por rupturas ou programas de pesquisa, permitindo assim uma descrição alternativa sobre como o conhecimento científico se reconfigura a partir de novas práticas e novas representações, sobretudo porque simplesmente abordar as práticas dos cientistas em situações de ensino “não garantem, por si só, sua percepção epistemológica, nem possibilitam a compreensão da ciência como construções sócio-históricas e culturais” (MOURA; GUERRA, 2016, p. 754).

Por fim, importa ressaltar que, apesar dos embates, os diferentes papéis atribuídos a NdC para a promoção de uma educação científica voltada para demandas sociais, políticas, econômicas e culturais são amplamente reconhecidos pela comunidade científica e estão presentes em documentos oficiais de diferentes organizações e nações ao redor do mundo (LEDERMAN, 2007; MORAIS *et al.*, 2018). Contudo, o uso pedagógico da NdC para o ensino de conhecimentos científicos e meta-científicos é ainda um desafio para a educação científica (MARTINS, 2015).

No que diz respeito à formação inicial e continuada de professores, a carência de instrução – pedagógica e específica – sobre a NdC e suas potencialidades para a didática das ciências têm sido apontada como um dos fatores limitantes para a consolidação de alguns dos objetivos da educação científica (ALLCHIN, 2017; BARBOSA; AIRES, 2018; BARTHOLOMEW; OSBORNE; RATCLIFFE, 2004; BEJARANO; ADURIZ-BRAVO; BONFIM, 2019; MENDONÇA, 2020).

De acordo com Bartholomew, Osborne e Ratcliffe (2004), investigações apontam que o distanciamento de abordagens da NdC das salas de aula está relacionado à diferentes causas. Por exemplo: os processos de produção de conhecimento científico são particularmente úteis para evidenciar aspectos da NdC, mas, seja em contextos históricos ou contemporâneos, relacionam-se quase sempre à ciência de fronteira a qual é uma ciência em construção, sem as certezas e os conceitos estáveis com os quais os professores estão acostumados a vivenciar, tanto em sua formação quanto nos livros didáticos; quando professores consideram incluir aspectos históricos da ciência em suas aulas, geralmente é apenas em termos de humanizar a ciência com o propósito de promover atitudes positivas em relação à ela, e não com o propósito de compreender a natureza da ciência.

Salienta-se também, que parte dos professores que agora depara-se com as novas perspectivas de educação científica, as quais incorporam aspectos da NdC, constituiu-se de uma geração cuja formação não necessariamente contemplou a base filosófica, epistêmica e histórica de sua própria área de conhecimento, o que certamente impõem-se como um aspecto limitante, e portanto, desencorajador à atividade docente, e desse modo, a formação continuada deve ser também considerada como relevante (ARTHURY; TERRAZZAN, 2018; BARBOSA; AIRES, 2018; BARTHOLOMEW; OSBORNE; RATCLIFFE, 2004).

Outra evidência empírica importante relatada por Bartholomew, Osborne e Ratcliffe (2004) indica que professores sentem que precisam se concentrar no desenvolvimento de conhecimentos e habilidades específicas que terão maior impacto no desempenho de seus alunos nos exames. Ora, se os documentos oficiais que orientam a educação científica contemplam aspectos da NdC e se a elaboração de livros didáticos é também pautada por regras que contemplam aspectos da NdC, parece-nos necessário que as avaliações e exames – da sala de aula aos processos seletivos e diagnósticos – estejam igualmente alinhados aos objetivos pretendidos para a educação científica, não apenas para adequar-se à necessidades da prática docente, mas sobretudo para que se tenha uma relação de coerência entre os objetivos pretendidos e os meios adequados de aferir o êxito do processo educativo. Parece-nos, contudo, não ser esta a realidade presente no sistema educacional brasileiro.

De todo modo, investigações recentes parecem indicar que na tentativa de promover o uso da NdC no EC, diante de uma certa urgência e necessidade de instrução docente para viabilizar tal implantação, a pressa levou a uma transposição didática da Filosofia da Ciência, buscando sua didatização mas não sem comprometer estes conhecimentos, apagando assim muitas das características históricas e epistêmicas da ciência (BEJARANO; ADURIZ-BRAVO; BONFIM, 2019). Na próxima seção, faremos algumas considerações a respeito de

como a noção de MEIC pode trazer potenciais contribuições para a problemática da NdC.

5.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A NOÇÃO DE METÁFORA EPISTÊMICA INTRACIENTÍFICA E A TEMÁTICA DA NATUREZA DA CIÊNCIA

Na seção anterior buscamos apresentar um panorama da literatura em relação à temática da NdC, dando relativa ênfase a sua importância para os objetivos da educação científica e para o EC. Buscamos expor também algumas das dificuldades e caminhos apontados pela literatura da área.

De acordo com Driver *et al.* (1996), o ensino de aspectos da natureza da ciência deve considerar que os estudantes já possuem algumas ideias sobre a ciência e sobre o conhecimento científico e tecnologia, adquiridas na infância pela interação com uma cultura mais ampla, através dos adultos, de filmes, programas de televisão, desenhos animados, etc. A medida que crescem e tomam contato com o conhecimento científico escolar, a instrução sobre a natureza da ciência, implícita ou explícita, não garante que eles venham a adquirir concepções adequadas sobre a ciência, ou seja, da mesma forma que ocorre com os conhecimentos conceituais específicos, os estudantes nem sempre aprendem sobre a natureza da ciência, tal como inicialmente planejado (DRIVER *et al.*, 1996).

A instrução de professores sobre a natureza da ciência requer conhecimentos específicos e pedagógicos. A este respeito, iremos agora considerar as potenciais contribuições da noção de metáfora epistêmica intracientífica – MEIC – para a educação científica e para o EC, no âmbito da temática da natureza da ciência. Ressaltemos que nossas considerações levam em conta essencialmente o estudo de caso que empreendemos anteriormente, ou seja, a construção do CSE. No entanto, nos parece bastante razoável assumir que análises de episódios da história da ciência em outros campos científicos sejam, do mesmo modo, potencialmente úteis.

Levando em conta a exposição sobre a noção de MEIC e sobre a NHME que apresentamos na introdução deste capítulo, bem como o panorama apresentado na seção anterior, defendemos que o emprego da noção de MEIC pode desempenhar uma função analítica, orientando a produção de narrativas históricas ricas em aspectos da natureza da ciência, sendo portanto, potencialmente útil para atingir alguns dos objetivos da educação científica e do EC, contornar dificuldades e incorporar recomendações indicadas pela

literatura da área.

A história da ciência, apontada pela literatura especializada como uma das formas eficazes para abordar aspectos da NdC no EC, é naturalmente contemplada pela narrativa histórica pautada pela noção de MEIC, além do que, a riqueza de características relacionadas à natureza da ciência, presente na NHME, é totalmente desvinculada das listas consensuais. Uma NHME consiste em um estudo de caso histórico autêntico, conceitualmente contextualizado, contemplando aspectos externos e internos à ciência na produção do conhecimento científico, o que atende adequadamente a perspectiva sugerida por Kragh (1992) – os estudos de caso – para superar a problemática da quase-história. Elementos do contexto sócio cultural também são contemplados pela NHME, permitindo assim, evidenciar aspectos sociológicos e culturais da produção de conhecimento científico. Ressaltamos que a contextualização que estamos considerando alcança, inclusive, a análise do papel dos experimentos em seu contexto histórico, sendo este, um aspecto também apontado como relevante pela literatura especializada (BEJARANO; ADURIZ-BRAVO; BONFIM, 2019).

Ao longo da história das ciências, métodos e estratégias foram desenvolvidos e empregados na solução de diferentes problemáticas (MARTINS, 2015). Diferentes estudos de caso de MEIC são potencialmente capazes de revelar a pluralidade metodológica da ciência, afinal, estes episódios podem ressaltar: aspectos metodológicos⁴¹; elaboração de modelos científicos ou proposição de leis e/ou princípios; discussões sobre limites de aplicabilidade, de validade e de aceitação⁴² de ideias científicas. Uma NHME, portanto, incorpora elementos da filosofia da ciência.

As situações de controvérsia permitem evidenciar a pluralidade metodológica, o papel da criatividade e do pensamento divergente (BARBOSA; AIRES, 2018); comumente, cientistas podem recorrer à critérios e valores para aceitação/rejeição de novas ideias, sendo estes critérios não necessariamente compartilhados pela comunidade científica em que estão inseridos. De um modo geral, NHME estão associados à situações de controvérsia científica, sendo esta uma das características marcantes da produção de conhecimento científico. As manifestações de aceitação e rejeição de MEIC permitem destacar o caráter subjetivo da

41 Diferentes processos bissociativos foram propostos para descrever teoricamente os desdobramentos de energia dos espectros atômicos. Landé modelizou o núcleo atômico e empregou o eletromagnetismo clássico, pautando-se por uma equação análoga à de Sommerfeld para o átomo de hidrogênio; Uhlenbeck e Goudsmit não levantaram hipóteses sobre o núcleo atômico e empregaram aspectos da Teoria da Relatividade (cf. NHME, cap. 2).

42 Pauli resistiu em aceitar o uso de modelos para a descrição do átomo, em especial, o modelo proposto por Landé, o qual ganhou certa projeção entre os físicos da época; ao contrário, alegava a necessidade de evitar ao máximo a construção de imagens sobre tais sistemas, considerando que a ciência deveria se pautar por descrições matemáticas, sem vínculo com imagens e com os conceitos não quânticos da mecânica clássica (cf. NHME, cap. 2).

produção de conhecimento científico, dado que estas manifestações têm em sua base o mesmo quadro da experiência disponível. Dito de outro modo, o mesmo contexto teórico empírico é capaz de prover critérios, tanto de aceitação, quanto de rejeição.

Importa destacar que, pelo emprego da noção de MEIC, pode-se promover uma abordagem explícita de aspectos da natureza da ciência (históricos, epistêmicos, sociais, culturais, políticos). A NHME é potencialmente útil para discutir porque uma explicação científica é eleita em detrimento de outras explicações⁴³, os motivos que convertem determinados dados empíricos em evidência científica⁴⁴, como cientistas chegam a um consenso⁴⁵, quais critérios e valores são apontados pelos cientistas na tomada de decisões⁴⁶, a importância da divulgação das ideias e a disputa pela autoria⁴⁷, a busca pela ampliação da objetividade científica a partir da crítica pelos pares⁴⁸.

Tal como expusemos, conhecer aspectos da natureza da ciência é uma condição necessária para o ensino sobre as ciências, muito embora não garanta que o mesmo ocorra. O ponto em questão é que professores necessitam também de conhecimentos pedagógicos, ou seja, precisam conhecer métodos para que possam empreender uma abordagem didática adequada da natureza da ciência em sala de aula (BARBOSA; AIRES, 2018; BARTHOLOMEW; OSBORNE; RATCLIFFE, 2004; MOURA; GUERRA, 2016). Considerando a formação de professores de ciências, a noção de MEIC pode cumprir um duplo papel: como ferramenta analítica para elaboração de NHME e como recurso metodológico, pelo uso de NHME para abordagem de aspectos da natureza da ciência no EC em todos os níveis.

Conforme apontado por Forato, Pietrocola e Martins (2011), no que diz respeito ao uso da HdC nas situações de ensino, deve-se evitar possíveis equívocos relacionadas à didatização de materiais historiográficos, dentre as quais, as abordagens anacrônicas, a

43 Por exemplo, as razões de Pauli para rejeitar a bissociação de Landé, mas aceitar a bissociação de Thomas (cf. NHME, cap. 2).

44 Os motivos que levaram os dados espectroscópicos a serem a principal fonte de informação empírica para o problema do desdobramento das linhas espectrais, enquanto o experimento de Stern-Gerlach inicialmente não (cf. NHME, cap. 2).

45 A aceitação – e incorporação à teoria de Schrödinger – da ideia do elétron girante após as correções apresentadas por Thomas à ideia de Uhlenbeck e Goudsmit (cf. NHME, cap. 2).

46 A ideia do elétron girante de Uhlenbeck e Goudsmit, corrigida por Thomas, ajustava-se adequadamente aos dados experimentais, embora fosse inconsistente com a teoria clássica do elétron de Lorentz (cf. NHME, cap. 2).

47 O fluxo de correspondências entre Bohr e outros cientistas, a tentativa frustrada de Kronig em disseminar suas ideias sobre o elétron girante e sua posterior reinvidicação pela autoria das mesmas (cf. NHME, cap. 2).

48 A recusa de Pauli em aceitar elaborações sobre o spin do elétron que levassem em conta o uso de modelos, em detrimento de uma linguagem puramente matemática sem associar ao sistema imagens clássicas (cf. NHME, cap. 2).

descontextualização sócio-histórico-cultural e as narrativas linearizadas de episódios históricos. A este respeito, os autores sugerem a importância de que os professores possam “confrontar diferentes versões históricas, produzidas pela comunidade de especialistas com as narrativas ingênuas ou tendenciosas presentes, em geral, no ambiente educacional ou mesmo na divulgação científica” (FORATO; PIETROCOLA; MARTINS, 2011, p. 39). Consideramos que a noção de MEIC, enquanto ferramenta analítica, é potencialmente útil para a didatização de materiais historiográficos que se relacionem a algum processo de MEIC; a NHME pode contribuir para que o entendimento da atividade científica ocorra em contextos autênticos, “fundamentados na análise crítica, problematizadora e reflexiva da prática científica” (MENDONÇA, 2020, p. 10), ressaltando aspectos da ciência em construção, das ideias, incertezas e expectativas dos cientistas, condicionadas pelo contexto da época (MOURA; GUERRA, 2016).

