

Sobre a plausibilidade da hipótese da Metáfora Epistêmica em âmbito intracientífico: o conceito de spin do elétron como estudo de caso⁺*

Fábio Bartolomeu Santana¹

Instituto Federal do Paraná

Paranaguá – PR

Henrique César da Silva¹

Frederico Firmo de Souza Cruz¹

Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis – SC

Resumo

A noção hipótese da Metáfora Epistêmica foi originalmente proposta para descrever processos metafóricos subjacentes à produção de conhecimentos científicos. Elaborada por Hector Palma, esta noção apresenta-se como um processo em duas etapas: uma bissociação sincrônica (junção de duas ideias pertencentes a campos conceituais distintos) seguida de uma literalização diacrônica (estabilização de significado ao longo do tempo). O objetivo deste trabalho foi verificar a plausibilidade da referida hipótese no âmbito intracientífico da Física. Para tal finalidade, consideramos o episódio referente à gênese do conceito de spin do elétron, proferindo a análise de materiais historiográficos, históricos e didáticos, buscando evidenciar o referido processo metafórico. O tema em questão é relevante por tratar-se de um conceito puramente quântico, ou seja, não possui análogo clássico. Adicionalmente, as pesquisas relacionadas ao ensino de Física Moderna e Contemporânea vêm indicando a necessidade de propostas didáticas voltadas para a formação de professores, que entendemos ser possível explorar por meio da metáfora epistêmica, já que tal objeto põe em evidência elementos históricos, filosóficos e conceituais. A metodologia empregada na análise consistiu em correlacionar trechos (frases,

⁺ On the plausibility of the Epistemic Metaphor hypothesis in an intra-scientific context: the concept of electron spin as a case study

^{*} Recebido: 4 de outubro de 2023.

Aceito: 31 de março de 2024.

¹ E-mails: fabio.bartolomeu@ifpr.edu.br; henriquecsilva@gmail.com; fredfirmo@gmail.com

equações, imagens etc.) extraídos da base documental da pesquisa com um conjunto de categorias analíticas que refletem aspectos estruturais e conceituais do fenômeno metafórico investigado. Durante a análise, identificamos 147 trechos que, organizados em 11 categorias analíticas, consubstanciam o objeto metafórico em questão. Assim, consideramos que o resultado da análise indica a plausibilidade da hipótese considerada.

Palavras-chave: *Metáfora; Metáfora Epistêmica; Hector Palma; Spin do Elétron.*

Abstract

The hypothetical notion of Epistemic Metaphor was originally proposed to describe metaphorical processes underlying the production of scientific knowledge. Elaborated by Hector Palma, this notion presents itself as a process in two stages: a synchronic bisociation (joining of two ideas belonging to different conceptual fields) followed by a diachronic literalization (stabilization of meaning over time). The objective of this work was to verify the plausibility of the aforementioned hypothesis in the intra-scientific scope of Physics. For this purpose, we consider the episode referring to the genesis of the concept of electron spin, analyzing historiographical, historical and didactic materials, seeking to highlight the aforementioned metaphorical process. The topic in question is relevant because it is a purely quantum concept, that is, it has no classical analogue. Additionally, research related to the teaching of Modern and Contemporary Physics has indicated the need for didactic proposals aimed at teacher training, which we believe is possible to explore through the epistemic metaphor, as this object highlights historical, philosophical and conceptual elements. The methodology used in the analysis consisted of correlating excerpts (sentences, equations, images, etc.) extracted from the research's documentary base with a set of analytical categories that reflect structural and conceptual aspects of the metaphorical phenomenon investigated. During the analysis, we identified 147 excerpts that, organized into 11 analytical categories, substantiate the metaphorical object in question. Thus, we consider that the result of the analysis indicates the plausibility of the hypothesis considered.

Keywords: *Metaphor; Epistemic Metaphor; Hector Palma; Electron Spin.*

I. Introdução

Os estudos recentes sobre o fenômeno metafórico e suas implicações nos processos de produção de conhecimentos científicos relacionam-se com alguns marcos considerados inaugurais, que surgem a partir de meados do século XX, nos campos da filosofia da ciência, filosofia da linguagem e mais recentemente na psicologia cognitiva. Nas ciências, as metáforas estão presentes na textualização e circulação de seus conhecimentos, envolvendo a produção, comunicação, popularização, ensino e formação especializada (Palma, 2015).

Assumindo um papel cognoscitivo e epistêmico para as metáforas, a noção de Metáfora Epistêmica (ME) proposta por Palma (2015) tem como finalidade descrever a função, os limites e o alcance das metáforas em contextos que abordam temas científicos. O conceito de ME consiste, assim, em uma noção hipótese para o fenômeno metafórico que pode ser pensado em âmbitos científicos mais específicos (Santana; Silva; Cruz, 2022) – noção, enquanto objeto conceitualmente estruturado; hipótese, enquanto proposição a ser verificada.

As MEs implicam em diferentes níveis de compromissos (cognoscitivos, epistêmicos, ontológicos etc.) e alcance explicativo, tornando difícil a tarefa de classificá-las e categorizá-las. De acordo com Santana, Silva e Cruz (2022), a categorização originalmente proposta por Palma (2015) não contempla explicitamente as MEs que ocorrem restritivamente no interior de um dado campo científico. Desse modo, aqueles autores propõem que a noção hipótese da ME seja estendida ao contexto intracientífico. Neste contexto, uma Metáfora Epistêmica Intracientífica (MEIC) é toda metáfora epistêmica que relaciona ideias ou conceitos de diferentes ramos de um dado campo científico.

Neste trabalho propusemos investigar a plausibilidade da hipótese da ME no contexto intracientífico da Física, tomando como estudo de caso o episódio relacionado à gênese do conceito de spin do elétron. O episódio mostra-se relevante para nossa investigação, pois se trata de uma noção estritamente quântica, isto é, não há qualquer análogo clássico, constituindo-se em sério obstáculo ao Princípio da Correspondência (Eisberg; Resnick, 1985). No entanto, a gênese conceitual do spin do elétron, no período histórico considerado, pautou-se em noções não quânticas, como eletromagnetismo e relatividade restrita (Tomonaga, 1997); trata-se de uma construção metafórica por excelência sendo, deste modo, adequado para os objetivos deste trabalho.

