

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

Milton Aníbal Luna Rojas

CONSIDERAÇÕES HISTÓRICAS E EPISTEMOLÓGICAS A PARTIR DO
MODELO ATÓMICO DE BOHR

JUIZ DE FORA

2025

MILTON ANÍBAL LUNA ROJAS

**CONSIDERAÇÕES HISTÓRICAS E EPISTEMOLÓGICAS A PARTIR DO
MODELO ATÓMICO DE BOHR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Química.
Área de Concentração: Educação em Química.

Orientadora: Profa. Dra. Ingrid Nunes Derossi

JUIZ DE FORA

2025

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Rojas, Milton Aníbal Luna Rojas.

Considerações históricas e epistemológicas a partir do modelo atômico de Bohr / Milton Aníbal Luna Rojas Rojas. -- 2025.
129 p.

Orientadora: Ingrid Nunes Derossi Derossi

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Química, 2025.

1. Modelo atômico de Bohr. 2. Estrutura atômica. 3. Ensino de química. I. Derossi, Ingrid Nunes Derossi, orient. II. Título.

Milton Aníbal Luna Rojas

Considerações históricas e epistemológicas a partir do modelo atômico de Bohr

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Química. Área de concentração: Química.

Aprovada em 29 de setembro de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Ingrid Nunes Derossi - Orientadora

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Edwin German Garcia

Universidad Del Valle

Prof. Dr. Waldmir de Araújo Neto

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Profa. Dra. Andréia Francisco Afonso

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Antonio Carlos Sant'Ana

Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora, 25/09/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Ingrid Nunes Derossi, Professor(a)**, em 29/09/2025, às 17:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andreia Francisco Afonso, Professor(a)**, em 29/09/2025, às 18:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Waldmir Nascimentyo de Araujo Neto, Usuário Externo**, em 29/09/2025, às 18:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Carlos Sant Ana, Professor(a)**, em 02/10/2025, às 08:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **EDWIN GERMAN GARCIA ARTEAGA, Usuário Externo**, em 09/10/2025, às 13:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



AGRADECIMENTO

Neste momento da minha vida, devo prestar uma merecida homenagem à minha avó, Ofelia Rojas, "Lita", como eu a chamava. Ela foi minha mãe e meu pai, e me tornou a pessoa que sou: alguém que tenta superar suas falhas e se esforça para manter a coerência entre suas ações e seus pensamentos. A ela, meu respeito, minha admiração e minha infinita gratidão. Que você descanse em paz, Lita.

Devo também expressar minha gratidão à minha irmã, Heidy Rojas, que tem sido meu maior apoio nestes últimos anos. Seu apoio foi crucial para que eu permanecesse na Universidade Federal de Juiz de Fora quando a vida testou minha determinação. Sou grata à vida por me dar uma irmã como você.

Ao meu filho, Jacobo Luna, devo, antes de mais nada, um pedido de desculpas pelos meus erros como pai, embora tenha certeza de que, juntamente com meus sucessos, eles contribuíram para o seu desenvolvimento e para os objetivos que hoje são motivo de orgulho e propósito para mim. Espero que você tenha muitos triunfos em sua promissora jornada acadêmica. Eu te amo, filho.

À minha filha adotiva, Vicky Rojas, expresso minha gratidão por seu apoio e companheirismo inabaláveis durante meus longos dias de trabalho ao longo de tantos anos. Espero que a vida lhe ofereça oportunidades valiosas e que você tenha a clareza necessária para continuar construindo sua vida.

À Professora Dra. Ivoni de Freitas Reis, por aceitar a orientação do meu projeto de pesquisa, pelo apoio constante em todos os momentos difíceis, pela confiança em minhas habilidades e por sua amizade. Minha mais profunda gratidão, Professora Ivoni.

À Professora Dra. Ingrid Nunes Derossi, que concluiu a orientação da minha tese durante a ausência da Professora Ivoni devido à sua licença, meu muito obrigado pela sua inestimável ajuda.

Aos professores da banca Dr. Edwin Germán García, Dr. Waldmir de Araujo Neto, Dra. Andréia Francisco Afonso e Dr. Antonio Carlos Sant'Ana, pelas valiosas sugestões e contribuições que possibilitaram novas reflexões e horizontes.

Aos professores Deividi Marcio Marques e José Guilherme Lopes, que contribuíram para o desenvolvimento desta tese, com suas contribuições durante a qualificação.

A Rudilson Ié, meu irmão africano, que me acolheu durante as frias noites de inverno que passei ao relento em Juiz de Fora, jamais poderei retribuir-lhe com nada além do amor que se pode dar a um irmão.