A este respeito, ressaltamos que a análise genealógica de uma MEIC, orientada pelas categorias analíticas que propusemos anteriormente, possibilita evidenciar aspectos históricos e epistêmicos da produção do conhecimento científico (controvérsias, regras de validação, relações sociais e institucionais, aspectos lógicos, formais e metodológico da ciência, o papel dos experimentos, etc.), permitindo a articulação das dimensões histórica e epistêmica no EC, cuja importância é apontada por diferentes estudos (JIMÉNEZ-ALEIXANDRE; CRUJEIRAS, 2017; SASSERON; DUSCHL, 2016; VILAS BOAS *et al.*, 2013).

A noção de MEIC muito provavelmente implicará em narrativas históricas – NHME – circunscritas ao contexto das ciências básicas, aparentemente pouco relacionados com os objetivos democráticos da educação básica. Este aspecto decorre do fato de que nas ciências básicas os cientistas, embora orientados pelo paradigma vigente em seu campo, são relativamente livres para escolher os problemas com os quais irão lidar, ao contrário do que ocorre com o inventor ou o cientista aplicado, para os quais os problemas disponíveis costumam estar muito mais relacionados à contextos distantes da âmbito da ciência aplicada, normalmente determinados por circunstâncias sociais, econômicas ou militares (KUHN, 2009a).

No entanto, nos parece bastante plausível sugerir uma outra perspectiva. As razões que levam as pessoas a abrirem mão de critérios científicos mediante questões sócio científicas ou tecnocientíficas é que elas confiam mais em fatores que corroboram os seus valores morais, culturais, políticos e sociais (ACEVEDO *et al.*, 2005). Será que um maior conhecimento sobre as ciências não ampliaria a confiança das pessoas na própria ciência, passando a tê-la também como um valor, e portanto, como um fator determinante em suas decisões?

Se a resposta a esta questão for afirmativa, a noção de MEIC, mesmo restringindo-se a contextos mais específicos das ciências básicas – como é o caso do spin do elétron – podem contribuir para os objetivos democráticos da educação científica, ainda que indiretamente, afinal, mesmo no âmbito das ciências básicas, onde uma correlação explícita com as demandas sociais ou econômicas não ocorra, isto não impede que estudantes desenvolvam uma percepção mais positiva da atividade científica e da própria ciência como um todo, percebendo-a como um valor e um bem comum, podendo levar “a um maior senso de propriedade do empreendimento científico e a um maior apoio público à ciência e tecnologia” (DRIVER *et al.*, 1996, p. 10). Lembremos que o desenvolvimento científico depende de recursos financeiros consideráveis da sociedade, mas deve-se acrescentar que um país não faz ciência apenas com financiamentos, laboratórios e equipamentos; todo empreendimento científico requer também uma permanente oferta de recursos humanos. Assim, “para um país ter ciência, é necessário que sua sociedade possua uma visão do mundo norteada pela certeza de que a ciência, assim como seu produto, é a verdadeira geradora de bem-estar e progresso” (VERCESI *et al.*, 2002, p. 17). É desejável, portanto, que o público compartilhe dos objetivos e aspirações do empreendimento científico e isto requer uma cultura científica a ser fomentada principalmente por uma educação científica.

Ressaltamos que as categorias analíticas empregadas na análise do processo de MEIC referente à elaboração do CSE, apresentam certo caráter normativo. Contudo, salientamos que os aspectos da natureza da ciência estão encerrados nos episódios históricos e não nas categorias analíticas empregadas em sua análise – estas são apenas um meio de ressaltar tais aspectos. Dito de outro modo, a normatização que estamos sugerindo diz respeito ao nosso método de análise e não sobre os aspectos da natureza da ciência que dele podem emergir.

Ressaltamos também que diferentes processos de MEIC, isto é, diferentes estudos de caso, podem ressaltar, cada qual, diferentes aspectos da natureza da ciência e seria ingenuidade esperar que um único estudo de caso fosse capaz de encerrar todas as características da natureza da ciência. Desse modo, tal como apontado por Allchin (2014), destacamos a necessidade de um esforço de trabalho para ampliar o repertório de episódios históricos destinados ao EC, e consideramos que a noção de MEIC, como ferramenta analítica, é potencialmente útil para esta tarefa, uma vez que orienta a elaboração de narrativas históricas – NHME – em concordância com as boas práticas historiográficas, atualmente recomendadas pela literatura especializada (FORATO; PIETROCOLA; MARTINS, 2011). Vale lembrar que o uso didático de episódios históricos não consiste, por si só, em uma estratégia didática; o apoio de teorias psicológicas e pedagógicas para sua

implantação são fatores que não devem ser negligenciados (DAMASIO; PEDUZZI, 2017; FORATO; MARTINS; PIETROCOLA, 2012a; TEIXEIRA; GRECA; FREIRE JR., 2012).

Diante do exposto, consideramos ter apresentado argumentos convincentes quanto as potencialidades da noção de MEIC para prover conhecimentos específicos e pedagógicos sobre a natureza da ciência, necessários à formação docente, à educação científica e ao EC, mais adequados às concepções contemporâneas da ciência e comprometidos com as demandas sociais e democráticas. No entanto, temos clareza de que a realidade dos cursos de formação docente requer transformações substanciais.

5.6 SOBRE O ENSINO DE MECÂNICA QUÂNTICA

Nesta seção abordaremos aspectos que dialogam mais explicitamente com nossas investigações. Temos apresentado a noção de MEIC e a NHME como potenciais recursos pedagógicos – didático e analítico – para o EC e para a formação docente em ciências. Ressaltamos, contudo, que nosso estudo de caso – o CSE – pertence ao âmbito da Física Moderna (FM), mais especificamente à Mecânica Quântica (MQ). A abordagem de conceitos de FM e de MQ têm sido amplamente pesquisados nos âmbitos da formação de docente e do Ensino de Física (EF), nos níveis médio e superior, e atualmente tratam-se de campos de investigações já bem estabelecidos (GRECA; MOREIRA, 2001; SILVA; ARENGHI; LINO, 2013). É bastante evidente a afinidade de nosso estudo de caso com o ensino de MQ, seja este como campo de pesquisa ou como disciplina curricular.

A literatura nacional e internacional apresenta grande quantidade de estudos que apontam avanços e dificuldades na abordagem de conceitos de FM nos níveis de ensino básico e avançado, incluindo a formação de professores de física. No cenário brasileiro, as investigações ganharam impulso no início dos anos 1990 (PINTO, 1999; TERRAZZAN, 1992) e intensificaram-se significativamente a partir dos anos 2000 (OLIVEIRA; VIANNA; GERBASSI, 2007; OSTERMANN; MOREIRA, 2000; PEREIRA; OSTERMANN, 2009). Desde então, o tema vem ganhando destaque em eventos científicos relacionados ao EC (MARQUES *et al.*, 2019), indicando que a pertinência, o interesse e a produção científica da área continuam a avançar.

Os estudos iniciais buscavam produzir argumentos em favor da inclusão de temas de FM no ensino básico, apontando a necessidade de mudanças curriculares nesta direção. No

cenário brasileiro atual, esta temática está presente nas orientações curriculares oficiais, nos livros didáticos do ensino básico e tem sido objeto de teses e dissertações (SILVA; ARENGHI; LINO, 2013).

Os documentos curriculares brasileiros apresentam argumentos para que conceitos de FM sejam ensinados em nível básico, os quais fundamentam-se na importância atribuída à compreensão da estrutura da matéria e interações subatômicas, às implicações prática destes conceitos na produção tecnológica contemporânea e à importância dos processos de produção de radiações e sua interação com a matéria (BRASIL, 2002, 2018). A abordagem de tópicos relacionados com a física moderna e contemporânea como subsidiários para discussões sobre as rupturas conceituais ocorridas no campo da Física e sobre as questões atuais relacionadas à ciência, tecnologia e sociedade são também importantes argumentos em favor do ensino de FM no ensino básico (SILVA; ARENGHI; LINO, 2013).

O ensino da MQ é parte fundamental de muitos cursos de nível superior e dada a sua importância teórica e prática para muitas tecnologias contemporâneas, a MQ vem sendo abordada também em nível básico, aqui com um enfoque mais qualitativo (KRIJTENBURG-LEWERISSA *et al.*, 2019). A importância da MQ também relaciona-se com a construção de nossa atual visão de mundo, sendo imprescindível para a elaboração de muitos dispositivos como lasers, células solares e microchips, todos largamente empregados na produção tecnológica das sociedades contemporâneas (POSPIECH, 1999). Além disso, as manifestações macroscópicas de efeitos quânticos, como a supercondutividade e a superfluidade e as suas aplicações em cosmologia – estrelas de nêutrons e a gravidade quântica – evidenciam a abrangência e a confiança que diferentes comunidades especializadas na MQ (MITTELSTAEDT, 2003), além do que a “teoria quântica⁴⁹ é a teoria mais precisamente testada e bem-sucedida na história da ciência” (KLEPPNER; JACKIW, 2000).

As teorias físicas modernas da relatividade e da mecânica quântica modificaram inteiramente o quadro conceitual da física a partir do início do século XX, alterando nossas ideias sobre o espaço e o tempo, e também introduziram novos conceitos à física, como indeterminismo, probabilidades e não localidade (MÜLLER; WIESNER, 2002). A tecnologia quântica é altamente presente em nossos atuais sistemas de informação, localização e diagnóstico médico, além do que, vários tópicos permeiam o ideário popular, como teletransporte quântico, mundos paralelos e computadores quânticos (MOHAN, 2020; STADERMANN; VAN DEN BERG; GOEDHART, 2019).

A abordagem de conceitos da relatividade e da mecânica quântica na educação

49 O termo Física Quântica incorpora a Mecânica Quântica e a Teoria Quântica de Campos .

científica – e conseqüentemente na formação docente – relaciona-se também com aspectos sócio políticos e econômicos. A partir da década de 1950 o interesse científico volta-se para os produtos advindos dos conhecimentos da nova física (PEDUZZI, 2003), diretamente relacionados com questões armamentistas e com a corrida tecnológica deflagrada pela guerra fria, onde políticas governamentais e vultuosos investimentos buscaram aproximar a ciência e a tecnologia, influenciando as políticas de Ciência, Tecnologia e Inovação e os objetivos da educação científica de vários países – particularmente nos Estados Unidos e este exercendo grande influência no Brasil e na América Latina (OLIVEIRA, 2016) – e neste contexto, acelerando a formação de cientistas e engenheiros (HOLTON, 2003; OLIVEIRA, 2016).

O fato de que a Teoria da Relatividade e também a Mecânica Quântica terem firmado-se como estruturas conceituais bem estabelecidas é também um fator que levou pesquisadores e autores de livros didáticos a considerarem aquelas teorias como relevantes para o EF (PEDUZZI, 2003). Dada a grande quantidade de fenômenos corretamente descritos e previstos pela MQ, bem como suas implicações para muitas tecnologias de informação na atualidade e também na elaboração de dispositivos indispensáveis para os avanços da própria ciência (GARRITZ, 2013), esta teoria influencia diretamente um conjunto amplo de carreiras profissionais em todas as sociedades modernas.

Sem a mecânica quântica, não haveria economia global digna de menção, porque a revolução eletrônica que trouxe a era do computador é filha da mecânica quântica. E também a revolução fotônica que nos trouxe à era da informação. A criação da física quântica transformou nosso mundo, trazendo consigo todos os benefícios - e os riscos - de uma revolução científica. (KLEPPNER; JACKIW, 2000, p. 893).

Diante deste quadro, não à toa defende-se que estudantes sejam iniciados nos assuntos da MQ tão cedo quanto possível (JOHNSTON; CRAWFORD; FLETCHER, 1998).

Stadermann, van den Berg e Goedhart (2019) realizaram ampla análise de documentos curriculares oficiais de vários países buscando evidenciar os conceitos de MQ no EF em nível secundário daqueles países⁵⁰. Além das considerações sobre o adequado nível de profundidade com a qual a MQ deva ser abordada em nível médio, os autores afirmam que os currículos contemplam alguns temas mais centrais, como o efeito fotoelétrico, o comportamento onda partícula, o comprimento de onda de de Broglie, interferência de dupla fenda, a natureza

50 A referida investigação restringiu-se às propostas curriculares que apresentavam um enfoque relacionado com abordagens da natureza da ciência.

probabilística da MQ e o princípio da incerteza (STADERMANN; VAN DEN BERG; GOEDHART, 2019). Os autores destacam as considerações curriculares que orientam sobre a importância de que os estudantes desenvolvam conhecimentos sobre o papel e as limitações dos modelos na construção do conhecimento, uma vez que conceitos de MQ fazem referência a um modelo de partícula que difere do conceito clássico já previamente apresentado aos estudantes.

As partir das diretrizes metodológicas empregadas por Stadermann, van den Berg e Goedhart (2019), foram analisados 37 documentos curriculares oficiais atualizados, pertencentes a 15 países (Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Itália, Holanda, Noruega, Portugal, Espanha, Suécia e Reino Unido). Nenhum dos documentos curriculares analisados contempla explicitamente o CSE; dentre os 17 temas de MQ que sintetizam o conjunto de temas extraídos dos documentos curriculares analisados, um deles, o princípio de exclusão de Pauli – associado ao modelo de camadas do átomo e como uma explicação para a tabela periódica – relaciona-se diretamente com o CSE, estando presente em 4 dos 23 documentos curriculares selecionados pelos critérios da pesquisa, referentes a 2 dos 15 países considerados⁵¹.