Adicionalmente, o episódio em questão está inserido nos domínios da física moderna, cujas condições de ensino e aprendizagem nos diferentes níveis educacionais têm sido objeto recorrente de pesquisas relacionadas ao ensino de física. Resultados recentes apontam para a necessidade de propostas didáticas voltadas para a formação de professores (Silva; Reis; Rego, 2019), já que temas de física moderna comumente envolvem níveis elevados de abstração, como de fato ocorre com o spin do elétron (Tomonaga, 1997). Nestes termos, uma vez que a ME possibilita evidenciar aspectos históricos, filosóficos e conceituais, coloca-se como um potencial recurso metodológico a ser considerado no ensino de conceitos de física moderna e contemporânea para a formação de professores.

II. Considerações sobre a noção hipótese da Metáfora Epistêmica

As MEs apresentam certos aspectos em comum com as metáforas literárias, “mas diferem em outros aspectos fundamentais, não tanto nos mecanismos [...] que podem gerá-las, mas em sua função, em sua historicidade e em sua relação com a realidade” (Palma, 2015, p. 137).

De acordo com Palma (2015), a despeito de fazer parte de uma história já em curso, toda ME exitosa apresenta uma historicidade própria, surgindo a partir de um ato inaugural, quando ela é proferida pela primeira vez, seguindo-se pela aquisição de um significado preciso e compartilhado, ocultando seus aspectos metafóricos. O ato inaugural da ME fundamenta-se no conceito de bissociação, originalmente proposto por Koestler (2014); a aquisição e estabilização de significado baseia-se no conceito de literalização, originalmente proposto por Turbayne (1974).

A bissociação consiste na junção de ideias e/ou conceitos pertencentes a dois âmbitos ou universos de discurso inicialmente desconectados e por vezes incompatíveis, até que alguém os faça convergir a partir de uma associação metafórica, inaugurando assim uma perspectiva inédita, fruto de um *insight* psicológico individual (Koestler, 2014).

A proposição de uma ME leva em conta o estado do conhecimento científico, delimitado no tempo e no espaço por uma base teórica e empírica, questões, explicações e interpretações acerca de uma dada fenomenologia, bem como os aspectos socioculturais em um dado momento histórico. Este conhecimento ou experiência disponível em um dado período histórico não se restringe apenas às limitações técnicas ou humanas, “mas principalmente pela configuração, imanente à comunidade e aos discursos científicos atuais do que é considerado um fato científico e suas condições” (Palma, 2015, p. 46), ou seja, aquilo que uma dada comunidade científica comprehende, reconhece e considera como fenomenologia pertinente à sua atividade.

Uma proposição metafórica, quando ouvida pela primeira vez, nos remete a ver uma coisa como se fosse outra; parece-nos inicialmente inconsistente, por vezes incômoda e não convencional, como ocorre, por exemplo, com o sujeito não iniciado em Descartes ao ouvir pela primeira vez que o Universo é uma máquina. A constatação de uma inconsistência inicial aguça a percepção; assim que uma nova perspectiva se instala, inicia-se o processo relativamente longo de negociação e estabilização de significado. Tão logo catalise um novo significado, a metáfora deixa de ser percebida, convertendo-se em metáfora morta, isto é, literalizada (Turbayne, 1974), passando a fazer parte da experiência disponível, reconfigurando-a.

A aceitação e estabilização de um significado não ocorre pacificamente, sobretudo no âmbito científico. Além das tensões e coerções geradas pela experiência disponível, a proposição e aceitação de uma ME também é regulada pelo contexto sociocultural mais amplo, dado que “em cada momento, um universo infinito de metáforas possíveis não está disponível, mas, ao contrário, há em cada época um número escasso de candidatas a imagens da sociedade

e do mundo suficientemente legitimadas” (Palma, 2015, p. 41) – afirmar que a sociedade é um organismo exige não apenas a prontidão dos conceitos de organismo e de sociedade, mas também um contexto sociocultural que possibilite ver a sociedade como se fosse um organismo.

De todo modo, admitir um papel para as metáforas na elaboração de conhecimentos científicos não implica em igualar a atividade científica com outras práticas discursivas, nem considerar que as práticas discursivas estejam desconectadas de práticas não-discursivas, tampouco implica considerar que toda a produção científica tenha em sua base o emprego de metáforas (Palma, 2015).

III. Considerações sobre o campo intracientífico da Física e sobre o conceito de spin do elétron

A noção de ME pode contemplar uma gama variada de elementos e signos, incluindo aqueles tipicamente pertencentes ao âmbito científico como leis, teoremas, conceitos, equações, esquemas, imagens etc. No âmbito da Física, a significação de tais elementos somente é plena quando se leva em conta a representação e o formalismo matemáticos. Adicionalmente, a atribuição e a precisão de significados de termos e expressões somente ocorrem no interior das estruturas teóricas, onde aqueles elementos figuram e foram originalmente elaborados; quando empregados metaforicamente, exigem ressignificação (Santana; Silva; Cruz, 2022).

Neste contexto, o conceito de spin do elétron é emblemático para o objetivo proposto neste trabalho. A propriedade física denominada por spin não tem nenhuma propriedade análoga classicamente (Eisberg; Resnick, 1985). Porém, o momento magnético de esferas eletricamente carregadas girantes é possível classicamente. Assim, na descrição da propriedade magnética intrínseca ao elétron buscou-se considerá-lo *como se fosse* uma partícula em movimento de autorrotação para explicar a fenomenologia relacionada ao efeito Zeeman anômalo, isto é, os desdobramentos das linhas espectrais emitidas pelos átomos de elementos alcalinos quando sujeitos a campos magnéticos relativamente fracos. A derivação matemática da equação que descrevia adequadamente as anomalias espectrais fora obtida pela associação entre noções do eletromagnetismo clássico e da relatividade restrita, uma associação engendrada a partir da imagem do elétron girando em torno de si mesmo (Tomonaga, 1997). Tal associação nos leva a considerar a gênese do conceito de spin do elétron como um potencial episódio histórico de metáfora epistêmica em âmbito intracientífico.

Há, contudo, outras motivações. Conceitualmente o 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” (Tomonaga, 1997, p. viii), sobretudo porque no âmbito da mecânica quântica as grandezas físicas possuem outra significação, ou seja, não podem ser prontamente interpretadas em termos clássicos (Griffiths, 2011).

No que diz respeito ao ensino de física, os conceitos relacionados à mecânica quântica têm sido objeto de investigações, as quais vêm apontando dificuldades e novas possibilidades para abordagens destes conceitos no ensino básico, especializado e na formação de professores

(Monteiro; Nardi; Bastos Filho, 2009; Oliveira; Vianna; Gerbassi, 2007; Ostermann; Moreira, 2000). Neste sentido, a investigação da hipótese da MEIC no âmbito proposto pode trazer contribuições para novas abordagens de conceitos da MQ, sobretudo a partir de uma perspectiva histórica e epistêmica, cuja importância e dificuldades são também apontadas por diferentes estudos (Gomes; Pietrocola, 2011; Jiménez-Aleixandre; Crujeiras, 2017; Livramento, 2017; Sasseron; Duschl, 2016; Vilas Boas *et al.*, 2013; Weinert, 1995).