Agradeço a todo o grupo de pesquisa GEEDUQ, cujo apoio foi não só acadêmico, mas também emocional. Um agradecimento especial a Kevin Pereira, Leonardo Lessa, Karine Fernandes e Giovana Medeiros, que estarão sempre em meu coração, apesar de nossos caminhos diferentes.

À equipe do Programa de Pós-Graduação em Química da UFJF, em especial ao Professor Alexandre Cuin e às assistentes administrativas Mariana Silva e Maristela Meller, que sempre se mostraram dispostas a resolver qualquer questão administrativa.

Por fim, agradeço à FAPEMIG pelo apoio financeiro a esta pesquisa e ao povo brasileiro, cujo esforço e trabalho geram a riqueza que sustenta o sistema educacional.

Essa descoberta, que revelou uma característica da atomicidade nas leis da natureza que vai muito além da antiga doutrina da divisibilidade limitada da matéria, na verdade nos ensinou que as teorias clássicas da física são idealizações que podem ser aplicadas sem ambiguidade apenas no limite em que todas as ações envolvidas são grandes em comparação ao quantum. A questão em pauta é se o abandono de um modo causal de descrição dos processos atômicos envolvidos nos esforços para lidar com a situação deve ser considerado um afastamento temporário de ideais que devem ser revividos, ou se estamos lidando com um passo irrevogável em direção à obtenção da harmonia adequada entre a análise e a síntese dos fenômenos físicos. (Bohr, 1957, p. 33, tradução própria)

RESUMO

O conhecimento da estrutura da matéria é essencial para a compreensão da química moderna, que inclui conceitos básicos de mecânica quântica, o mesmo que para a explicação de inúmeros fenômenos químicos e físicos. Envolve a ideia da descontinuidade da matéria e da estrutura atômica. Por outro lado, de acordo com a literatura, existem muitas dificuldades no ensino de química no ensino médio, o que justifica uma revisão sistemática das propostas alternativas que têm sido implementadas em contextos escolares no território latino-americano, servindo como pano de fundo. Visto que este trabalho é concebido como uma contribuição para o contexto do ensino médio, limita-se à estrutura atômica. Foca-se na revisão histórica e epistemológica do modelo de Bohr, por ser considerado um marco da mudança epistemológica e até mesmo ontológica da ciência no início do século XX, pois foi o modelo atômico que começou a marcar uma ruptura com princípios básicos da ciência clássica. Revisitar esse cenário histórico facilitaria a introdução de conceitos quânticos no ensino médio. Por fim, são propostas algumas considerações didáticas para atingir esse objetivo.

Palavras-chave: ensino de química; estrutura atômica; modelo atômico de Bohr.

ABSTRACT

Knowledge of the structure of matter is essential for understanding modern chemistry, which includes basic concepts of quantum mechanics, as well as for explaining numerous chemical and physical phenomena. It involves the idea of the discontinuity of matter and atomic structure. On the other hand, according to the literature, there are many difficulties in teaching chemistry in secondary education, which justifies a systematic review of alternative proposals that have been implemented in Latin American school contexts, serving as a backdrop. Since this work is conceived as a contribution to the field of secondary education, it is limited to atomic structure. It focuses on the historical and epistemological review of the Bohr model, considered a milestone in the epistemological and even ontological shift of science at the beginning of the 20th century, as it was the atomic model that marked the beginning of a break with the basic principles of classical science. Revisiting this historical scenario would facilitate the introduction of quantum concepts in secondary education. Finally, some didactic considerations are proposed to achieve this objective.

Keywords: chemistry teaching; atomic structure; Bohr's atomic model.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. O ENSINO DA QUÍMICA NO ENSINO MÉDIO	14
2.1 FUNDAMENTOS DO ENSINO E DA APRENDIZAGEM DE QUÍMICA NO ENSINO MÉDIO.....	20
2.2 BASES TEÓRICAS DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA E DA FILOSOFIA DA CIÊNCIA	32
2.3 CONTRIBUIÇÃO DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA E DA FILOSOFIA DA CIÊNCIA PARA O ENSINO DE QUÍMICA NO ENSINO MÉDIO.....	40
3. BOHR, HUMANISTA E CIENTISTA	46
3.1 CONTEXTO HISTÓRICO, POLÍTICO, CIENTÍFICO E FILOSÓFICO DE BOHR ..	48
3.2 CONTEXTO FAMILIAR.....	62
3.3 BOHR, O CIENTISTA.....	65
3.4 EL PENSAMIENTO DE NIELS BOHR.....	73
4. BOHR Y LA ESTRUCTURA ATÓMICA	83
4.1 A CONCEPÇÃO CLÁSSICA DA ESTRUTURA DA MATÉRIA.....	84
4.2 ABORDAGEM DE BOHR.....	95
5. ALGUMAS IMPLICACIONES DIDÁCTICAS DEL MODELO ATÓMICO DE BOHR.....	108
6. CONCLUSÕES.....	112
REFERÊNCIAS.....	118