Um importante resultado apresentado por Stadermann, van den Berg e Goedhart (2019) é o que os autores denominam por núcleo do currículo quântico – *Core Quantum Curriculum* – o qual consiste no conjunto de temas comumente presentes nos documentos curriculares dos países considerados. São eles: níveis discretos de energia (linhas espectrais); interações entre luz e matéria; dualidade onda partícula (complementariedade); ondas de matéria de de Broglie (aspectos quantitativos); aplicações tecnológicas da MQ (Semicondutores, LED, Laser); princípio da incerteza de Heisenberg; previsões probabilísticas. Outro ponto de interesse diz respeito às relações entre a temática da MQ e da NdC. Os autores afirmam que somente “alguns documentos curriculares tornam as conexões entre itens da MQ e aspectos específicos da NdC explícitas em seus resultados de aprendizagem” (STADERMANN; VAN DEN BERG; GOEDHART, 2019, p. 12), embora as referidas considerações sobre NdC estejam presentes de forma integrada e extensiva ao currículo de física, relacionados à habilidades cognitivas e aspectos epistemológicos. O autores ainda chamam a atenção para o fato de que em alguns dos países, estudantes em nível pré universitário prestam exames que contemplam os temas de MQ presentes no currículo daqueles países, e muitos dos documentos curriculares analisados incluem não apenas uma

51 A relação completa de temas de MQ presentes nos documentos curriculares dos países considerados na referida pesquisa encontra-se em Stadermann, van den Berg e Goedhart (2019, p. 10–11).

lista de tópicos de MQ a serem tratados, mas também instruções pedagógicas claras acerca dos objetivos pretendidos com o ensino destes temas.

Em relação ao cenário brasileiro, Marques *et al.* (2019) analisaram trabalhos sobre EF moderna e contemporânea em nível ensino básico, publicados em três importantes periódicos – Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Revista Brasileira de Ensino de Física, Revista Brasileira de Ciência e Tecnologia –. No período de 2008 à 2018 foram identificados 40 trabalhos dedicados à física moderna e contemporânea, dentre os quais 64% abordaram intervenções didáticas, 14% abordaram estudos de caso, 10% abordaram o tema com história e filosofia da ciência.

Considerando a literatura da área, em um âmbito geral há duas grandes problemáticas relacionadas ao ensino de MQ, uma delas envolvendo as abstrações e complexidades matemáticas que são inerentes à teoria, e a outra envolvendo as questões sobre como o formalismo da MQ é interpretado (JOHNSTON; CRAWFORD; FLETCHER, 1998; SINGH, 2008). Em nível superior, sobretudo na formação de professores de física, as investigações relacionadas ao ensino de MQ vêm apontando como problemática a excessiva ênfase dada à formulação matemática sem que ocorram as devidas correlações com aspectos conceituais da teoria, com suas interpretações e com os resultados experimentais (SOUZA *et al.*, 2021).

No que diz respeito às interpretações, a MQ é uma teoria física que apresenta um quadro aberto, portanto não consensual e ainda em discussão na comunidade científica especializada (FREIRE JR, 2021; PESSOA JR, 2006a). De um modo geral, a interpretação que se tem de uma teoria consiste em uma postura filosófica (ontológica e epistêmica) adotada em relação à teoria, não implicando, contudo, no modo de empregá-la.

O uso de uma teoria física é regido exclusivamente pelo seu formalismo matemático e a maneira como este se correlaciona com as leis, teoremas, conceitos, técnicas e metodologias, inerentes à teoria física em questão (PESSOA JR, 2006a). No caso da MQ, diferentes formulações matemáticas não relativísticas (ondulatória de Schrödinger, matricial de Heisenberg, trajetórias integrais de Feynman) sugerem diferentes ontologias, ou seja, diferentes entidades reais; de todo modo, “a interpretação adotada por um cientista não precisa refletir a interpretação natural sugerida pela teoria” (PESSOA JR, 2006a, p. 2).

Mediante tal abertura, as múltiplas interpretações constituem um desafio a parte para o ensino introdutório desta teoria. Além disso, o ensino de MQ implica em novas concepções sobre a realidade física (MOHAN, 2020) e tais concepções entram em conflito com as concepções da física clássica, com as quais os estudantes já tiveram contato anteriormente (STADERMANN; VAN DEN BERG; GOEDHART, 2019), isto é, a concepção dos objetos

quânticos em geral baseiam-se em extensões de imagens clássicas (MANNILA; KOPONEN; NISKANEN, 2002).

Apesar de as questões interpretativas da MQ serem consideradas assunto da filosofia, os trabalhos teóricos de John Bell demonstraram a possibilidade de colocar à prova algumas das questões interpretativas, como determinismo vs. indeterminismo e localidade vs. não localidade (BAILY *et al.*, 2010), o que de fato veio a ocorrer, a partir de experimentos recentes realizados em escala quântica. De acordo com Aspect (2015), a realização experimental decorrente dos desenvolvimentos teóricos de John Bell levam a concluir que:

[...] as previsões da mecânica quântica entram em conflito com o realismo local, em contradição com a crença de que o conflito tratava apenas de interpretação, mas não de previsões quantitativas. [...] A descoberta de Bell, portanto, mudou o debate de Einstein e Bohr da epistemologia ao domínio da física experimental. (ASPECT, 2015, p. 123).

É o caso, por exemplo, do experimento de *single-electron* – o experimento da fenda dupla realizado com elétrons individuais, o qual permitiu observar a dualidade onda partícula destes objetos quânticos – (TONOMURA *et al.*, 1989), e do experimento de *single-foton* – o experimento de fótons individuais, o qual possibilitou a observação da anti correlação quântica – (GRANGIER; ROGER; ASPECT, 1986).

De acordo com Freire Jr. (2003), evidências históricas apontam que as questões filosóficas em torno das interpretações da MQ estenderam-se para o contexto teórico e experimental, como é o caso do surgimento do periódico *Foundations on Physics* como ambiente de debate teórico sobre a física quântica na década de 1970, a organização de comunidades científicas em torno de campos de pesquisa teórico e experimental dedicados aos novos experimentos da MQ – dentre estes as desigualdades de Bell e a Decoerência⁵² – e a presença dos temas filosóficos relacionados às interpretações da MQ na pauta de eventos científicos contemporâneos de física teórica e experimental.

Em suma, o “crescimento da teoria e dos experimentos da informação quântica tornou a interpretação física da mecânica quântica mais relevante do que nunca para os físicos praticantes” (BAILY *et al.*, 2010, p. 69), isto é, certos aspectos que antes eram relegados à

52 Decoerência é o nome dado o processo dinâmico pelo qual um sistema quântico e o aparato experimental empregado na observação deste sistema interagem, de modo inevitável e irreversível, com o meio ambiente, manifestando assim propriedades clássicas; trata-se de um processo é totalmente descrito pela teoria quântica. Nesta perspectiva, propriedades clássicas não são intrínsecas aos objetos, mas resultam de suas interações com outros graus de liberdade. Para uma descrição introdutória, ver Kiefer (2003, p. 294–297).

discussões filosóficas podem agora ser considerados formalmente no âmbito da teoria⁵³, o que torna estes temas mais relevantes para as situações de ensino (FREIRE JR, 2003).

A literatura da área também aponta a falta de clareza dos textos didáticos em relação a opção interpretativa – ontológica e epistemológica – adotada pelos seus autores, cuja adoção implícita resulta em lacunas interpretativas presentes nos textos, que acabam se materializando em dificuldades interpretativas incorporadas pelos estudantes, bem como na falsa percepção de que o conteúdo da mecânica quântica apresentado pelos livros didáticos é correto e não está aberto à interpretações (MOHAN, 2020). Por outro lado, estudos sugerem que a abordagem das interpretações da MQ nas situações de ensino, tanto em nível médio quanto em nível superior, deveriam levar em conta de modo explícito o caráter aberto deste debate os modos pelos quais a interpretação de Copenhague difere das interpretações realistas (HENRIKSEN *et al.*, 2018).

Em nível médio o ensino de MQ é abordado de um modo mais qualitativo, buscando evitar as abstrações matemáticas relacionadas ao formalismo da teoria, além do que, novos recursos audiovisuais têm favorecido a percepção e interpretação de tópicos considerados mais complexos para o EF no referido nível de ensino (KRIJTENBURG-LEWERISSA *et al.*, 2019). Apesar das inovações metodológicas, persiste a problemática de estudantes empregarem uma visão clássica para compreender e interpretar objetos e sistemas quânticos (HUSEBY; BUNGUM, 2019; POSPIECH, 2000). Assim, uma das dificuldades apontadas pela literatura é a transição do determinismo característico das teorias clássicas, decorrente de uma ontologia em geral realista, para a interpretação probabilística da mecânica quântica, esta passível de interpretações sob diferentes ontologias, e sem qualquer aparato pictórico sob o qual seja possível apoiar-se para buscar uma visualização entre a correspondência do formalismo com os sistemas que eles descrevem, sendo este um contexto propício para correspondências inadequadas dos sistemas quânticos com algum análogo clássico (MOHAN, 2020).

Um exemplo típico desta problemática diz respeito ao uso dos termos “onda” e “partícula” que, no contexto da MQ, fazem referência ao comportamento de um objeto pertencente a um quadro ontológico diferente daquele da mecânica clássica. Por outro lado, a dualidade onda partícula pode ser considerada como um aspecto de grande importância para o ensino da MQ, uma vez que figura “entre os mais importantes *factos conceituados*, baseados em antecedentes empíricos diretos” (MANNILA; KOPONEN; NISKANEN, 2002, p. 46,

53 Para uma breve discussão dos experimentos mais recentes, realizados com o intuito de testar a desigualdade de Bell, ver Aspect (2015).

grifo dos autores). Desse modo, por tratar-se de um conceito cuja interpretação é fortemente demarcada por aspectos epistêmicos e ontológicos (PESSOA JR, 2006b), as situações de ensino relacionadas à dualidade onda partícula implicam em dificuldades adicionais quando a opção interpretativa não é explícita ou quando ela é pouco explorada.

O uso de abordagens que fazem uso de analogias clássicas e da evolução história de conceitos de MQ também são criticadas por não promoverem uma compressão satisfatória daqueles conceitos, além de adiarem o contato de estudantes com a fenomenologia quântica (cf. GRECA; FREIRE JR, 2003). Este quadro é reforçado pela compreensão limitada que estudantes desenvolvem acerca do princípio da correspondência, relacionado à interpretação de Copenhague, a qual é predominante em vários textos didáticos (KIEFER, 2003).

A não correspondência entre os objetos da física clássica e os objetos da física quântica conduziu a um impasse pedagógico, onde, de um lado encontram-se aqueles que advogam em favor de um ensino da mecânica quântica desconsiderando os desenvolvimentos da velha mecânica quântica, e do outro, aqueles que consideram a pertinência de uma abordagem da mecânica quântica levando em conta os modelos semiclássicos da velha mecânica quântica (MCKAGAN; PERKINS; WIEMAN, 2008; MOHAN, 2020).

Em relação a esta questão, a não correspondência do spin a nenhum conceito clássico poderia reforçar o argumento em desfavor do ensino da velha mecânica quântica. Contudo, a compreensão do spin não somente pode ser dada a partir de uma descrição não relativística (HALPRIN, 1978), como também possui um análogo clássico próximo (OHANIAN, 1986). Entendemos, portanto, que não se justifica o argumento de que abordagens que contemplem a velha mecânica quântica devam ser evitadas por causar confusão aos estudantes. Além disso, a velha mecânica quântica é parte da história dos desenvolvimentos da mecânica quântica. Omiti-la sob quaisquer argumentos implicaria em uma negligência histórica.

A literatura tem apontado enfaticamente a necessidade da adoção de estratégias didáticas inovadoras (SOUZA *et al.*, 2021). Autores como Mohan (2020), por exemplo, defendem evitar os textos didáticos que disseminam a crença do aprendizado centrado na resolução de problemas pelo uso exclusivo do formalismo matemático. Apesar do papel que o formalismo matemático tem a cumprir, abordagens didático metodológicas diferenciadas podem desempenhar outras funções, quais sejam enriquecer a compreensão dos conceitos abstratos da mecânica quântica e permitir a abordagem destes conceitos no ensino básico, como é caso do uso da história e filosofia da ciência, das abordagens investigativas, do emprego de simulações computacionais entre outras (MCKAGAN; PERKINS; WIEMAN, 2008; PEDUZZI, 2003; PEDUZZI; BASSO, 2005; RODRIGUEZ *et al.*, 2020; SINGH, 2008;

SOUZA *et al.*, 2021). De acordo com Peduzzi (2003), a ênfase dada ao formalismo matemático pode ser associada à negligência histórica e epistêmica dos textos didáticos:

A linearidade com que usualmente os conteúdos de física são veiculados pelos livros didáticos confere uma ênfase quase que exclusiva aos produtos do conhecimento científico, ignorando os processos de sua construção. Nessa perspectiva, a mecânica quântica é apresentada ao estudante como uma estrutura consensual, acabada, não problemática, dentro de uma *sequência natural* de desenvolvimento da física. Contudo, a descontextualização histórica das teorias fragmenta o conhecimento científico, tornando qualquer sequência didática artificial. A falsa ideia de que o último elo da cadeia parece sempre irrevogável é decorrência imediata. O resultado desse processo, combinado com o fato de que há uma grande abstração inerente aos conceitos da física quântica, notadamente, termina por conferir ao ensino dessa teoria, e também da relatividade, um enfoque iminentemente matemático, centrado na resolução de problemas. Um ensino com essa orientação parece ser bastante compatível com a crença amplamente disseminada no meio acadêmico de que o formalismo matemático esgota em si toda a essência do conhecimento. (PEDUZZI, 2003, p. 6, grifos do autor).