IV. Aspectos metodológicos da investigação

Para a análise do episódio histórico em questão, consideramos um recorte temporal compreendido entre a última década do século XIX e meados da segunda década do século XX, período no qual se estabelecem os contextos experimental e conceitual – sobre o efeito Zeeman anômalo e sobre o átomo, respectivamente – relacionados à proposição do conceito de spin do elétron, isto é, se estabelecem certos fatos científicos e problemáticas pertinentes a uma dada comunidade científica em um dado tempo e lugar.

A unidade fundamental do processo metafórico aqui considerado, a bissociação, ocorre em nível psicológico na forma de insight individual (Koestler, 2014), que embora inacessível, encontra materialidade em múltiplas formas de textualidade, relacionadas à circulação de conhecimentos científicos, dentre as quais a produção historiográfica, artigos científicos, cartas e outras formas de comunicações científicas. Em nossa investigação, documentos originais foram considerados, alguns na íntegra e outros na forma de fragmentos contidos em materiais historiográficos.

Em relação ao *corpus* de análise, levamos em conta que materiais historiográficos apresentam certas características encapsuladas, derivadas de aspectos que influenciam a percepção do historiador da ciência acerca dos episódios científicos (Kripka; Scheller; Bonotto, 2015; Martins, 1993, 2004); trata-se de valores filosóficos, epistêmicos, concepções de ciência, métodos etc., que implicam em diferentes tipos de produção historiográfica (Abrantes, 2002; Kuhn, 1968). Uma vez que a proposição de MEs é influenciada por condicionantes históricos – sociais, políticos, científicos, culturais etc. – a pluralidade autoral é, para nossos objetivos, uma condição importante.

Consideramos também que todo conhecimento científico novo, incorporado ao corpo de conhecimentos vigente, adquire o *status* de conhecimento a ser ensinado, tanto às futuras gerações de cientistas, quanto aos sujeitos não iniciados (Fleck, 2010; Irzik; Nola, 2014; Kuhn, 1970). Desse modo, promovemos a inclusão de obras didáticas ao *corpus* de análise com o intuito de encontrar evidências do estágio final da literalização da ME subjacente ao episódio histórico em questão.

A análise dos materiais textuais foi orientada por um conjunto de categorias analíticas que contemplam os elementos conceituais da metáfora epistêmica em nível intracientífico, aspectos dos contextos científico e sociocultural vigentes, as implicações decorrentes do processo metafórico e as especificidades do campo científico considerado, nos termos de

Santana, Silva e Cruz (2022). Proferimos a análise extraindo e categorizando pequenos trechos (proposições, equações, imagens etc.) de acordo com a categoria analítica a qual fizessem referência. Os trechos assim categorizados, denominamos por segmentos analíticos.

Na categoria que denominados por Bissociação qualitativa, reunimos os trechos que exprimiram processos bissociativos em linguagem não matemática. Do mesmo modo, os trechos que exprimiram processos bissociativos em linguagem matemática foram categorizados na categoria analítica que denominamos por Bissociação quantitativa.

No campo da física, estas formas de bissociação mostram-se indissociáveis, pois toda teoria física deve manter relações de coerência lógica entre os conceitos científicos mobilizados e o formalismo matemático empregado para estruturá-la (Popper, 1997).

Na categoria da Experiência disponível, reunimos os trechos relacionados com a base empírica estabelecida no período histórico considerado. Isto inclui as interpretações, os formalismos e as metodologias que a comunidade científica dispunha sobre a base empírica. Em suma, o contexto teórico experimental e seu papel regulador sobre o fazer científico à época.

Nas categorias Critério de aceitação e Critério de rejeição, agrupamos os trechos que evidenciaram o emprego de aspectos da experiência disponível para aceitação/rejeição dos processos bissociativos propostos para resolver a problemática em questão.

Na categoria Contextualização categorizamos os trechos que fizeram referência ao contexto sócio-histórico no período considerado, pois os contextos podem ter implicações determinantes para os processos científicos (Fleck, 2010; Kuhn, 1968). Como dito anteriormente, em um dado momento histórico estão disponíveis um conjunto limitado de ME, candidatas a imagens legítimas da sociedade e do mundo (Palma, 2015).

Toda ME gera tensões, desencadeando manifestações favoráveis e contrárias. Nas categorias Manifestação de aceitação e Manifestação de rejeição, agrupamos os trechos que evidenciaram os juízos de valor deflagrados pelos membros de uma comunidade científica frente à proposição de metáfora epistêmica relacionada ao spin do elétron, refletindo o conjunto de compromissos lógicos, formais, metodológicos e epistêmicos daquela comunidade.

É importante destacar que, não raro os juízos de valor podem fazer referência ao quadro teórico experimental, mas não devem ser confundidos com ele. Outrossim, é possível que determinados elementos de um quadro teórico experimental sejam empregados por diferentes grupos, por vezes como critério de aceitação, mas também como de rejeição.

A ambivalência que o estado do conhecimento pode representar para uma comunidade de cientistas decorre de outros fatores decisórios, como diferentes concepções epistêmicas, ontológicas ou mesmo outros valores não necessariamente compartilhados por todos os membros de uma comunidade científica. No geral, espera-se que as manifestações de aceitação/rejeição venham acompanhadas de algum critério que as justifique.

Metáforas epistêmicas exitosas sempre originam uma novidade conceitual que acaba por enriquecer e/ou reconfigurar a base empírica (Palma, 2015). Na categoria da Reconfiguração, reunimos os trechos que correspondem a tal aspecto do processo de metáfora

epistêmica, ou seja, as mudanças provocadas no quadro lógico formal, metodológico ou mesmo empírico pela introdução da noção de spin do elétron.

Por fim, na categoria analítica que denominamos por Literalização, categorizamos os trechos que evidenciaram elementos do estágio final da metáfora epistêmica exitosa do spin do elétron (i.e., a aquisição de significado estabilizado). Lembremos que o processo de apagamento do caráter metafórico não é sincrônico (Turbayne, 1974), ou seja, não é possível identificá-lo pontualmente, senão pela análise da evolução conceitual que ele sustenta, que em seu último estágio adquire o status de conhecimento a ser ensinado para as futuras gerações de cientistas (este aspecto revela a importância de incluir as obras didáticas em nossa análise).