1 INTRODUÇÃO

No mundo atual, é necessário dispor de informações adequadas e relevantes para o exercício de uma cidadania responsável em relação à sociedade, ao meio ambiente e aos semelhantes. A capacidade de gerir a informação implica, no mínimo, dispor das ferramentas conceituais e metodológicas adequadas (Cañal, 2004). Nesse sentido, é válido questionar quais conceitos científicos devem ser aprendidos no contexto escolar, especificamente em ciências químicas, pois o objetivo não é cobrir um grande volume de informações que acabem sendo um conjunto de conceitos sem relação entre si, que os alunos decoram para responder nas provas aplicadas em sala de aula, mas sim conceitos que permitam ao aluno transformar seu sistema cognitivo, com o qual ele pode reorganizar dados e adquirir novos conhecimentos (Gagliardi, 1986).

Este tipo de aprendizagem é significativo para os alunos porque se baseia em suas próprias estruturas conceituais para modifica-las e expandir suas ideias. Caso contrário, a prática pedagógica pode se tornar dogmática, contraria ao espírito científico pretendido, fomentando visões distorcidas da atividade científica. Consequentemente, contribui para a apatia dos alunos em relação à ciência e para a falta de interesse dos cidadãos pelas relações entre ciência, sociedade e meio ambiente.

De fato, essa relação implica alfabetização científica, caso em que o ensino de ciências deve fornecer cenários críticos (Henderson *et al.*, 2015) não apenas para a aprendizagem de conceitos científicos, mas também para a compreensão de sua natureza e da maneira como a ciência é feita: investigando problemas, usando modelos, conduzindo pesquisas, interpretando dados, argumentando a partir de evidências, avaliando e comunicando informações (Martins, 2024).

Por outro lado, pesquisas em educação científica mostram que a aprendizagem científica é afetada por diversos fatores, incluindo a estrutura lógica do conteúdo e seu nível de rigor formal, bem como as concepções alternativas dos alunos, que não são elementos passivos facilmente elimináveis, mas sim elementos ativos que distorcem a compreensão dos alunos (Campanario; Moya, 1999). E, se compreendermos o aluno como um ser humano integral, devemos reconhecer o papel das emoções como outro fator que afeta a aprendizagem (Wilkes *et al.*, 2024).

Em relação ao conteúdo, parece crucial que os alunos aprendam conceitos da ciência moderna, particularmente aqueles relacionados à mecânica quântica. Justamente porque, além de estar presente na tecnologia de uso comum (Simon *et al.*, 2014), se tornou um conhecimento

cotidiano distorcido, constantemente manipulado para fins de propaganda e publicidade enganosa, o que acaba gerando confusão para alunos e cidadãos. É claro que, além disso, trata-se de ter o conhecimento adequado para processar informações adequadamente e participar ativamente dos desenvolvimentos socioeconômicos do país em que vivem.

Como o nascimento da mecânica quântica representou uma ruptura com a mecânica clássica e, de fato, uma nova concepção de ciência e de mundo, com seus próprios postulados epistêmicos e ontológicos, sem que a mecânica clássica tivesse desaparecido ou perdido sua validade, é pertinente olhar para trás, para aquelas primeiras décadas do século XX. Ali, encontramos a figura de Niels Bohr, que se tornou um dos principais cientistas comprometidos com a revisão dos fundamentos filosóficos das ciências físicas, possibilitando a compreensão dos fenômenos quânticos. Como James Killian (1904-1988) afirmou na cerimônia do Prêmio Átomos pela Paz em 1957:

Você deu aos homens a base para uma maior compreensão da matéria e da energia [...] Esses acadêmicos adquiriram do seu Instituto não apenas uma enorme compreensão científica, mas também um espírito humano de preocupação ativa pela utilização adequada do conhecimento científico... Você demonstrou que o domínio da ciência e o domínio das humanidades são, na realidade, um só. Ao longo da sua carreira, você exemplificou a humildade, a sabedoria, a humanidade e o esplendor intelectual que o Prêmio Átomos para a Paz reconheceria. (*apud* Pais, 1993, p.2, tradução própria).