Contudo, abordagens historicamente orientadas podem também apresentar limitações, algumas delas facilmente encontradas em livros didáticos (KRAGH, 1992). Souza *et al.* (2021) relatam que o uso de textos originais como instrumento didático associado a história e a filosofia da ciência para o ensino de conceitos de MQ limitou a interação, o questionamento, o diálogo e a criatividade de estudantes de Licenciatura em Física. Frente a estas limitações, os autores optaram por utilizar trechos ao invés do texto na íntegra, procurando estimular o exercício da transposição didática dos conceitos abordados para o ensino médio, sendo esta é uma importante habilidade para os futuros docentes. Ainda de acordo com aqueles autores, a contextualização histórica é um importante elemento nas situações de ensino de MQ, pois “é uma estratégia capaz de estimular a análise dos contextos pelos quais cada conceito foi proposto, elucidando as relações e os aspectos centrais do pensamento científico em seus respectivos tempos” (SOUZA *et al.*, 2021, p. 919).

Aplicações da tecnologia quântica podem ser atrativas para estudantes em nível médio, além de possibilitarem a percepção de aplicação em novos contextos, embora não seja um tema tradicionalmente tratado em nível médio (STADERMANN; VAN DEN BERG; GOEDHART, 2019). A este respeito, Krijtenburg-Lewerissa *et al.* (2019) afirmam que temas introdutórias de MQ, considerados relevantes para a educação básica e pautados por uma perspectiva de ciência, tecnologia e sociedade, vêm sendo propostos. A ausência de estudos sistemáticos sobre quais temas seriam adequados e pertinentes motivou aqueles autores a

realizarem uma consulta à especialistas da área⁵⁴. Dentre os tópicos extraídos desta consulta, destacam-se: linhas espectrais; tunelamento; efeito fotoelétrico; probabilidade; dualidade onda partícula; experimento da fenda dupla; níveis de energia e quantização; átomo de hidrogênio; princípio da incerteza; Laser; função de onda.

Destacamos que o tópico das linhas espectrais foi o mais frequentemente apontado pelos especialistas consultados e o princípio da exclusão de Pauli, juntamente com o CSE, foram explicitamente destacados, sendo mencionadas as suas aplicações ao entendimento do magnetismo e dos orbitais, bem como suas aplicações tecnológicas nos transistores e na criptografia quântica (KRIJTENBURG-LEWERISSA *et al.*, 2019). Dentre as justificativas apresentadas pelos especialistas ouvidos na pesquisa, a complexidade – factível aos estudantes do ensino básico – e a pertinência tecnológica para promoção da literacia científica foram os argumentos mais comumente alegados. Os autores demonstram preocupações com potenciais subjetividades envolvidas na investigação e alegam que:

[...] esses especialistas são todos parte de um subgrupo específico de cientistas e pesquisadores acadêmicos, o que pode ter influenciado os resultados; os resultados deste estudo são provavelmente um subconjunto de pontos de vista sobre o que os alunos precisam saber e o que gostaríamos que eles soubessem. No entanto, o conhecimento do público em geral, da indústria, dos legisladores e até mesmo dos professores do ensino médio sobre a mecânica quântica é bastante limitado, o que torna difícil levar sua opinião em consideração sem primeiro lhes ensinar os fundamentos da mecânica quântica. (KRIJTENBURG-LEWERISSA *et al.*, 2019, p. 263).

Reconhecemos as especificidades do estudo acima descrito, sobretudo por envolver comunidades científicas e contextos de ensino em outro país. No entanto, em um relato bastante substancial, Belançon (2018) relata algumas de suas estratégias didáticas introdutórias ao ensino de MQ, praticadas em uma instituição brasileira de nível superior. Trata-se de um dos poucos trabalhos publicados onde o CSE é abordado em situações de ensino. O autor busca oferecer uma abordagem do CSE integrada à tecnologia e suas implicações sociais, em um curso de física moderna introdutória. Nesta proposta, alguns aspectos conceituais são previamente tratados – conceitos de quantização, modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio, ondas de matéria de de Broglie e equação de Schrödinger. Uma breve contextualização histórica é realizada, destacando a problemática dos espectros

54 A abrangência da referida investigação restringiu-se aos pesquisadores e cientistas de instituições na Holanda, com reconhecido domínio da mecânica quântica e bem posicionados nos campos de pesquisa e desenvolvimento; detalhes metodológicos podem ser verificados em Krijtenburg-Lewrissa *et al.* (2019).

anômalos do efeito Zeeman, a hipótese do elétron girante de Uhlenbeck e Goudsmit, o princípio da exclusão de Pauli e o modelo de Pauling para as ligações químicas baseado no CSE (BELANÇON, 2018).

Esta proposta, embora limitada em aspectos históricos, mostra-se bastante rica em relação ao aspecto tecnológico, uma vez que a aplicação técnica do CSE é explicitamente considerada: a capacidade magnética dos metais terras-raras (lantanídeos) é qualitativamente descrita em termos do CSE, do princípio da exclusão de Pauli e da regra de Madelung. Uma vez estabelecido o contexto de aplicação técnica do conceito de spin, são então destacadas as aplicações tecnológicas dos super ímãs na produção de energia limpa a partir da *tecnologia verde* – ou *tecnologia de baixa emissão de CO₂* – e os conflitos comerciais decorrentes da extração, compra e venda dos insumos diretamente relacionados com esta tecnologia (BELANÇON, 2018).

De acordo com o autor, a introdução do conceito de spin assim contextualizado mostra-se atrativo aos estudantes, embora reconheça que esta afirmação não seja um dado científico, isto é, baseia-se tão somente em sua percepção. Além deste aspecto, o CSE assim abordado...

[...] contribui para a discussão entre as interpretações da mecânica quântica, ilustrando para os alunos que enquanto todos estes aspectos da teoria ondulatória da matéria não eram totalmente entendidos, era natural que muitos cientistas tivessem certa resistência em aceitar a teoria; e que isso é saudável e naturalmente faz parte do processo de desenvolvimento científico. (BELANÇON, 2018, p. 4).

Propostas didáticas voltadas para a formação de professores também têm sido relatadas na literatura. Como já mencionado anteriormente, Souza et al. (2021) propõem uma sequência didática para estimular futuros docentes a realizarem a transposição didática de conceitos de mecânica quântica para o ensino médio. Dentre os conhecimentos a serem adquiridos os autores consideram o estudo histórico conceitual do Spin através da interpretação fenomenológica do experimento de Stern-Gerlach. Não deixa de nos chamar a atenção o fato de que estes autores valorizam, corretamente, o uso da história e filosofia da ciência, afirmando que “a compreensão histórico epistemológica não pode ser alcançada desarticulada da discussão conceitual” (SOUZA *et al.*, 2021, p. 921). No entanto, historicamente o experimento de Stern-Gerlach não esteve, ao menos de início, relacionado com a problemática do CSE (WEINERT, 1995); tal relação, apresentada em grande parte dos

livros textos de física, é vista como problemática (GOMES; PIETROCOLA, 2011). Apesar deste percalço histórico, o trabalho desenvolvido por Souza *et al.* (2021) têm outros méritos, dentre os quais: evidenciar melhoras significativas do aprendizado de conceitos da mecânica quântica pelos futuros professores; possibilitar a discussão do contexto histórico no qual o conceito foi proposto – o que consideramos desejável, mas não necessariamente do modo como proposto pelos autores; a articulação entre fontes primárias e historiográficas, possibilitando uma visão mais abrangente e consistente da atividade científica (SOUZA *et al.*, 2021).

Em relação à abordagens histórica e filosoficamente orientadas, Peduzzi (2003) relata que estudantes de nível superior não apresentaram dificuldades quanto a presença destes temas no material instrucional sobre conceitos de MQ⁵⁵, mas ressalta que aspectos da história e filosofia da ciência foram previamente discutidos para então serem articulados ao ensino. O autor afirma também que o uso de material de divulgação científica, seja de autoria de personagens que vivenciaram a construção dos conhecimentos abordados, seja por meio de obras historiográficas de relevância reconhecida, contribuem positivamente e constituem um complemento significativo no engajamento dos estudantes (PEDUZZI, 2003).

Em uma perspectiva semelhante, Peduzzi e Basso (2005) relatam que a elaboração de um texto histórico sobre o átomo de Bohr, orientado pela concepção epistêmica de Lakatos, foi bem recebido por professores do EF em nível médio. Nesta investigação, os autores também constataram que nenhuma obra didática brasileira abordava adequadamente o tema do átomo de Bohr, isto é, de um modo geral não apresentavam uma contextualização história adequada e reforçavam uma visão empirista sobre a construção dos conteúdos referentes ao tema (PEDUZZI; BASSO, 2005).

Vale ressaltar que o uso pedagógico da história da ciência têm sido objeto de grandes debates – alguns dos quais já abordamos anteriormente –, consistindo de uma área com métodos e problemáticas próprias. Vários trabalhos relatam dificuldades inerentes a abordagens de natureza histórica, incluindo-se aí os textos didáticos, sobretudo em situações de ensino de conceitos de MQ (GOMES; PIETROCOLA, 2011; GRECA; FREIRE JR, 2003; KRAGH, 1992). Conforme apontado por Kragh (1992):

Colocar os alunos em situações em que eles [(re)experimentam] – ou, como disse o

55 Dentre os conceitos de MQ abordados, estão: estrutura atômica da radiação e da matéria, modelo de Bohr, dualidade onda partícula, Teoria de Schrödinger para sistemas unidimensionais e átomo de hidrogênio (PEDUZZI, 2003).

historiador e filósofo Robin Collingwood, “reconstituem” os pensamentos do passado, é um método pedagógico legítimo e muitas vezes frutífero. É uma parte aceita da pesquisa histórica e permeia grande parte da educação nas ciências humanas. Mas o método requer que a reconstrução do passado seja baseada em fatos e não seja inventada com o propósito de criar um sentido de tradição metodológica e social que pode ser fictício. (KRAGH, 1992, p. 359, grifos do autor).

Pesquisas também têm indicado que a discussão de aspectos epistemológicos são potencialmente úteis para motivar e ajudar estudantes em nível médio a compreender elementos conceituais da mecânica quântica, além do que, as diferentes interpretações da mecânica quântica são apontadas como uma forma de atender ao objetivo mais amplo de abordagens com enfoque na natureza da ciência (STADERMANN; VAN DEN BERG; GOEDHART, 2019). Na educação básica, e apesar das limitações matemáticas que estudantes neste nível escolaridade apresentam em relação às abstrações do formalismo da MQ, autores sugerem que experimentos de pensamento envolvendo sistemas de dois estados – como é o caso do paradoxo EPR – podem ser uma porta de entrada para discussões conceituais e filosóficas sobre a MQ (POSPIECH, 1999, 2000). Neste contexto, alguns sistemas de dois estados têm um importante papel, como é o caso do spin do elétron (POPPER, 1997).

Os temas da MQ desempenham também um importante papel em discussões filosóficas sobre realismo científico, onde o conceito de spin tem um importância destacada por desempenhar um papel teórico crucial em vários subcampos, como a física dos átomos, moléculas, partículas, óptica quântica e matéria condensada (SAATSI, 2020), além do que, a aceitação inicial do spin do elétron não esteve vinculada a nenhuma medição experimental direta, isto é, atribui-se ao spin uma realidade sem uma confirmação experimental direta (MORRISON, 2007).

O conceito de spin possui também grande relevância nos experimentos mais recentes sobre os fundamentos da mecânica quântica. O paradoxo EPR, revisitado por David Bohm leva em conta o spin e não a posição e o momento, como originalmente proposto por Einstein, Podolsky e Rosen, transformando assim o experimento de pensamento de Einstein e seus colaboradores em algo experimentalmente testável (POPPER, 1997; POSPIECH, 2000). Spin figura como um conceito indispensável para a mecânica quântica, de tal modo que o êxito amplo e multifacetado desta teoria seria uma brutal coincidência sem o conceito de spin; em grande parte, muitos dos avanços em física teórica e aplicada e tecnológicos seriam inconcebíveis sem o conceito de spin; não há outro conceito alternativo que possa tomar o seu lugar; áreas como a química e a biologia molecular sedimentam muitos de seus

conhecimentos a partir de uma interface com a mecânica quântica e, em particular, com o conceito spin – fenômenos envolvendo a transferência de elétrons, íons, moléculas; ligações químicas; fotossíntese; periodicidade da tabela periódica; propriedades magnéticas da matéria; ressonância nuclear magnética; técnicas espectroscópicas para identificação de compostos orgânicos; etc – (BELANÇON, 2018; SAATSI, 2020). Um novo campo de desenvolvimentos tecnológicos, a spintrônica, está na base do desenvolvimento de dispositivos nanotecnológicos que inauguram a fase do processamento quântico de informações, uma vez que leva em conta o spin do elétron ao invés de sua carga elétrica, como ocorre na eletrônica clássica (AWSCHALOM; FLATTÉ; SAMARTH, 2002).

O ensino do CSE em cursos universitários de mecânica quântica elementar é um problema desafiador, uma vez que os textos didáticos situam-se entre o complexo tratamento relativístico de Dirac ou a adição *ad hoc* do spin no formalismo de Schrödinger, sendo este último insatisfatório, uma vez que o spin não surge naturalmente, além do que o correto valor para as energias de acoplamento spin órbita não podem ser obtidas sem as complexas correções relativísticas (WILLIAMS; ROBINSON, 1981). O tratamento dado ao spin do elétron nos livros didáticos avançados é também criticado pela ênfase dada ao caráter puramente quântico do spin, o qual deixa de ter este status mediante as sofisticadas teorias de grupo:

Os livros didáticos atuais frequentemente enfatizam o aspecto gerador de observáveis na mecânica quântica, mas é somente mencionado que este aspecto já existe na mecânica clássica. Como consequência, noções que já fazem sentido na teoria clássica são muitas vezes consideradas puramente quânticas: o spin é um exemplo notável de tal confusão (HESLOT, 1983, p. 1101).

Além do spin, outros aspectos da mecânica quântica e também da teoria quântica de campos podem ser apreciados do ponto de vista da mecânica clássica relativística. De acordo com Costella *et al.* (2001) aspectos da teoria de Dirac e a formulação de antipartículas de Feynman-Stueckelberg são algumas das situações recentemente tratadas a partir de um quadro conceitual dado puramente pela mecânica relativística.