A investigação envolveu um *corpus* de análise formado por documentos historiográficos², materiais originais³ e obras didáticas do ensino superior⁴. Os materiais historiográficos foram definidos a partir de uma sondagem inicial na literatura especializada, levando-se em conta o episódio considerado na investigação. A partir da leitura dos textos pré-selecionados, constatada a sua pertinência para a investigação, seguiu-se uma verificação de suas referências, buscando assim ampliar a base historiográfica. Neste processo, alguns cânones foram também incorporados à base historiográfica.

Por fim, a escolha das obras didáticas levou em conta títulos e autores que podem ser encontrados de modo recorrente na bibliografia recomendada em disciplinas de física básica e avançada, nos cursos de Bacharelado e Licenciatura em Física, bem como em cursos de Pós-Graduação em Física. Nestes materiais, analisamos a estrutura do sumário, identificando os capítulos e seções onde o tema relacionado ao spin do elétron era apresentado. A análise consistiu, então, em realizar o percurso didático proposto pelos autores em cada obra didática, de modo a identificar os trechos passíveis de categorização levando em conta as categorias analíticas já mencionadas.

É oportuno destacar que não figurou em nossos objetivos uma análise das potencialidades de ensino das referidas obras didáticas, mesmo porque tais potencialidades estão intimamente relacionadas com os diferentes objetivos e contextos de ensino.

Ressaltamos ainda que, na categoria referente à experiência disponível, as obras didáticas não necessariamente consideram o contexto teórico empírico do período referente ao episódio em análise, mas sim, consideram a importância de certos conhecimentos prévios cuja pertinência e coerência é didática e não necessariamente histórica.

2. Buchwald e Warwick (2001); Busch e Schroeck (1989); Commins (2012); Darrigol (2001); Duncan e Janssen (2019); Enz (1973); Forman (1968, 1970); Giulini (2008); Jammer (1989); Kaplan (2020); Kragh (1979, 1981); Martin (2002); Pais (1972); Rüdinger e Stolzenburg (1984); Seth (2013); Tomonaga (1997); von Meyenn e Schucking (2001).

3. Carrelli (1927); Dirac (1990); Einstein, Born e Kopff (1922); Fowler (1927); Guth (1927); Halprin (1978); Heslot (1983); Kronig (1926); Ohanian (1986); Pauli (1925, 1946, 1994); Rasetti e Fermi (1926); Sebens (2019); Thomas (1926, 1927); Uhlenbeck e Goudsmit (1926, 1925).

4. Cohen-Tannoudji, Diu e Laloë (2020); Eisberg e Resnick (1985); Halliday e Resnick (2009).

Importa ainda destacar que ao dispormos exemplos de segmentos analíticos na seção em que apresentamos os resultados e discussões, o leitor possivelmente deparar-se-á com o desconforto inerente à falta de contextualização, dificultando a pronta identificação daqueles trechos com as correspondentes categorias analíticas lá indicadas.

A estratégia empregada para contornar esta dificuldade ao longo do processo investigativo pautou-se pela elaboração de um texto em forma de narrativa, numa perspectiva semelhante àquela adotada por Norris *et al.* (2005, p. 538): “atos verbais consistindo em alguém dizendo a alguém que algo aconteceu”; um objeto textual que faz referência a um narrador, a um leitor e a eventos passados, possuindo características como estrutura, agentes (atores) e uma finalidade ou propósito. Uma exposição mais detalhada deste objeto textual estaria além do escopo deste trabalho.

V. Breve contextualização histórica

As primeiras tentativas para verificação de efeitos magnéticos sobre a luz, empreendidas por Michael Faraday (1791-1867), ocorrem por volta do ano de 1845, mas as primeiras evidências experimentais de efeitos magnéticos sobre espectros luminosos são obtidas por Pieter Zeeman (1865-1943) no ano de 1896 (Forman, 1970; Jammer, 1989).

No fenômeno inicialmente considerado por Zeeman, um campo magnético externo atuando sobre uma amostra atômica provocava desdobramentos simples nas linhas espectrais produzidas pela amostra. Posteriormente, sob certas circunstâncias, eram produzidas “anomalias na divisão de linhas espectrais emitidas por átomos colocados em um campo magnético” (Forman, 1968, p. 159), compreendendo, assim, o denominado efeito Zeeman anômalo.

As primeiras abordagens teóricas foram elaboradas por Hendrik Lorentz (1853 – 1928), a partir de sua teoria dos elétrons (termo ainda não empregado à época), que além de explicar satisfatoriamente os resultados obtidos por Zeeman, ofereceu também algumas previsões que foram oportunamente confirmadas. Desse modo, até meados de 1897 acreditava-se haver um quadro teórico experimental bem estabelecido, quando novos resultados experimentais revelaram que o padrão inicialmente estabelecido para o então denominado efeito Zeeman era incompleto. As investigações concentraram-se em identificar o novo padrão de divisões das linhas espectrais (em geral denominados multipletos), que passou a ser denominado Efeito Zeeman Anômalo, estabelecendo em definitivo que a explicação dada por Lorentz era incompleta (Duncan; Janssen, 2019; Forman, 1968).

As duas primeiras décadas do século XX são também marcadas por avanços na teoria atômica e seus modelos, com destaque para a teoria de Niels Bohr (1885-1962), a qual estava inserida em um novo quadro teórico conceitual, precursor da mecânica quântica. O modelo de Bohr fora proposto em 1913 para solucionar o problema da instabilidade presente no modelo atômico de Ernest Rutherford (1871-1937), combinando a física clássica com as ideias inovadoras sobre a quantização da energia (Raicik, 2023). O caráter descritivo do modelo de

Bohr foi ampliado a partir de modificações importantes introduzidas por Arnold Sommerfeld (1868-1951), agregando novos elementos da física clássica (como as órbitas elípticas) e aspectos da teoria da relatividade de Albert Einstein (1879-1955) (Eisberg; Resnick, 1985).

A problemática que originou o conceito de spin do elétron relaciona-se diretamente à anomalia Zeeman, isto é, à descrição da estrutura complexa do espectro atômico dos elementos alcalinos. Um átomo alcalino (e os alcalinos terrosos ionizados) “se constitui, em essência, de um caroço de gás nobre inerte mais um único elétron que se move numa subcamada externa” (Eisberg; Resnick, 1985, p. 349), diferindo do átomo de hidrogênio essencialmente em apenas um aspecto: o elétron de valência está sujeito a um campo não estritamente coulombiano, decorrente dos elétrons das subcamadas mais internas, conjuntamente, e do núcleo atômico positivo (Jammer, 1989). Considerando apenas as excitações do elétron de valência, buscava-se descrever o espectro óptico gerado a partir das transições do referido elétron para níveis de energia superiores, tomando por base a teoria vigente para o átomo de hidrogênio de Bohr-Sommerfeld (Tomonaga, 1997), a partir da qual não era possível descrever adequadamente a anomalia Zeeman (Kragh, 1979; 1999).