Em sua resposta, Bohr reiterou, mais uma vez, sua esperança na paz mundial e na cooperação entre as nações para evitar uma corrida armamentista que levaria a novas guerras mundiais. Como descrevem as palavras de Killian, Bohr era uma combinação de qualidades: criador da ciência, professor de ciência, porta-voz não apenas da ciência em si, mas também da ciência como fonte potencial para o bem comum, um amante da paz e um firme defensor do respeito à dignidade humana. Como cientista, Bohr foi um dos fundadores da teoria quântica da estrutura da matéria, e um dos três homens que tornaram possível o nascimento do modo quântico de pensamento. Os outros dois são Planck, descobridor do quantum de ação, e Einstein, descobridor do quantum de luz. Bohr propôs com sucesso a ligação entre as teorias antigas e novas por meio do princípio da correspondência.

Essa teoria quântica é um dos maiores sucessos da física moderna, mas também um grande desafio à nossa intuição, pois torna impossíveis as descrições clássicas limitadas a imagens pictóricas. Apesar da validade do formalismo, ele não fornece uma imagem imediata

da realidade microscópica, o que representa um sério problema, visto que o objetivo da física é descrever a realidade, bem como manipulá-la.

Em sua ideia de complementaridade, Bohr expressou efetivamente o abandono do modelo de descrição causal do espaço-tempo. Isso tornou impossível pensar em um elétron como um objeto físico semelhante em todos os aspectos a um corpo material localizável no espaço e no tempo e que se move ao longo de uma trajetória específica. Os objetos da microfísica são objetos de natureza mais complexa (Petrucchioli, 1993, p. 7, tradução própria).

Uma das soluções para o desafio, e a mais dominante, foi a interpretação de Copenhague, frequentemente entendida como sinônimo de indeterminismo, princípio da correspondência, interpretação estatística da função de onda e interpretação complementar de Bohr para certos fenômenos atômicos. No entanto, hoje, temos informações suficientes para entender que esse termo abrange diferentes interpretações, embora seja amplamente aceito que a perspectiva que compartilham se origina na obra de Bohr (Howard, 2004).

Essa riqueza intelectual deve ser trazida para a sala de aula, não apenas como um elemento histórico por excelência para motivar as discussões sobre ciência e sua relação com a filosofia em sala de aula, mas também porque a mecânica quântica transformou a sociedade em todos os sentidos, e os alunos precisam entendê-la, pelo menos em seus fundamentos, para evitar que se tornem sujeitos vítimas de desinformação e cidadãos pouco ou nada responsáveis nas decisões que afetam as relações entre ciência, meio ambiente e a sociedade.

Este trabalho tem como objetivo fornecer alguns elementos históricos e epistemológicos baseados no modelo atômico de Bohr, que podem ser úteis no ensino de química, no ensino médio, procurando contribuir para a solução do problema levantado, especificamente na compreensão da estrutura da matéria, considerada um conceito estruturante a partir do qual os alunos teriam marcos conceituais para se apropriarem de novos conceitos que fazem parte da química.

O trabalho está dividido em quatro capítulos. O primeiro, "Ensino de Química no Ensino Médio", parte de uma revisão sistemática de artigos publicados sobre o ensino de química no ensino médio. Visa obter conhecimento em primeira mão do nível de pesquisa e das abordagens utilizadas nessa área. O segundo, "Bohr, Humanista e Cientista", busca compreender o humanista e o cientista em suas dimensões humanas e como ser histórico. O terceiro, "Bohr e a Estrutura Atômica", explora os trabalhos relacionados à estrutura atômica desenvolvidos por cientistas do século XIX, com ênfase especial em J. J. Thomson (1856-1940) e Ernest Rutherford (1871-1937), como os principais precursores da obra de Bohr. O quarto capítulo,

algumas implicações didáticas do modelo atômico de Bohr, é o capítulo de encerramento onde são apresentadas as implicações epistemológicas derivadas do trabalho.