Mediante o que expusemos nesta seção, faremos a seguir algumas considerações a respeito de como a noção de MEIC pode trazer potenciais contribuições para o ensino da mecânica quântica, em diferentes níveis e na formação de professores.

5.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE A NOÇÃO DE METÁFORA EPISTÊMICA INTRACIENTÍFICA E O ENSINO DE CONCEITOS DE MECÂNICA QUÂNTICA

Na seção anterior buscamos estabelecer um quadro geral das investigações referentes ao ensino da MQ, apontando algumas das problemáticas levantadas por diferentes estudos. Levando em conta este quadro geral, passaremos agora a destacar algumas potencialidades da noção de MEIC e da NHME para o ensino de MQ.

Conforme apontado anteriormente, vários documentos curriculares incluem considerações sobre o ensino de FM, em particular o ensino de MQ. O conceito de spin figura entre os tópicos de ensino, seja de modo direto ou indireto. Salientamos que o spin do elétron é um dos objetos centrais de nosso estudo de caso. Argumentaremos que a narrativa histórica derivada da análise genealógica do CSE – a NHME – é potencialmente útil para as situações de ensino em qualquer nível, desde que adequadamente didatizada. Ela possibilita articular aspectos históricos, filosóficos, conceituais e tecnológicos decorrentes do conceito de spin, contribuindo assim para um ensino mais contextualizado. O papel do spin no desenvolvimento de muitas tecnologias contemporâneas torna este conceito potencialmente útil para discutir as relações e os impactos das tecnologias com a sociedade e com o meio ambiente.

Como já indicado, as possibilidades de conexão entre o conceito de spin com temas filosóficos e tecnológicos é também uma potencial contribuição para estabelecer relações entre conceitos de MQ e aspectos da natureza da ciência, algo que vem sendo apontado por alguns atores como necessário.

Apontamos também que a importância do ensino de MQ em nível médio é consenso na literatura, assim como o uso de estratégias didáticas que incorporam a história e a filosofia da ciência. No entanto, propostas envolvendo abordagens histórico-filosóficas de temas de MQ são pouco frequentes na literatura, e as abordagens históricas presentes nos livros didáticos, não raro são inadequadas. Neste contexto, a noção de MEIC mostra-se potencialmente relevante, uma vez que implica naturalmente em estudos de caso; a análise genealógica da MEIC, tal como propusemos, além de contemplar um conceito central na MQ, implica na elaboração rigorosa de uma narrativa histórico-filosófica, a NHME que definimos anteriormente. possibilitando articular aspectos históricos, conceituais e tecnológicos decorrentes do conceito de spin, promovendo o ensino contextualizado deste tema e abrindo caminho para explorar as relações e os impactos daquelas tecnologias com a sociedade e com

o meio ambiente.

A persistente busca de imagens mecânicas para compreender sistemas quânticos é apontada na literatura como uma das dificuldades no ensino de MQ. Este aspecto tende a ser acentuado pela compreensão inadequada do princípio da correspondência, este associado à interpretação de Copenhague, predominante em vários textos didáticos. O estudo de caso que apresentamos é potencialmente útil para o ensino do CSE no contexto da velha mecânica quântica. Além disso, a NHME trata explicitamente das discussões acerca da natureza do spin e suas implicações para a interpretação de Copenhague, podendo assim enriquecer as situações de ensino.

Como vimos, alguns conceitos de MQ são considerados muito importantes para esclarecer aspectos daquela teoria, evidenciando algumas diferenças entre as visões de mundo quântica e clássica. De um modo geral, as diferentes interpretações da MQ assumem diferentes estatutos ontológicos e epistêmicos para estes conceitos e a adoção de um ou outro quadro interpretativo é por vezes implícita ou não adequadamente explorada, além do que, as concepções clássicas previamente aprendidas pelos estudantes podem do mesmo modo contribuir negativamente para as situações de ensino. Neste sentido, o conceito de spin é potencialmente útil para discutir as diferenças entre a visão de mundo da física clássica e da física quântica, além do que os aspectos relacionadas à natureza do spin (se puramente quântico ou não) retratadas na NHME podem permitir discutir limitações do princípio da correspondência, e portanto, da interpretação de Copenhague.

Conforme exposto anteriormente, a inserção de discussões filosóficas, além de contornar a ênfase dada ao formalismo matemático e a resolução de problemas nas abordagens de ensino de MQ mais tradicionais, contribui para um melhor entendimento dos aspectos conceituais e dos sistemas quânticos. A NHME referente ao estudo de caso que realizamos é potencialmente útil para abordar aspectos filosóficos da mecânica quântica nas situações de ensino; dado que o spin do elétron não pode ser medido diretamente, este conceito tem importante papel em discussões sobre o realismo; a noção de spin também relaciona-se com o problema da não localidade, tornando este conceito útil para introduzir discussões sobre estados emaranhados, isto é, o paradoxo EPR, e sobre o papel dos experimentos mentais.

Os pontos levantados anteriormente são ainda mais problemáticos quando considera-se a formação de professores. As dificuldades e limitações na compreensão de conceitos de MQ irão impactar diretamente na atuação destes profissionais, ampliando assim a extensão do problema para o ensino básico. Como consequência, o ensino de conceitos de MQ em nível

médio fica prejudicado, seja pelas limitações conceituais dos docentes ou pela não inclusão destes temas nos planos de ensino. A este respeito, resultados positivos são relatados na literatura quando estudos de caso são apresentados a licenciandos de física, com o intuito de estimular a transposição didática de temas de MQ para o nível médio. Em relação a este aspecto, consideramos que a noção de MEIC é potencialmente útil como instrumento analítico. A elaboração de NHME pode favorecer uma compreensão mais profunda dos temas de MQ – aqui, em especial, sobre o spin do elétron – além de orientar a elaboração de textos histórico-filosóficos a partir da didatização de narrativas históricas derivadas de processos de metáfora epistêmica.

Por fim, consideramos que os pontos destacados nesta seção constituem argumentos suficientes em favor da noção de MEIC e da NHME como importantes instrumentos para o ensino de MQ. Nossa argumentação não está fundamentada em dados científicos, isto é, tudo que afirmamos constituem potencialidades que, diante do esforço despendido até aqui, mostram-se como objetivos promissores para investigações futuras.

Referências

- ABD-EL-KHALICK, F.; LEDERMAN, N. G. The Influence of History of Science Courses on Students' Views of Nature of Science. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 37, n. 10, p. 1057–1095, 2000a.
- ABD-EL-KHALICK, F.; LEDERMAN, N. G. Improving science teachers' conceptions of nature of science: a critical review of the literature. **International Journal of Science Education**, v. 22, n. 7, p. 665–701, jul. 2000b.
- 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, abr. 2005.
- ALLCHIN, D. Evaluating knowledge of the nature of (whole) science: Evaluating Knowledge of Nature of (Whole) Science. **Science Education**, v. 95, n. 3, p. 518–542, maio 2011.
- ALLCHIN, D. Beyond the Consensus View: Whole Science. **Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education**, v. 17, n. 1, p. 18–26, 2 jan. 2017.
- ALLCHIN, D.; ANDERSEN, H. M.; NIELSEN, K. Complementary Approaches to Teaching Nature of Science: Integrating Student Inquiry, Historical Cases, and Contemporary Cases in Classroom Practice. **Science Education**, v. 98, n. 3, p. 461–486, maio 2014.
- ALMEIDA, H. A. DE. As concepções sobre analogias no discurso de licenciandos em ciências biológicas. **Góndola, enseñanza y aprendizaje de las ciencias**, v. 15, n. 1, p. 101–117, 26 dez. 2019.

ALMEIDA, H. A. DE; DINIZ, R. E. DA S. A Tomada de Consciência sobre o uso de Analogias Espontâneas: Contribuições de uma Formação Continuada Desenvolvida com Professoras de Ciências. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 26, p. e20067, 2020.

AMARAL, L. DE O.; SOARES, S. M.; MELO, M. S. Utilização de Analogias em Seis Livros Didáticos de Química Aprovados no PNLD 2018: uma análise sobre estrutura atômica. **Revista Prática Docente**, v. 5, n. 2, p. 1019–1039, 31 ago. 2020.

ARISTÓTELES. **Poética**. Tradução: Eudoro De Sousa. 4. ed. Maia: Imprensa Nacional Casa da Moeda, 1994.

ARTHURY, L. H. M.; TERRAZZAN, E. A. A Natureza da Ciência na escola por meio de um material didático sobre a Gravitação. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 3, 19 fev. 2018.

ASPECT, A. Closing the Door on Einstein and Bohr's Quantum Debate. **Physics**, v. 8, p. 123, 16 dez. 2015.

AWSCHALOM, D. D.; FLATTÉ, M. E.; SAMARTH, N. Spintronics. **Scientific American**, v. 286, n. 6, p. 66–73, jun. 2002.

BAILY, C. et al. **Interpretation in Quantum Physics as Hidden Curriculum**. . In: 2010 PHYSICS EDUCATION RESEARCH CONFERENCE. Portland, (Oregon): 2010. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.3515251>>. Acesso em: 12 out. 2021

BARBOSA, F. T.; AIRES, J. A. A natureza da ciência e a formação de professores: um diálogo necessário. **ACTIO: Docência em Ciências**, v. 3, n. 1, p. 115, 13 fev. 2018.

BARTHOLOMEW, H.; OSBORNE, J.; RATCLIFFE, M. Teaching students “Ideas-About-Science”: Five dimensions of effective practice. **Science Education**, v. 88, n. 5, p. 655–682, set. 2004.

BASSALO, J. M. F. A Importância do Estudo da História da Ciência. **Revista da SBHC**, v. 8, p. 57–66, 1992.

BEJARANO, N. R. R.; ADURIZ-BRAVO, A.; BONFIM, C. S. Natureza da Ciência (NOS): para além do consenso. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 25, n. 4, p. 967–982, out. 2019.

BELANÇON, M. P. O ensino do spin: uma abordagem integrada a tecnologia e a sociedade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 4, p. 1–4, 7 maio 2018.

BLACK, M. Metaphor. **Proceedings of the Aristotelian Society, New Series**, v. 5, p. 273–294, 1955.

BOZELLI, F. C.; NARDI, R. O uso de analogias no ensino de Física em nível Universitário: interpretações sobre o discurso do professor e dos alunos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 6, n. 3, p. 17, 2006.

BOZELLI, F. C.; NARDI, R. Interações discursivas e o uso de analogias no ensino de Física. **Investigação em Ensino de Ciências**, v. 17, n. 1, 2012.

BRASIL. **Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio.** Ministério da Educação, Secretaria de Educação Média e Tecnológica, , 2000.

BRASIL. **PCN+ Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias.** Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, , 2002.

BRASIL. **Resolução nº 7/2010.** Ministério da Educação, Conselho Nacional de Educação, Câmara de Educação Básica, , 2010.

BRASIL. **Parecer CNE/CEB nº 5/2011.** Ministério da Educação, Secretaria de Educação Média e Tecnológica, , 2011.

BRASIL. **Edital de Convocação 01/2017 - PNLD 2019** Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, , 2017.

BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular: Ensino Médio** Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, , 2018.

BRUSH, S. G. Should the History of Science Be Rated X? **Science, New Series**, v. 183, n. 4130, p. 1164–1172, 1974.

CAVALCANTE, S.; FERREIRA, L. C.; GUALDA, R. Metáfora: diferentes perspectivas. **SCRIPTA**, v. 20, n. 40, p. 8–17, 2016.

CLEMENT, J. Using bridging analogies and anchoring intuitions to deal with students' preconceptions in physics. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 30, n. 10, p. 1241–1257, dez. 1993.

COSTELLA, J. P. et al. The Thomas rotation. **American Journal of Physics**, v. 69, n. 8, p. 837–847, ago. 2001.

CRUZ-HASTEINREITER, R. S. DA. **Das palavras aos quanta: analogias em aulas de física quântica.** . In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS. Águas de Lindóia: 2015.

CURTIS, R. V.; REIGELUTH, C. M. The use of analogies in written text. **Instructional Science**, v. 13, n. 2, p. 99–117, jul. 1984.

DAGHER, Z. R. Review of studies on the effectiveness of instructional analogies in science education. **Science Education**, v. 79, n. 3, p. 295–312, jun. 1995.

DAMASIO, F.; PEDUZZI, L. O. Q. História e filosofia da ciência na educação científica: para quê? **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)**, v. 19, n. 0, 2017.

DE OLIVEIRA, R. A.; SILVA, A. P. B. DA. História da Ciência e Ensino de Física: uma análise meta-histórica. In: PEDUZZI, L. O. Q.; MARTINS, A. F. P.; FERREIRA, J. M. H. (Eds.). **Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino.** Natal: EDUFRRN Editora da UFRN, 2012. p. 41–64.

DELIZOICOV, N. C.; CARNEIRO, M. H. DA S.; DELIZOICOV, D. O movimento do sangue no corpo humano: do contexto da produção do conhecimento para o do seu ensino. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 10, n. 3, p. 443–460, dez. 2004.

DRIVER, R. et al. **Young people's images of science**. Buckingham; Bristol, PA: Open University Press, 1996.

DUARTE, M. DA C. Analogias na educação em ciências: contributos e desafios. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 10, n. 1, p. 7–29, 2005.

DUIT, R. On the role of analogies and metaphors in learning science. **Science Education**, v. 75, n. 6, p. 649–672, nov. 1991.

DUSCHL, R. Science Education in Three-Part Harmony: Balancing Conceptual, Epistemic, and Social Learning Goals. **Review of Research in Education**, v. 32, n. 1, p. 268–291, fev. 2008.