Sem que se soubesse ao que atribuir a origem da estrutura complexa do efeito Zeeman anômalo, proposições cada vez mais complexas e especializadas foram sugeridas, contribuindo paulatinamente para consolidar certos métodos e concepções teórico epistêmicas, em parte sintetizados pelo Princípio da Correspondência proposto por Bohr em 1923, o qual se estabelece como um importante elemento balizador na descrição de sistemas quânticos no período correspondente à velha mecânica quântica (Livramento, 2017).

Este princípio irá também influenciar as novas proposições que buscavam solucionar o problema do efeito Zeeman anômalo, tendo de um lado a tradição do Instituto de Física Teórica de Copenhagen, inaugurado em 1921 e liderado por Bohr e do outro, Sommerfeld – e seus destacados alunos, Werner Heisenberg (1901-1976) e Wolfgang Pauli (1900-1958) – e Alfred Landé (1888-1976), cujas abordagens eram pautadas por regras de seleção (Darrigol, 2001), evitando assim a concepção atômica em termos de imagens. Nenhuma destas correntes, no entanto, era capaz de dar conta da problemática estabelecida pela anomalia Zeeman (Forman, 1968).

No contexto sociopolítico, os efeitos da primeira grande guerra ainda eram marcantes. A Teoria da Relatividade tornara-se um ponto de fuga para muitos dos efeitos traumáticos provocados pela guerra, irrompendo “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” (Dirac, 1990, p. 131). Em relação a este tema, Pauli é reconhecidamente um especialista e árduo defensor da teoria de Einstein, produzindo um pequeno e impactante tratado sobre a relatividade (Einstein; Born; Kopff, 1922).

Por volta de 1925, a espectroscopia experimental ocupava-se basicamente de dois grandes problemas: as complexidades envolvidas na anomalia Zeeman e o ordenamento dos

espectros de raio-X para explicar o arranjo periódico dos elementos químicos (Buchwald; Warwick, 2001). O cenário teórico fenomenológico indicava claramente a necessidade de um quarto número quântico, dando início a uma acirrada disputa científica entre Sommerfeld, Landé e Pauli (Tomonag, 1997) para resolver o quebra-cabeça dos multipletos, i.e., da anomalia Zeeman.

Uma proposição explicativa que exerceu grande influência foi elaborada por Landé, na qual propunha modelar o caroço alcalino atribuindo-lhe uma assimetria, resultando assim em um momento angular residual não nulo e este, em interação com o momento angular do elétron óptico constituiria o mecanismo magnético interno dos elementos alcalinos que era perturbado pela ação de um campo magnético externo, resultando na anomalia Zeeman observada. Contudo, o modelo de Landé apresentava sérias dificuldades, algumas delas duramente criticadas por Pauli (1925).

Baseando-se na fórmula de Sommerfeld para a estrutura fina do átomo de hidrogênio, Landé propôs uma fórmula empírica análoga, com pequenas modificações para adequá-la aos átomos alcalinos. Empregando alguns dados experimentais bem estabelecidos, foi possível testar a sua consistência. Tendo obtido resultados satisfatórios, restava então derivar a referida equação a partir de seu modelo. Porém, ao proceder dessa forma, a equação por ele derivada daria substancialmente da fórmula empírica que propunha inicialmente. Adicionalmente, antes mesmo de empreender estes esforços, a separação entre os níveis de energia para o lítio já havia sido obtida por Heisenberg, por vias muito distintas. Diante deste cenário, Landé se convenceu de que obter uma explicação satisfatória para o efeito Zeeman anômalo usando forças magnéticas seria impossível. Neste ínterim, Pauli irá propor que a origem da anomalia Zeeman decorre não da interação entre o elétron e o caroço, mas devido a uma propriedade intrínseca ao próprio elétron (Tomonaga, 1995).

A ideia de atribuir aos elétrons um magnetismo intrínseco a partir de um movimento de autorrotação surge com Ralph Kronig (1904-1995). Apesar das possibilidades promissoras, já que resolia algumas das inconsistências presentes na derivação de Landé, mas não todas, a proposta de Kronig fora também rejeitada, pois conduzia a resultados em desacordo com os dados experimentais. Adicionalmente, a hipótese de um elétron autorrotativo mostrou-se também inconsistente com a teoria clássica do elétron.

A proposição do elétron autorrotativo é retomada por George Eugene Uhlenbeck (1900-1988) e Samuel Abraham Goudsmit (1900-1978), que a publicam primeiramente sem apresentar as derivações matemáticas que (supostamente) descreveriam os níveis de energia em acordo com os dados experimentais da anomalia Zeeman. Em seguida, Einstein os aconselha a empregarem o mesmo mecanismo relativístico originalmente considerado por Kronig, qual seja, que no referencial de repouso do elétron, o campo elétrico do núcleo é percebido como um campo magnético, sendo esta, a origem da interação magnética entre o elétron óptico e o caroço (Tomonaga, 1997).

A observação de Einstein encoraja Bohr a rever sua posição e a endossar a ideia do elétron autorrotativo (Bohr, 1926), agora proposta por Uhlenbeck e Goudsmit e oficialmente publicada (Uhlenbeck; Goudsmit, 1926), conferindo a estes cientistas a propriedade intelectual do feito. No entanto, assim como ocorreu para Kronig, também para a proposição de Uhlenbeck e Goudsmit persistiam algumas inconsistências, tanto de ordem lógica quanto fenomenológica. A despeito das várias inconsistências decorrentes do movimento rotativo do elétron apontadas por cientistas de renome, a contribuição de Llewellyn Hilleth Thomas (1903-1992) à proposição do elétron autorrotativo de Uhlenbeck e Goudsmit possibilitou finalmente uma adequada descrição dos dados experimentais relacionados ao efeito Zeeman anômalo.

A contribuição de Thomas consistiu essencialmente em generalizar a transformação de Lorentz para um sistema duplamente rotativo, tal como aquele do elétron óptico, que no modelo proposto por Uhlenbeck e Goudsmit além de rotacionar em torno de si mesmo, rotaciona também em torno do caroço alcalino (Tomonaga, 1997).

Diante deste cenário, até mesmo Pauli (com certa contrariedade, afinal era um fervoroso opositor da abordagem do elétron autorrotativo) teve de ceder espaço ao novo modelo. Assim, antes do advento da equação de Erwin Schrödinger (1887-1961), o entendimento do efeito Zeeman anômalo estava inteiramente embasado em uma descrição cinemática do elétron autorrotativo, a partir da junção de elementos de teorias não quânticas - o eletromagnetismo e a relatividade restrita (Tomonaga, 1995).

Pouco tempo depois, o spin do elétron passou a ser compreendido como um grau de liberdade característico de certos sistemas quânticos, sem correspondência com qualquer conceito clássico conhecido, colocando em dúvida a validade do Princípio da Correspondência (Giulini, 2008).

VI. Resultados e discussões

Nesta seção apresentamos os quantitativos dos segmentos analíticos extraídos do *corpus* de análise, bem como algumas considerações pertinentes à investigação realizada⁵. Para efeitos de maior clareza, incluímos exemplos de segmentos analíticos para cada uma das categorias analíticas. Os quantitativos em cada categoria analítica foram organizados pelo tipo de material textual de onde foram extraídos. Apresentamos abaixo, na Tabela 1, a síntese dos resultados obtidos na investigação da plausibilidade da hipótese da metáfora epistêmica no campo intracentífico da física.

5. A análise completa está disponível em Santana (2022).

Tabela 1 – Quantitativo de segmentos analíticos por categoria analítica e por tipo de material textual.

Categoria analítica	Textos históricos e historiográficos	Texto Didático Halliday & Resnick	Texto Didático Eisberg & Resnick	Texto Didático Cohen-Tannoudji, Diu e Laloë
Bissociação qualitativa	4	2	3	2
Bissociação quantitativa	3	-	1	-
Bissociação imagética	-	1	-	-
Experiência disponível	17	5	12	4
Critério de aceitação	10	-	1	1
Critério de rejeição	13	-	1	2
Contextualização	5	-	-	-
Manifestação de aceitação	5	-	1	-
Manifestação de rejeição	10	-	1	-
Reconfiguração	8	1	-	1
Literalização	1	15	7	10
Total	76	24	27	20

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

A partir dos documentos analisados extraímos 11 segmentos analíticos⁶ que evidenciaram a bissociação qualitativa, i.e., trechos que exprimem o processo bissociativo em linguagem não matemática. Como exemplo, destacamos:

[...] chamamos a 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).

Neste segmento, o ato bissociativo não reside pura e simplesmente na imagem do elétron autorrotativo, mas sim que tal concepção torna possível pensar a junção de conceitos do eletromagnetismo clássico (interação entre momentos de dipolo) e da relatividade restrita (campo elétrico gerado pela estrutura interna – formada pelas cargas positivas do núcleo e os elétrons das camadas inferiores à camada do último elétron – percebido como campo magnético pelo elétron em movimento relativo).

As derivações matemáticas engendradas pelo elétron autorrotativo conduzem a uma equação matemática, sendo esta, uma síntese de toda a trama de ideias que ela encerra – por

6. Pequenos trechos (proposições, equações, imagens etc.) extraídos da base documental.

esta razão consideramos que expressões matemáticas são também um modo de expressar o ato bissociativo. Em nossa análise, encontramos 4 segmentos relacionados à categoria da bissociação quantitativa, os quais exprimem, em linguagem matemática, as derivações lógico formais do ato bissociativo acima destacado.

A alusão ao elétron autorrotativo em linguagem não matemática está presente em todos os materiais analisados, ao passo que derivações matemáticas relacionadas ao movimento de autorrotação do elétron estão presentes em apenas dois deles. Notemos que, se a expressão matemática engendra, deriva, enfim conduz às consequências que estão apenas em potência na bissociação qualitativa, a ausência dos elementos matemáticos na descrição do conceito de spin pode levar a entendimentos e interpretações incompletas ou mesmo distorcidas da metáfora científica do elétron autorrotativo e consequentemente para o conceito de spin do elétron.

É oportuno mencionar a presença, em uma das obras didáticas, de imagens para ilustrar o elétron autorrotativo, o que nos levou a propor uma categoria analítica adicional que denominamos por bissociação imagética.

Em relação ao quadro da experiência disponível, extraímos 38 segmentos analíticos que exprimem aspectos qualitativos e quantitativos, relacionados não apenas à fenomenologia do efeito Zeeman anômalo, mas também aos quadros teórico conceitual e empírico mais abrangentes que envolvem o episódio científico considerado. Como exemplo, destacamos:

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 (Jammer, 1989, p. 125).

Este segmento analítico evidencia a pertinência das observações experimentais como elemento balizador para a proposição de ideias e formulação de hipóteses.

A referida categoria é a que apresenta o maior número de segmentos analíticos extraídos da base documental analisada; em conjunto, estes segmentos analíticos explicitam as várias dimensões (metodológica, experimental, conceitual etc.) do estado do conhecimento no período em questão. O quadro da experiência disponível – ou do conhecimento disponível –, além de estimular a proposição de metáforas epistêmicas, fornece também subsídios para a seleção das mesmas, com base nas decisões tomadas pela comunidade científica, pautadas pela 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*; o estado do conhecimento, além de técnica e formalmente estruturado, é, pois, historicamente estabelecido.

Nas categorias relacionadas aos critérios de aceitação e de rejeição, destacamos 12 e 16 segmentos analíticos, respectivamente. São trechos que explicitam os critérios empregados para justificar as manifestações de aceitação/rejeição dos membros da comunidade científica, frente a proposição de metáforas epistêmicas. Como exemplo, destacamos o trecho abaixo onde os subtrechos [1] e [2] exprimem motivos favoráveis à proposição do elétron autorrotativo:

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

No conjunto dos segmentos analíticos referentes aos critérios de aceitação/rejeição (Tabela 1), constatamos a presença de aspectos decisórios objetivos rigidamente compartilhados por toda a comunidade científica (critérios lógicos, formais ou empiricamente estabelecidos), bem como de aspectos intersubjetivos (ontológicos, epistêmicos e de visões de mundo), não necessariamente compartilhados pela totalidade da comunidade científica.

Tais critérios entram em jogo em decorrência das possibilidades interpretativas carreadas pela metáfora que, além da novidade conceitual, pode também suscitar inconsistências que, apesar do caráter objetivo, surpreendentemente não captam a adesão da comunidade científica em sua totalidade – em seu minucioso trabalho, Rasetti e Fermi (1926) apontam vantagens e problemas advindos de atribuir ao elétron uma geometria, atributo este que é inescapável a qualquer corpo em autorrotação.