FERREIRA, G. K.; CUSTÓDIO, J. F. Cenários do Debate sobre a Natureza da Ciência nos Cursos de Licenciatura em Física no Brasil. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 38, n. 2, p. 1022–1066, 20 set. 2021.

FERRY, A. DA S.; PAULA, H. DE F. E. Mapeamento estrutural de analogias enunciadas em uma aula sobre cinética química. **Ciênc e Educação (Bauru)**, v. 23, n. 1, p. 29–50, 2017a.

FERRY, A. DA S.; PAULA, H. DE F. E. Mapeamento estrutural de analogias enunciadas em uma aula sobre cinética química. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 23, n. 1, p. 29–50, mar. 2017b.

FORATO, T. C. DE M. A Filosofia Mística e a Doutrina Newtoniana: uma discussão historiográfica. **ALEXANDRIA Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, v. 1, n. 3, p. 29–53, 2008.

FORATO, T. C. DE M.; MARTINS, R. DE A.; PIETROCOLA, M. Enfrentando Obstáculos na Transposição Didática da História da Ciência para a Sala de Aula. In: PEDUZZI, L. O. Q.; MARTINS, A. F. P.; FERREIRA, J. M. H. (Eds.). **Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino**. Natal: EDUFRRN Editora da UFRN, 2012a. p. 123–154.

FORATO, T. C. DE M.; MARTINS, R. DE A.; PIETROCOLA, M. History and Nature of Science in High School: Building Up Parameters to Guide Educational Materials and Strategies. **Science & Education**, v. 21, n. 5, p. 657–682, 2012b.

FORATO, T. C. DE M.; PIETROCOLA, M.; MARTINS, R. D. A. Historiografia e natureza da ciência na sala de aula. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 27–59, 5 jul. 2011.

FREIRE JR, O. A Story Without an Ending: The Quantum Physics Controversy 1950–1970. **Science & Education**, v. 12, p. 573–586, 2003.

FREIRE JR, O. O centenário debate sobre a interpretação e os fundamentos da Física Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 4, n. 3, p. 1047–1066, 2 set. 2021.

- GALAGOVISK, L.; ADÚRIZ-BRAVO, A. Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales: el concepto de modelo Didático Analógico. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 19, n. 2, p. 231–242, 2001.
- GARRITZ, A. Teaching the Philosophical Interpretations of Quantum Mechanics and Quantum Chemistry Through Controversies. **Science & Education**, v. 22, n. 7, p. 1787–1807, jul. 2013.
- GENTNER, D. Structure-Mapping: A Theoretical Framework for Analogy. **Cognitive Science**, v. 7, n. 2, p. 155–170, abr. 1983.
- GENTNER, D. The mechanisms of analogical learning. In: VOSNIADOU, S.; ORTONY, A. (Eds.). **Similarity and analogical reasoning**. New York: Cambridge University Press, 1989. p. 199–241.
- GINGRAS, Y. The Creative Power of Formal Analogies in Physics: The Case of Albert Einstein. **Science & Education**, v. 24, n. 5–6, p. 529–541, jul. 2015.
- GLYNN, S. M. Teaching Science With Analogy: A Strategy for Teachers and Textbook Authors. **National Reading Research Center**, v. 15, p. 9–33, 1994.
- GOMES, G. G.; PIETROCOLA, M. O experimento de Stern-Gerlach e o spin do elétron: um exemplo de quasi-história. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 2, jun. 2011.
- GRANGIER, P.; ROGER, G.; ASPECT, A. Experimental Evidence for a Photon Anticorrelation Effect on a Beam Splitter: A New Light on Single-Photon Interferences. **Europhysics Letters (EPL)**, v. 1, n. 4, p. 173–179, 15 fev. 1986.
- GRECA, I. M.; FREIRE JR, O. Does an Emphasis on the Concept of Quantum States Enhance Students' Understanding of Quantum Mechanics? v. 12, p. 541–557, 2003.
- GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Uma Revisão da Literatura Sobre Estudos Relativos ao Ensino de Mecânica Quântica Introdutória. **Investigação em Ensino de Ciências**, v. 6, p. 29–56, 2001.
- HALPRIN, A. Pedagogy of spin in nonrelativistic quantum mechanics. v. 46, n. 7, p. 768, 1978.
- HARRES, J. B. S. Uma Revisão de Pesquisas nas Concepções de Professores Sobre a Natureza da Ciência e suas Implicações para o Ensino. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 4, n. 3, p. 197–211, 1999.
- HENRIKSEN, E. K. et al. What Is Light?: Students' Reflections on the Wave-Particle Duality of Light and the Nature of Physics. **Science & Education**, v. 27, n. 1–2, p. 81–111, mar. 2018.
- HESLOT, A. Classical mechanics and the electron spin. **American Journal of Physics**, v. 51, n. 12, p. 1096–1102, dez. 1983.
- HODSON, D. In search of a meaningful relationship: an exploration of some issues relating to integration in science and science education. **International Journal of Science Education**, v. 14, n. 5, p. 541–562, nov. 1992.

HODSON, D. Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio. **Enseñanza de las Ciencias. Revista de investigación y experiencias didácticas**, v. 12, n. 3, p. 299, 13 jan. 1994.

HOLTON, G. The Project Physics Course, Then and Now. **Science & Education**, v. 12, n. 8, p. 779–786, nov. 2003.

HOLYOAK, K. J.; THAGARD, P. Analogical Mapping by Constraint Satisfaction. **Cognitive Science**, v. 13, n. 3, p. 295–355, jul. 1989.

HOLYOAK, K. J.; THAGARD, P. The Analogical Mind. **American Psychologist**, v. 52, n. 1, p. 35–44, 1997.

HÖTTECKE, D.; HENKE, A.; RIESS, F. Implementing History and Philosophy in Science Teaching: Strategies, Methods, Results and Experiences from the European HIPST Project. **Science & Education**, v. 21, n. 9, p. 1233–1261, set. 2012.

HUSEBY, A.; BUNGUM, B. Observation in quantum physics: challenges for upper secondary physics students in discussing electrons as waves. **Physics Education**, v. 54, n. 6, p. 1–6, nov. 2019.

IRWIN, A. R. Historical case studies: Teaching the nature of science in context. **Science Education**, v. 84, n. 1, p. 5–26, jan. 2000.

IRZIK, G.; NOLA, R. New Directions for Nature of Science Research. In: MATTHEWS, M. R. (Ed.). **International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. p. 999–1021.

JIMÉNEZ-ALEIXANDRE, M. P.; CRUJEIRAS, B. Epistemic Practices and Scientific Practices in Science Education. In: TABER, K. S.; AKPAN, B. (Eds.). **Science Education**. Rotterdam: SensePublishers, 2017. p. 69–80.

JOHNSTON, I. D.; CRAWFORD, K.; FLETCHER, P. R. Student difficulties in learning quantum mechanics. **International Journal of Science Education**, v. 20, n. 4, p. 427–446, abr. 1998.

KELLY, G. J. Inquiry, Activity, and Epistemic Practice. In: DUSCHL, R. A.; GRANDY, R. E. (Eds.). **Teaching Scientific Inquiry: Recommendations for Research and Implementation**. Rotterdam: Sense Publishers, 2008. p. 99–122.

KIEFER, C. On the interpretation of quantum theory: from the Copenhagen to the present day. In: CASTELL, L.; ISCHEBECK, O. (Eds.). **Time, Quantum and Information**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003. p. 291–299.

KINOUCI, O. Metáforas científicas no discurso jornalístico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, n. 4, p. 1–12, 2012.

KLASSEN, S. The Construction and Analysis of a Science Story: A Proposed Methodology. **Science & Education**, v. 18, n. 3–4, p. 401–423, abr. 2009.

KLEPPNER, D.; JACKIW, R. One Hundred Years of Quantum Physics. **Science**, v. 289, n. 5481, p. 893–898, 11 ago. 2000.

KOESTLER, A. **The act of creation**. London: Last Century Media, 2014.

KOPP, F. A.; ALMEIDA, V. D. Analogias e metáforas no ensino de Física Moderna apresentadas nos livros didáticos aprovados pelo PNLD 2018. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 36, n. 1, p. 69–98, 13 maio 2019.

KRAGH, H. A sense of history: History of science and the teaching of introductory quantum theory. **Science and Education**, v. 1, n. 4, p. 349–363, dez. 1992.

KRIJTENBURG-LEWERISSA, K. et al. Key topics for quantum mechanics at secondary schools: a Delphi study into expert opinions. **International Journal of Science Education**, v. 41, n. 3, p. 349–366, 11 fev. 2019.

KUHN, T. S. **A estrutura das revoluções científicas**. 5. ed. São Paulo: Perspectiva, 1970.

KUHN, T. S. A tensão essencial: tradição e inovação na pesquisa científica. In: **A tensão essencial: estudos selecionados sobre tradição e mudança científica**. São Paulo: Editora UNESP, 2009a. p. 241–255.

KUHN, T. S. Tradição matemática versus tradição experimental no desenvolvimento das ciências físicas. In: **A tensão essencial: estudos selecionados sobre tradição e mudança científica**. São Paulo: Editora UNESP, 2009b. p. 55–88.

LEDERMAN, N. G. Students' and teachers' conceptions of the nature of science: a review of the research. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 29, n. 4, p. 331–359, abr. 1992.

LEDERMAN, N. G. et al. Views of nature of science questionnaire: Toward valid and meaningful assessment of learners' conceptions of nature of science. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 39, n. 6, p. 497–521, ago. 2002.

LEDERMAN, N. G. Nature of Science: Past, Present, and Future. In: ABELL, S. K.; LEDERMAN, N. G. (Eds.). **Handbook of Research on Science Education**. 1. ed. New York: Routledge, 2007. p. 831–879.

MANNILA, K.; KOPONEN, I. T.; NISKANEN, J. A. Building a picture of students' conceptions of wave- and particle-like properties of quantum entities. **European Journal of Physics**, v. 23, n. 1, p. 45–53, 1 jan. 2002.

MARQUES, T. C. DE F. et al. Ensino de física moderna e contemporânea na última década: revisão sistemática de literatura. **Scientia Plena**, v. 15, n. 7, p. 1–8, 9 ago. 2019.

MARTINS, A. F. P. Natureza da Ciência no ensino de ciências: uma proposta baseada em “temas” e “questões”. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, n. 3, p. 703, 12 maio 2015.

MATTHEWS, M. R. History, philosophy, and science teaching: The present rapprochement. **Science and Education**, v. 1, n. 1, p. 11–47, 1992.

MCCOMAS, W. F. Seeking historical examples to illustrate key aspects of the nature of science. **Science & Education**, v. 17, n. 2–3, p. 249–263, fev. 2008.

MCCOMAS, W. F.; ALMAZROA, H.; CLOUGH, M. P. The Nature of Science in Science Education: an introduction. **Science & Education**, v. 7, n. 6, p. 511–532, 1998.

MCCOMAS, W. F.; OLSON, J. K. The Nature of Science in International Science Education Standards Documents. In: MCCOMAS, W. F. (Ed.). . **The Nature of Science in Science Education**. Science & Technology Education Library. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. v. 5p. 41–52.

MCKAGAN, S. B.; PERKINS, K. K.; WIEMAN, C. E. Why we should teach the Bohr model and how to teach it effectively. **Physical Review Special Topics - Physics Education Research**, v. 4, n. 1, p. 010103, 6 mar. 2008.

MENDONÇA, P. C. C. De que Conhecimento sobre Natureza da Ciência Estamos Falando? **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 26, p. e20003, 2020.

MITTELSTAEDIT, P. Interpreting quantum mechanics: in the light of quantum logic. In: CASTELL, L.; ISCHEBECK, O. (Eds.). . **Time, Quantum and Information**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003. p. 281–290.

MOHAN, A. K. Philosophical Standpoints of Textbooks in Quantum Mechanics. **Science & Education**, v. 29, n. 3, p. 549–569, jun. 2020.

MORAIS, A. M. et al. A natureza da ciência na educação em ciência: teorias e práticas. **Praxis Educativa**, v. 13, n. 1, p. 8–32, 2018.

MORRISON, M. Spin: all is not what it seems. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 38, n. 3, p. 529–557, set. 2007.

MOURA, B. A. O que é natureza da Ciência e qual sua relação com a História e Filosofia da Ciência? v. 7, n. 1, p. 15, 2014.

MOURA, C. B. DE; GUERRA, A. Cultural History of Science: A Possible Path for Discussing Scientific Practices in Science Teaching? **Revista Brasileira de Pesquisa em Ensino de Ciências**, v. 16, n. 3, p. 749–771, 2016.

MOZZER, N. B.; JUSTI, R. “Nem tudo que reluz é ouro”: Uma discussão sobre analogias e outras similaridades e recursos utilizados no ensino de Ciências. v. 15, p. 25, 2015.

MÜLLER, R.; WIESNER, H. Teaching quantum mechanics on an introductory level. **American Journal of Physics**, v. 70, n. 3, p. 200–209, mar. 2002.

NAGEM, R. L.; CARVALHAES, D. DE O.; DIAS, J. A. Y. T. Uma proposta de metodologia de ensino com analogias. **Revista Portuguesa de Educação**, v. 14, n. 1, p. 197–213, 2001.

NERSESSIAN, N. J. How do scientists think? capturing the dynamics of conceptual change in science. In: **Cognitive Models of Science**. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1992. v. 15p. 3–44.

NORRIS, S. P. et al. A theoretical framework for narrative explanation in science. **Science Education**, v. 89, n. 4, p. 535–563, jul. 2005.