Estes autores afirmam categoricamente: “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 [...]*” (1926, p. 9, grifo nosso). Destacamos, adicionalmente, que o aspecto interpretativo dúvida da metáfora epistêmica aqui evidenciado fora previamente destacado por Palma: “o poder explicativo e inovador da metáfora também pode ser sua fraqueza” (2015, p. 27).

Na categoria da contextualização, que se refere ao contexto sociocultural relacionado ao período histórico do episódio investigado, extraímos 5 segmentos analíticos do corpus de análise que evidenciam a relevância de aspectos sociais, políticos, econômicos, culturais etc., na proposição de metáforas epistêmicas. De acordo com Palma (2015), estes aspectos contemplam os ideais de sociedade e de mundo em um dado momento histórico, conformando certos critérios relativamente subjetivos de legitimidade às metáforas epistêmicas. Como exemplo, destacamos:

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).

Este segmento analítico evidencia a influência de aspectos políticos sobre o posicionamento de Sommerfeld em relação a rejeição de um processo bissociativo proposto por Landé, não explicitado no segmento analítico em questão. Não foram encontrados segmentos analíticos relacionados a esta categoria analítica nos textos didáticos analisados.

As manifestações de aceitação e rejeição refletem a mobilização dos membros de uma comunidade científica frente à proposição de metáforas científicas. De acordo com Palma (2015), toda metáfora epistêmica produz tensões advindas de sua adequação/inadequação, materializando-se nos posicionamentos dos sujeitos. Destacamos 6 segmentos analíticos que exprimem o posicionamento de cientistas em favor da bissociação relacionada ao elétron autorrotativo e 11 segmentos analíticos que exprimem posicionamentos contrários. Como exemplo, citamos:

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; 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.) Pode-se bem imaginar – tais problemas apareceriam como velocidades de superfície da ordem de 137c (PAIS, 1972, p. 84).

O segmento analítico considerado exprime o posicionamento contrário de Lorentz em relação à ideia do elétron autorrotativo. No âmbito dos textos didáticos, apenas uma das obras analisadas apresentou segmentos analíticos nas categorias em questão, um em cada uma delas, conforme exposto na Tabela 1.

Em relação à categoria da reconfiguração extraímos 10 segmentos analíticos que evidenciaram o efeito da reconfiguração da experiência disponível. Lembremos que todo processo bissociativo, seja ele exitoso ou não, estimula diferentes modos de ver e interpretar o cenário científico em questão (Koestler, 2014); podem, então, de acordo com Palma (2015), enriquecer e/ou reconfigurar a base empírica. Como exemplo, citamos:

[o] trabalho de Thomas teve um tremendo impacto na Europa. Afinal, as discrepâncias entre teoria e experimento no espaçamento de nível nos termos de dupletos foram completamente resolvidas. Além disso, as estruturas finas de H, He⁺, Li⁺⁺, Be⁺⁺⁺ mostraram ser casos especiais dos termos do dupletos alcalino contrários à interpretação de Sommerfeld (Tomonaga, 1997, p. 40).

Conforme indicado no segmento analítico destacado, a metáfora epistêmica do elétron autorrotativo não apenas solucionou uma problemática, como também conduziu a uma reinterpretação e consequente extensão da experiência disponível. A estrutura fina mencionada era uma problemática à parte. Supostamente decifrada pela teoria de Sommerfeld, fora agora revista e incorporada ao novo quadro teórico empírico.

Por fim, destacamos 33 segmentos analíticos que evidenciam a literalização do conceito de spin do elétron. A literalização – etapa final da metáfora epistêmica – se inicia tão logo a inconveniência lógica inicial, carreada por uma proposição metafórica, passa a ser percebida como relativamente aceitável (Turbayne, 1974). Trata-se de um processo temporalmente longo, se comparado ao ato inaugural da metáfora, constituindo-se paulatinamente à medida que a novidade conceitual se estabelece como verdade científica,

quando então os vestígios do processo metafórico já não são mais evidentes (Palma, 2015). O conhecimento novo adquire estabilidade no interior da comunidade científica; as tensões de adequação/inadequação já estão essencialmente 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. Como exemplo, destacamos:

*[...] os físicos muito rapidamente, e quase completamente, esqueceram que alguma vez existiu um enigma do duplo. De fato, pouco mais de um ano após Uhlenbeck e Goudsmit apresentarem sua proposta, Friedrich Hund assinou o prefácio de seu *Linienspektren 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).*

Juntamente com a categoria da experiência disponível, a categoria da literalização totaliza uma quantidade expressiva de segmentos analíticos. A predominância deste quantitativo entre as obras didáticas é uma constatação de que a nova ideia se transformou em ortodoxia. Adicionalmente, em relação às obras didáticas, a ausência de segmentos analíticos em várias das categorias analíticas pode ser interpretada como um indicativo do apagamento dos traços metafóricos da metáfora epistêmica intracientífica do elétron autorrotativo.

Mediante os resultados aqui apresentados, consideramos ter evidenciado satisfatoriamente os elementos conceituais e os aspectos que caracterizam o processo de metáfora epistêmica nos termos de Palma (2015). Assim, consideramos plausível a hipótese da metáfora epistêmica, sobretudo no âmbito intracientífico da física, nos termos de Santana, Silva e Cruz (2022).

VII. Considerações finais

O presente trabalho foi integralmente baseado em uma tese de doutorado; mais especificamente, ele compreende a síntese de um dos capítulos da referida produção, motivo pelo qual tivemos que optar por uma exposição relativamente sintética.

Nesta exposição, assumimos que a proposição da metáfora epistêmica em nível intracientífico não altera os preceitos conceituais e estruturantes da noção de metáfora epistêmica mais geral. No entanto, nossa investigação evidenciou que, ao menos para o campo da Física, atos bissociativos podem manifestar-se de modo complementar, nas formas qualitativa e quantitativa, este último diferindo do anterior pelo emprego da linguagem matemática. Afirmamos, por conseguinte, que este aspecto é inerente, e, portanto, esperado, em

qualquer nível intracientífico no qual a linguagem matemática desempenhe um papel lógico formal.

Levando-se em conta os resultados de nossa investigação, poder-se-ia argumentar que as características que pusemos em evidência no episódio do spin do elétron poderiam ser evidenciadas de igual forma por outras perspectivas analíticas, fundamentadas por exemplo, pela História e Filosofia da Ciência, ou mesmo de forma mais ampla, por via da Natureza da Ciência. No entanto, convém mencionar que há ao menos um aspecto que indica a subjetividade de um fenômeno metafórico, a saber, o ato bissociativo. A junção de ideias pertencentes a campos conceituais distintos com o intuito de elaborar um pensamento inédito, cujo ato inaugural traz consigo uma perspectiva inovadora, mas também contraintuitiva e desafiadora, constitui a evidência inequívoca dos processos de metáfora epistêmica, o que confere à nossa proposta analítica identidade e finalidade próprias frente àquelas mencionadas.