- OHANIAN, H. C. What is spin. **American Journal of Physics**, v. 54, n. 6, p. 500–505, 1986.
- OLIVA, J. M. et al. Una propuesta didáctica basada en la investigación para el uso de analogías en la enseñanza de las ciencias. **Enseñanza de las Ciencias. Revista de investigación y experiencias didácticas**, v. 19, n. 3, p. 453, 13 jan. 2001.
- OLIVA, J. M. Qué conocimientos profesionales deberíamos tener los profesores de ciencias sobre el uso de analogías. **Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias**, v. 5, n. 1, p. 15–28, 2008.
- OLIVEIRA, F. F. DE; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. S. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 3, p. 447–454, 2007.
- OLIVEIRA, J. J. DE. Ciência, tecnologia e inovação no Brasil: poder, política e burocracia na arena decisória. **Revista de Sociologia e Política**, v. 24, n. 59, p. 129–147, set. 2016.
- OLIVEIRA, T. M. A.; MOZZER, N. B. Análise dos conhecimentos declarativo e procedimental de futuros professores de química sobre analogias. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)**, v. 19, n. 0, 2017.
- OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão da bibliografia sobre a área de pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio”. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 5, n. 1, p. 23–48, 2000.
- PALMA, H. **Ciencia y metáforas: crítica de una razón incestuosa**. Buenos Aires: Prometeu Libros, 2015.
- PEDUZZI, L. O. Q. Física e filosofia: uma aproximação através de um texto na disciplina estrutura da matéria. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 3, n. 2, p. 5–20, 2003.
- PEDUZZI, L. O. Q.; BASSO, A. C. Para o ensino do átomo de Bohr no nível médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 4, p. 545–557, dez. 2005.
- PEREIRA, A. P.; OSTERMANN, F. Sobre o ensino de física moderna e contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 14, n. 3, p. 393–420, 2009.
- PÉREZ, D. G. et al. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 7, n. 2, p. 125–153, 2001.
- PESSOA JR, O. Introdução histórica à Teoria Quântica, aos seus problemas de fundamento e às suas interpretações. **Caderno de Física da UEFES**, v. 4, n. 01 e 02, p. 89–114, 2006a.
- PESSOA JR, O. Mapa das interpretações da teoria quântica. In: MARTINS, R. A.; BOIDO, G.; RODRIGUEZ, V. (Eds.). **Física: estudos filosóficos e históricos**. Filosofia e história da ciência no Cone Sul. Campinas: AFHIC-Associação de Filosofia e História da Ciência do Cone Sul, 2006b. v. 1p. 119–152.
- PINTO, A. C. É possível levar a física quântica para o ensino médio? **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 16, n. 1, p. 7–34, 1999.

POPPER, K. **A teoria dos quanta e o cisma da Física**. Chicago: The University Chicago Press, 1997.

POSPIECH, G. Teaching the EPR paradox at high school? **Physics Education**, v. 34, n. 5, p. 311–316, set. 1999.

POSPIECH, G. Uncertainty and complementarity: the heart of quantum physics. **Physics Education**, v. 35, n. 6, p. 393–399, nov. 2000.

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

RAMOS, T. C.; MENDONÇA, P. C. C.; MOZZER, N. B. Argumentação de estudantes na criação e crítica de analogias sobre o Modelo Atômico de Thomson. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 25, n. 3, p. 607–624, set. 2019.

REIGELUTH, C. M. Meaningfulness and instruction: relating what is being learned to what a students knos. **Instructional Science**, v. 12, n. 3, p. 197–218, 1983.

RODRIGUEZ, L. V. et al. Designing inquiry-based learning environments for quantum physics education in secondary schools. **Physics Education**, v. 55, n. 6, p. 1–9, nov. 2020.

SAATSI, J. Truth vs. Progress Realism about Spin. In: SAATSI, J.; FRENCH, S. (Eds.). . **Scientific Realism and the Quantum**. [s.l.] Oxford University Press, 2020. p. 35–54.

SANTANA, F. B. Quantização da luz: as metáforas conceituais de Einstein e Infeld no contexto da divulgação científica. In: SILVA, H. C. DA (Ed.). . **Ciência, Seus Textos e Linguagens: ensaios sobre circulação e textualização de conhecimentos científicos e matemáticos**. Curitiba: Editora CRV, 2019. p. 53–80.

SANTOS, F. A.; SANTANA, I. C. H. Investigando as pesquisas sobre analogias: o que mostram os anais dos encontros de ensino de ciências? **Educação (UFSM)**, v. 43, n. 4, p. 757, 1 out. 2018.

SASSERON, L. H.; DUSCHL, R. A. Ensino de ciências e as práticas epistêmicas: o papel do professor e o engajamento dos estudantes. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 21, n. 2, p. 52, 8 ago. 2016.

SIEGEL, H. On the distortion of the history of science in science education. **Science Education**, v. 63, n. 1, p. 111–118, jan. 1979.

SILVA, J. R. N. DA; ARENGHI, L. E. B.; LINO, A. Porque inserir física moderna e contemporânea no ensino médio? Uma revisão das justificativas dos trabalhos acadêmicos. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, v. 6, n. 1, 25 abr. 2013.

SINGH, C. Student understanding of quantum mechanics at the beginning of graduate instruction. **American Journal of Physics**, v. 76, n. 3, p. 277–287, mar. 2008.

SOUZA, A. R. DE; NEVES, L. A. D. S. O livro paradidático no ensino de Física: uma análise fabular, científica e metafórica da obra Alice no País do Quantum: A Física Quântica ao alcance de todos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 33, n. 3, p. 1145, 15 dez. 2016.

- SOUZA, P. H. R. DE; ROCHA, M. B. Análise da linguagem de textos de divulgação científica em livros didáticos: contribuições para o ensino de biologia. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 23, n. 2, p. 321–340, jun. 2017.
- SOUZA, R. DA S. et al. Ensino de Mecânica Quântica na licenciatura em Física por meio da História e Filosofia da Ciência. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 38, n. 2, p. 914–944, 20 set. 2021.
- STADERMANN, H. K. E.; VAN DEN BERG, E.; GOEDHART, M. J. Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. **Physical Review Physics Education Research**, v. 15, n. 1, p. 1–25, 22 maio 2019.
- STINNER, A. et al. The Renewal of Case Studies in Science Education. **Science and Education**, v. 12, n. 7, p. 617–643, 2003.
- TEIXEIRA, E. S.; GRECA, I. M.; FREIRE JR., O. Uma Revisão Sistemática das Pesquisas Publicadas no Brasil Sobre o uso da História e Filosofia da Ciência no Ensino de Física. In: PEDUZZI, L. O. Q.; MARTINS, A. F. P.; FERREIRA, J. M. H. (Eds.). **Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino**. Natal: EDUFERN Editora da UFRN, 2012. p. 9–40.
- TERRAZZAN, E. A. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de Física na escola de 2º grau. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 9, n. 3, p. 209–214, 1992.
- THAGARD, P. Analogy, explanation, and education. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 29, n. 6, p. 537–544, ago. 1992.
- TONOMURA, A. et al. Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern. **American Journal of Physics**, v. 57, n. 2, p. 117–120, fev. 1989.
- TREAGUST, D. F. The evolution of an approach for using analogies in teaching and learning science. **Research in Science Education**, v. 23, n. 1, p. 293–301, dez. 1993.
- TREAGUST, D. F.; HARRISON, A. G.; VENVILLE, G. J. Using an analogical teaching approach to engender conceptual change. **International Journal of Science Education**, v. 18, n. 2, p. 213–229, mar. 1996.
- TREAGUST, D. F.; HARRISON, A. G.; VENVILLE, G. J. Teaching Science Effectively With Analogies: An Approach for Preservice and Inservice Teacher Education. **Journal of Science Teacher Education**, v. 9, n. 2, p. 85–101, maio 1998.
- VERCESI, A. et al. Desafios da pesquisa no Brasil: uma contribuição ao debate. **São Paulo em Perspectiva**, v. 16, n. 4, p. 15–23, out. 2002.
- VILAS BOAS, A. et al. História da ciência e natureza da ciência: debates e consensos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 30, n. 2, p. 287–322, 27 jun. 2013.
- VITAL, A.; GUERRA, A. A natureza da ciência no ensino de física: estratégias didáticas elaboradas por professores egressos do mestrado profissional. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 31, n. 2, p. 225, 14 mar. 2014.

WEINERT, F. Wrong theory - right experiment: the significance of the Stern-Gerlach experiments. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 26, n. 1, p. 75–86, abr. 1995.

WILLIAMS, B.; ROBINSON, T. Pedagogy of spin in nonrelativistic quantum mechanics. **American Journal of Physics**, v. 49, n. 7, p. 645–647, jul. 1981.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo de nossa exposição apresentamos a hipótese da metáfora epistêmica de H. Palma, propondo a verificação de sua validade em nível intracientífico, para o campo de conhecimento da Física. De acordo com Palma (2015), toda metáfora epistêmica exitosa tende a se ocultar, na medida que o conhecimento que ela inaugura sujeita-se à provação de uma dada comunidade científica. Identificar uma metáfora epistêmica consiste, então, em analisar a historicidade do conceito dela derivado.

Assim, investigamos a historicidade do conceito de spin do elétron, considerando um recorte temporal que inicia-se com a descoberta do efeito Zeeman, em meados de 1890 (JAMMER, 1989), até seu completo entendimento a partir da proposição do spin do elétron, por volta de 1925 (TOMONAGA, 1997). Nosso corpus de pesquisa contemplou documentos históricos e historiográficos que possibilitaram analisar alguns dos aspectos históricos da elaboração do conceito de spin do elétron. Analisando aqueles documentos, buscamos identificar segmentos textuais (frases, orações, equações, imagens, etc.) que pudessem ser categorizados a partir de um conjunto de categorias analíticas.

Estas categorias foram propostas com base nos principais aspectos da estrutura conceitual da noção de Metáfora Epistêmica em nível intracientífico, e as condições para sua proposição e validação, sendo estas: 1) bissociação, quantitativa e qualitativa (ato inaugural da metáfora epistêmica, expressa em linguagem matemática e não matemática, respectivamente); 2) experiência disponível (o cenário teórico e empírico vigente em uma dada comunidade científica, em um dado período); 3) critérios de aceitação/rejeição (conjunto de valores científicos, filosóficos, epistêmicos, sociais, etc., adotados pela comunidade científica para aceitar/rejeitar uma metáfora epistêmica); 4) contextualização (exprime elementos do contexto histórico social no qual uma dada comunidade científica e uma dada problemática estão inseridas); 5) manifestações de aceitação/rejeição (os posicionamentos dos membros da comunidade científica em favor ou contra a proposição de uma metáfora epistêmica); 6) reconfiguração (reinterpretação e/ou ampliação da base teórica e empírica decorrente da proposição de uma metáfora epistêmica, seja ela exitosa ou não); 7) literalização (adequação, validação e estabilização da ideia inaugurada pela metáfora epistêmica, enquanto conhecimento novo).

Identificamos, no corpus de pesquisa, quantidade substancial de segmentos analíticos em todas as categorias analíticas. De modo complementar, para a categoria da literalização

incluímos em nossa análise alguns manuais de física, pois são nestes materiais que espera-se encontrar os conteúdos científicos considerados indispensáveis pela comunidade científica, em sua forma já estabilizada, dentre os quais, o conceito de spin do elétron. A análise dos manuais de física evidenciou a predominância de segmentos analíticos relacionados à categoria da *literalização*, tal como previsto. Diante dos resultados de nossa análise, consideramos plausível a hipótese da metáfora epistêmica intracientífica.

Destacamos que a metáfora epistêmica de Palma é uma elaboração teórica com contribuições oriundas da Filosofia da Linguagem, da História e da Filosofia da Ciência, bem como da Sociologia da Ciência. Uma vez que Palma está predominantemente interessado no papel das metáforas epistêmicas na produção do conhecimento, seus interesses estão no campo da pragmática. A comprovação da tese que sustentamos – a plausibilidade da metáfora epistêmica intracientífica no campo da Física – é, portanto, uma contribuição original, dentro do escopo considerado por Palma, no campo da Filosofia da Ciência. Os resultados de nossas investigações reforçam, portanto, o papel constitutivo e insubstituível das metáforas em determinadas situações da produção de conhecimento científico. Além desta contribuição original, indicamos também potenciais implicações para a Educação Científica.

Por outro lado, com o intuito de melhor fundamentar a plausibilidade da hipótese da metáfora epistêmica, consideramos que as investigações a este respeito necessitam avançar em ao menos dois pontos: 1) identificar outros processos de metáfora epistêmica intracientífica no campo da Física; 2) verificar a plausibilidade de processos de metáfora epistêmica intracientífica em outros campos científicos, dentre os quais a Biologia, a Química e as Geociências.

Estas diretrizes são prioritárias, uma vez que refletem a cautela inerente a toda investigação científica. Tal necessidade se impõem naturalmente como esforço de pesquisa subsequente, a respeito do qual consideramos que nosso estudo de caso se coloca como um referencial metodológico inicial.

Por outro lado, ampliar a quantidade de estudos de caso contribuirá também para compor um conjunto que poderíamos denominar de *episódios históricos de metáforas epistêmicas intracientíficas*. Estes episódios são potencialmente úteis para subsidiar a elaboração de material instrucional e de estratégias de ensino, voltado tanto para a formação docente quanto para a educação básica em ciências.

Neste sentido, vale ressaltar que em relação ao uso didático de analogias e metáforas, a literatura aponta que várias dificuldades relacionam-se ao uso espontâneo – improvisado, não sistematizado ou não consciente – destes objetos. Em decorrência disto, vários autores

sugerem que a formação docente contemple também a instrução prévia e sistemática sobre analogias metáforas. Diante deste quadro, consideramos que a noção de ME pode figurar como uma opção metodológica adicional. Neste sentido, os estudos de caso que mencionamos são potencialmente úteis.