A análise do episódio histórico referente à formulação do conceito de spin do elétron revelou que ele emergiu de uma sucessão de metáforas epistêmicas (com Landé, na forma de modelos; com Sommerfeld, na forma de regras de seleção) e/ou refinamentos a partir de uma dada bissociação (com Kronig, Uhlembeck e Goudsmit e Thomas na acepção do elétron autorrotativo). Cada uma destas contribuições reconfigurou em maior ou menor grau o quadro da experiência disponível, tornando-se mais ou menos relevante para a formulação ou reformulação das metáforas epistêmicas posteriores.

Este aspecto parece indicar que em nível intracientífico uma metáfora científica pode não ser capaz de sozinha, estabelecer uma interpretação para um dado quadro fenomenológico. Ao contrário, podem ser necessárias múltiplas contribuições metafóricas para estabelecer uma nova matriz de pensamento e suas estratégias, e, enfim, estruturar um dado quadro conceitual e interpretativo. Neste movimento, uma ou outra metáfora epistêmica mais ampla, embora provisória, pode ser suficientemente impactante para consolidar-se como um pano de fundo relativamente duradouro, como foi o caso da composição originalmente promovida por Bohr entre a mecânica clássica e as ideias inaugurais sobre a quantização da energia e da luz, em seu modelo para o átomo de hidrogênio, e demais generalizações encerradas no Princípio da Correspondência.

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 a 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 dela, constituem evidências de um processo de literalização em curso. Por outro lado, os segmentos analíticos que indicamos propriamente na categoria da literalização correspondem às evidências do processo de literalização já consolidado, ou seja, evidenciam o conhecimento novo, já estabilizado – a metáfora epistêmica cristalizada –, quando então, além de ser

considerado 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.

Frente aos resultados obtidos (em especial, a identificação do ato bissociativo), afirmamos a plausibilidade da hipótese da metáfora epistêmica, sobretudo, em nível intracientífico. Dito de outro modo, consideramos que a gênese do conceito de spin do elétron é um autêntico episódio histórico de metáfora epistêmica.

A identificação de um episódio histórico de metáfora epistêmica possibilita a elaboração de narrativas históricas, estas com a peculiaridade de serem multidimensionais, no sentido de que contemplam variados aspectos da natureza da ciência (conceituais, filosóficos, epistêmicos, políticos, sociológicos, culturais etc.). Neste sentido, o objeto textual derivado de um episódio de metáfora epistêmica pode apresentar potenciais implicações para a educação científica e tecnológica, motivo pelo qual mereça converter-se em objeto de investigação.

Podemos ainda afirmar que a metodologia apresentada encerra um potencial caráter analítico, não explorado em nossa investigação, a saber, a possibilidade de categorizar textos historiográficos e didáticos frente à distribuição dos segmentos analíticos nas categorias anteriormente propostas que cada fonte isoladamente apresenta.

Quaisquer que sejam a pertinência e o alcance das potencialidades educacionais e analíticas mencionadas, ou mesmo sobre outras que ainda não fomos capazes de vislumbrar, somente novas investigações poderão trazer à luz elementos conclusivos acerca delas. Evidentemente, é necessário também identificar novos episódios históricos de metáfora epistêmica, sobretudo no âmbito de outras ciências básicas, de modo a generalizar os resultados aqui apresentados.

Referências bibliográficas

ABRANTES, P. Problemas metodológicos em historiografia da ciência. Em: SILVA FILHO, W. J. DA (Ed.). **Epistemologia e ensino de ciências**. Salvador: Arcadia, UESAL, 2002. p. 51-91.

BOHR, N. Spinning electrons and the structure of spectrum. **Nature**, v. 117, n. 2938, p. 264-265, 1926.

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.

COHEN-TANNOUDJI, C.; DIU, B.; LALOË, F. **Quantum mechanics Volume II**: angular momentum, spin and approximation methods. 2. ed. [s.l.] Wiley-VCH, 2020. v. II

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. **Quantum physics of atoms, molecules, solids, nuclei, and particles**. 2nd ed. New York: Wiley, 1985.

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.

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.

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.

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.

IRZIK, G.; NOLA, R. New Directions for Nature of Science Research. Em: 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.

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 Substantiation. **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. **Investigação Qualitativa em Educação**, 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. Em: SILLS, D. L. (Ed.). **International Encyclopedia of the Social Sciences**. [s.l.] The Macmillan Company & The Free Press, 1968. v. 14p. 74-82.

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

LIVRAMENTO, S. **Implicações culturais da Teoria Quântica**: caminhos metafóricos e as apropriações indébitas. 2017. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MARTIN, A. History of Spin and statistics. **arXiv:hep-ph/0209068**, 6 set. 2002.

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. Em: 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.

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.

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.

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 Médio”. **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. Em: SALAM, A.; WIGNER, E. P. (Eds.). **Aspects of quantum theory**. Cambridge [Eng.]: University Press, 1972. p. 79-93.

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 Zeeman-Effekt. **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, 1994.

RAICIK, A. C. Um resgate histórico-epistemológico do átomo de Bohr: uma gênese nem sempre contada e suas implicações ao ensino de ciências. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 45, p. e20230039, 2023.

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. 5. p. 219-240.

SANTANA, F. B. **A construção do conceito de spin do elétron como um processo de Metáfora Epistêmica intracientífica: implicações para a educação científica**. 2022. 310 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/234825/PECT0499-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 1 abr. 2024.

SANTANA, F. B.; SILVA, H. C. DA; CRUZ, F. F. DE S. Metáforas científicas: a hipótese da metáfora epistêmica como um processo subjacente à produção de conhecimento científico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 39, n. 3, p. 859-887, dez. 2022.

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, 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.

SILVA, A. dos S.; REIS, J. C. de O.; REGO, S. C. R. Publicações sobre o ensino de física moderna: relações construídas entre artes e física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 36, n. 2, p. 366-382, 2019.

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 metafora**. Ciudad de México: Fondo del Cultura Económica, 1974.

UHLENBECK, G. E.; GOUDSMIT, S. Spinning electrons and the structure of spectrun. **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.



Direito autoral e licença de uso: Este artigo está licenciado sob uma [Licença Creative Commons](#).