Um primeiro movimento nesta direção pode emergir de analogias consideradas emblemáticas para a ciência e já relatadas na literatura, embora com outros objetivos (ABRANTES, 1988; DELIZOICOV; CARNEIRO; DELIZOICOV, 2004; GINGRAS, 2015; OLIVA, 2008). Consideramos que tais analogias, cientificamente consolidadas no campo das ciências naturais, muito provavelmente podem ser consideradas como processos de metáfora epistêmica, como já argumentamos. Todavia, cabe ressaltar que tais analogias devem ser (re)analisadas, agora sob uma nova perspectiva, mais precisamente, aquela que apresentamos neste trabalho.

Em relação aos casos de analogias científicas emblemáticas, cabem algumas reflexões que vão ao encontro do que temos afirmado, ou seja, que tais analogias são, em essência, processos de metáforas epistêmicas. Vejamos: é relativamente fácil perceber as relações de analogia entre conceitos e equações da dinâmica dos corpos rígidos e da dinâmica de pontos materiais (velocidade linear e angular, aceleração linear e angular, inércia e momento de inércia – como resistência à mudanças de velocidade –, força e torque – como causas da mudança de velocidade –, etc.). No entanto, devemos lembrar que estes conceitos surgem como conhecimento novo em um dado momento histórico, diretamente influenciados pela mecânica de Newton, mas estendendo o contexto de suas aplicações aos sistemas de corpos rígidos (SITKO, 2019; ZANETIC, 1988). Neste sentido, as relações de analogia, que atualmente nos parecem tão naturais, obviamente não puderam ser estabelecidas antes da síntese da dinâmica das rotações. O mesmo pode ser dito quando hoje pensamos na luz como um gás de fótons, na eletricidade como um fluido, que nos materiais condutores de eletricidade temos de um gás de elétrons, etc. É relativamente confortável ler o trabalho de Einstein e compreender a analogia que ele propõe para lançar as bases do conceito de quantum de luz, mas devemos lembrar que aquilo que encontramos em seu artigo já é a síntese de um conjunto de ideias pensadas, organizadas, compiladas e estruturadas por Einstein; as relações de analogias foram por ele construídas, onde antes não havia nenhuma.

O que estamos afirmando é que as relações de comparação, embora aparentes em uma analogia, não são pré-existentes, mas sim construídas a partir de domínios aparentemente próximos, mas que deflagram manifestações de rejeição e de aceitação, pautadas por um conjunto de valores científicos, epistêmicos, culturais, etc, nos moldes do processo de uma

ME. Em suma, analogias científicas emblemáticas são potenciais episódios de metáfora epistêmica.

No estudo de caso que apresentamos, além dos materiais históricos e historiográficos, nossa análise contemplou também os manuais de Física. Na descrição metodológica referente a esta parte da pesquisa fizemos questão de distinguir os manuais, destinados a formação inicial de especialistas – bacharéis e licenciados – dos livros didáticos, destinados ao ensino propedêutico. Ao optarmos pelos manuais, buscamos atender aos nossos objetivos de pesquisa, que naquele momento consistiam em evidenciar um maior número de segmentos analíticos na categoria da literalização, este, um indicador do estado final de toda metáfora epistêmica exitosa.

Naturalmente, podemos considerar a extensão da análise de modo a abranger os livros didáticos, destinados a formação de não iniciados. Várias pesquisas relacionadas ao uso didático de analogias e metáforas têm investigado estes materiais, buscando quantificá-las e classificá-las. Entendemos que investigar como as metáforas epistêmicas circulam neste tipo de texto pode trazer novos questionamentos sobre o papel dos livros didáticos.

Enfatizemos que em nossa investigação a análise de manuais não teve por objetivo, comparar, classificar ou categorizar estes materiais. No entanto, o quantitativo de segmentos analíticos em cada categoria de análise pode ser um *indicativo de perfil ou de inclinação* – histórica, epistemológica, formal, teórica, filosófica, etc. – tanto dos manuais quanto dos livros didáticos. Uma categorização deste tipo pode ser útil para conciliar objetivos de ensino à escolha de materiais didáticos, bem como orientar a produção de materiais instrucionais.

Do mesmo modo, considerando o conjunto de categorias analíticas que propusemos, talvez seja possível pensar na análise de exemplos, exercícios e prolemas propostos, presentes em manuais e em livros didáticos, buscando identificar que aspectos da metáfora epistêmica são contemplados e portanto, que aspectos estão sendo propagados para os círculos mais especializados e menos especializados.

Salientamos que analogias ou metáforas presentes em materiais didáticos não estão necessariamente vinculadas a processos de metáfora epistêmica autênticos, ou seja, aqueles originados na comunidade científica especializada. Neste sentido poderíamos espicular acerca de metáforas epistêmicas oriundas da cultura não especializada ou originalmente pertencentes à ciência dos livros didáticos. Cabe ainda ressaltar que as analogias e metáforas enquanto objeto de investigação da literatura especializada no âmbito do ensino de ciências não se relacionam necessariamente à noção de ME. Naquele caso, geralmente tratam-se de figuras de linguagem, cujo objetivo não é a elaboração de conhecimentos científicos; do contrário, são

empregadas na produção de conhecimentos científicos no âmbito educacional e atende, portanto, a um a outros critérios de validação.

Considerando a inserção de conceitos de Física Moderna no ensino médio, esta constitui-se de uma problemática amplamente investigada. A literatura da área aponta consensos e dificuldades, tanto no ensino quanto na formação docente. Em particular, o tema do spin do elétron requer o domínio de vários conhecimentos de física para ser compreendido e os manuais costumam atribuir a ele um papel utilitário (cf. TOMONAGA, 1997). Neste sentido, o estudo de caso que conduzimos é potencialmente útil, pois dele pode-se extrair um material textual que evidencia aspectos empíricos, conceituais, formais, epistêmicos, históricos, filosóficos, sociais e culturais, relacionados a elaboração deste conceito. Além disso, conforme já argumentamos, a noção de MEIC mostra-se potencialmente útil como recurso metodológico para o ensino de tópicos de Física Moderna. Adicionalmente, nosso estudo de caso contempla uma temática diretamente relacionada com o ensino de Mecânica Quântica, tanto em nível médio quanto em nível superior; tal como argumentamos, o conceito de spin do elétron na perspectiva da noção de MEIC mostra-se potencialmente útil para promover um ensino de mecânica quântica mais adequado, em concordância com a literatura especializada.

Também argumentamos que a inserção de temas referentes à História da Ciência, à Filosofia da Ciência e à Natureza da Ciência no ensino de ciências e na formação docente têm mobilizado esforços de pesquisa de modo significativo. Também neste cenário nosso estudo de caso, e sobretudo a noção de MEIC, são potencialmente úteis, podendo contribuir para contornar algumas das dificuldades apontadas pela literatura especializada.

Tendo revisitado alguns resultados mais imediatos de nossas investigações, bem como algumas de suas potencialidades mais evidentes, passaremos agora a considerar algumas implicações potenciais mais audaciosas, sem assumir, no entanto, qualquer compromisso metodológico mais profundo. Entendemos que, uma vez alcançados os objetivos propostos, estamos agora em posição de adentrar em um terreno mais especulativo, buscando apontar possíveis desdobramentos para futuras investigações, sejam estas inovadoras ou complementares ao estudo que realizamos.

Nancy Nersessian propõem um método de análise, que denomina por Cognitive-Historical (NERSESIAN, 1992), a partir do qual a autora pretende contribuir para o problema irresoluto da mudança conceitual na ciência, que poderíamos considerar sob diferentes perspectivas, como por exemplo, as mudanças de paradigma de Kuhn (1970) ou as mudanças de estilo de pensamento de Fleck (2010). A autora propõem que o pensamento

analgógico, dado sua relação com as estruturas cognitivas humanas, pode contribuir na compreensão da questão referente à mudança conceitual. Nestes termos, a autora propõe a análise de episódios históricos onde analogias foram empregadas como recurso metodológico.

De um modo semelhante, poderíamos considerar potenciais relações de processos metafóricos em níveis mais fundamentais com os processos cognitivos, e neste sentido, abrindo caminho para investigações que busquem estabelecer conexões entre as metáforas e as teorias de aprendizagem. Por exemplo: a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, por exemplo, leva em conta, dentre outros aspectos conceituais, o papel de organizadores prévios para a aprendizagem significativa de novos conhecimentos (MOREIRA, 2021). Algumas investigações nesta linha de pesquisa têm apoiado-se no uso de analogias como meio de estabelecer organizadores prévios em situações de ensino de conceitos científicos (MOREIRA, 2008); A teoria de Vergnaud considera que o conhecimento adquirido pelos sujeitos organiza-se a partir de campos conceituais. A elaboração e apropriação de um dado conceito ocorre a partir de vários tipos de situações a que o referido conceito pode ser associado, geralmente em conjunto com outros conceitos; não raro, este processo transcorre longos períodos de tempo – anos ou mesmo décadas – e neste intercurso, analogias com outras situações podem ocorrer. Um suma, a capacidade de formar analogias entre situações distintas marca a consolidação progressiva de conceitos (MOREIRA; ALEGRE, 2002). Diante deste quadro pode-se questionar que tipos de articulações poderiam ser estabelecidas entre metáforas e processos de aprendizagem.

Em outra perspectiva, não deixamos de considerar a possibilidade de empregar a noção de MEIC como uma ferramenta de análise. O conjunto de segmentos analíticos extraídos de um dado material historiográfico, isto é, o quantitativo de segmentos analíticos em cada uma das categorias analíticas poderia ser interpretado como um tipo de perfil historiográfico, de modo semelhante ao que propusemos para os manuais e textos didáticos.

Ainda nesta direção, ressaltamos que Palma considera que as metáforas no ensino de ciências “com toda a legitimidade, escorregam sob o eufemismo da transposição didática” (2015, p. 239). Desse modo, consideramos razoável a proposição da noção de MEIC como um potencial instrumento analítico para a investigação dos processos de transposição didática de conceitos científicos, como por exemplo, aqueles relacionados com a elaboração de materiais didáticos.

É pertinente considerar o fato de que para Koestler (2014) os processos bissociativos descrevem o ato criativo do pensamento humano. A proposição de Koestler reside no campo da psicologia e inclui, dentre outros, a criação científica. Cabe então questionar: é possível

algum diálogo entre a teoria de Koestler e teorias cognitivas atuais? Como a teoria de Koestler dialoga com a epistemologia? Uma vez que o pensamento analógico tem pertinência na teoria de aprendizagem de Ausubel, seria possível alguma articulação entre esta teoria e a teoria de Koestler?

Consideramos que as possibilidades e questões levantadas, ainda que de modo especulativo, são de grande relevância, mas que pairam em um horizonte relativamente distante do ponto que inicialmente estabelecemos com nossa investigação. Desse modo, olhamos para este quadro substancialmente incerto como um cenário convidativo e promissor para novas investigações.

Por fim, é razoável pensar que contribuições advindas de outros campos de conhecimento possam ampliar e enriquecer o conjunto de categorias analíticas que propusemos em nossa metodologia de análise das metáforas epistêmicas. Entendemos que uma metodologia de análise que contemple contribuições oriundas, por exemplo, da Psicologia Cognitiva, da História da Ciência, da Sociologia da Ciência e dos Estudos Culturais da Ciência seriam potencialmente úteis para captar com mais acuidade as relações entre a ciência e outros círculos de conhecimentos, que em princípio nos parecem pertinentes aos processos de metáforas epistêmicas intracientíficas.

Referências

- ABRANTES, P. C. C. A metodologia de J. C. Maxwell e o desenvolvimento da Teoria Eletromagnética. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 5, n. Edição Especial, p. 58–75, 1988.
- DELIZOICOV, N. C.; CARNEIRO, M. H. DA S.; DELIZOICOV, D. O movimento do sangue no corpo humano: do contexto da produção do conhecimento para o do seu ensino. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 10, n. 3, p. 443–460, dez. 2004.
- FLECK, L. **Gênese e desenvolvimento de um fato científico**. Belo Horizonte: Fabrefactum editora, 2010.
- GINGRAS, Y. The Creative Power of Formal Analogies in Physics: The Case of Albert Einstein. **Science & Education**, v. 24, n. 5–6, p. 529–541, jul. 2015.
- JAMMER, M. **The conceptual development of quantum mechanics**. Maryland: Tomash Publishers, 1989. v. 12
- KOESTLER, A. **The act of creation**. London: Last Century Media, 2014.
- KUHN, T. S. **A estrutura das revoluções científicas**. 5. ed. São Paulo: Perspectiva, 1970.
- MOREIRA, M. A. Organizadores prévios e aprendizagem significativa. **Revista Chilena de Educación Científica**, v. 7, n. 2, p. 23–30, 2008.

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem significativa: um conceito subjacente**. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/~moreira/apsigsubport.pdf>>.

MOREIRA, M. A.; ALEGRE, P. A teoria dos campos conceituais de Vergnaud: o ensino de ciências e a pesquisa nesta área. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 7, n. 1, p. 7–29, 2002.

NERSESSIAN, N. J. How do scientists think? capturing the dynamics of conceptual change in science. In: **Cognitive Models of Science**. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1992. v. 15p. 3–44.

OLIVA, J. M. Qué conocimientos profesionales deberíamos tener los profesores de ciencias sobre el uso de analogías. **Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias**, v. 5, n. 1, p. 15–28, 2008.

PALMA, H. **Ciencia y metáforas: crítica de una razón incestuosa**. Buenos Aires: Prometeu Libros, 2015.

SITKO, C. M. Os desenvolvimentos da Mecânica Analítica que culminaram na elaboração de $F=ma$. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 36, n. 1, p. 158–177, 13 maio 2019.

TOMONAGA, S. **The story of spin**. Chicago: The University of Chicago Press, 1997.

ZANETIC, J. Dos “Principia” da mecânica aos “Principia” de Newton. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 5, n. Especial, p. 23–35, 1 jan. 1988.