A metodologia do trabalho tem uma perspectiva qualitativa, do tipo interpretativa, de ordem conceitual, no sentido definido por Machado, Laurenço e Silva (2000), bem como histórica, no âmbito do ensino de química, em que o problema será abordado como um estudo de caso histórico, que consiste em examinar a vida de Niels Bohr (1885-1962), como sujeito histórico e como produtor intencional de significados por meio de sua obra, situando-o em seu próprio tempo, em diálogo com diferentes interlocutores contemporâneos, recorrendo a seus escritos. Para isso, serão atendidas as recomendações de Forato, Martins e Pietrocola (2011), que fazem uma revisão crítica das versões de História da Ciência que fizeram carreira e que podem ser inadequadas para a educação científica escolar, considerando que, "ao construir, utilizar e disseminar uma determinada versão da história da ciência, propaga-se uma concepção de como a ciência foi construída". (Forato; Martins; Pietrocola, 2011, p. 30).

É importante reconhecer que, devido à sua natureza qualitativa, não busca provar uma hipótese, nem está sujeito ao modelo causal determinista de explicação. A natureza complexa e particular do objeto de estudo, que não possui características definidas e quantificáveis independentes do sujeito cognoscente, faz com que ele assume a forma de um objeto-fenômeno, no sentido de estar vinculado a um modelo de interpretação, no qual adquire significado, cujo alcance e profundidade serão sempre incompletos (Strauss; Corbin, 2002).

A análise das obras de Bohr levará em consideração a abordagem Atkinson e Coffey (2004), no sentido de investigar as relações intertextuais nas quais estão envolvidas. As obras consideradas para a análise são:

- The theory of spectra and atomic constitution (1922)
- Atomic theory and description of nature (1934)
- Atomic physics and human knowledge (1958)

Além disso, foram consideradas fontes secundárias sobre a vida e a obra de Bohr, bem como sobre os conceitos desenvolvidos e discutidos a respeito da estrutura atômica. Artigos escritos por J. J. Thomson e E. Rutherford também foram consultados.

O esclarecimento conceitual é complementado pela análise histórica, uma vez que os conceitos se desenvolvem em um tempo e cultura específicos, como expressa Cellard

Em qualquer caso, o analista não pode prescindir de uma compreensão satisfatória do contexto político, econômico, social e cultural que levou à produção de um determinado documento. Tal conhecimento permite compreender os referenciais conceituais do seu autor ou autores [...] Através

da análise contextual, o pesquisador encontra-se numa posição privilegiada para compreender até mesmo as particularidades da estrutura organizacional e, sobretudo, para evitar interpretar o conteúdo do documento com base em valores modernos (Cellard, 2008, p. 299-300).

Trata-se da análise do contexto histórico e cultural da produção intelectual de Niels Bohr, em torno de suas ideias científicas e filosóficas em relação à nascente física quântica e, em particular, ao seu modelo atômico proposto, com a intenção de derivar algumas abordagens pedagógicas úteis para o ensino do conceito de estrutura da matéria em sala de aula, no ensino médio. Nessa análise, assume grande importância o cenário de confronto de ideias no seio da comunidade científica em que Bohr se insere, para o qual ele também contribuiu com sua atitude e empenho, deixando uma marca particular na formação de jovens físicos, desenvolvedores da teoria quântica.

Reconhecendo o valor da História e da Filosofia da Ciência para o ensino, são analisados seus fundamentos e contribuições para o ensino de química. O capítulo seguinte situa Bohr como sujeito histórico, produtor de conhecimento e de ideias, e sobretudo, como um ser humano inserido em um contexto sócio-histórico específico. O terceiro capítulo aborda as ideias de Bohr sobre a estrutura atômica, destacando as controvérsias no âmbito das concepções clássicas e sua necessária resolução com o postulado quântico, que levou à sua filosofia da complementaridade. Por fim, são apresentadas algumas implicações didáticas derivadas de suas propostas relativas ao seu modelo atômico, as quais poderiam ser levadas em consideração em sala de aula.

2 O ENSINO DA QUÍMICA NO ENSINO MÉDIO

Reconhecendo que o ensino e a aprendizagem da química são fundamentais para o processo de alfabetização científica cidadã, uma vez que inúmeros fenômenos cotidianos são explicados por meio do conhecimento químico, esta seção analisa os tópicos de investigação ou pesquisa em educação química no nível secundário, que apareceram em vários periódicos com impacto próximo aos nossos contextos. Foi realizada uma busca em diversas bases de dados como Scielo, Dialnet, Google Acadêmico e Redalyc para estabelecer possíveis categorias de classificação com base em amostragem aleatória. Assim, foram estabelecidas onze categorias, de acordo com sua abordagem: História e Filosofia da Ciência (HFC), Abordagens Baseadas em Modelos (ABM), Abordagens Socioculturais (ASC), Abordagens Baseadas em Tecnologias (ABT), Abordagens Baseadas em Experimentação (ABE), Fatores Motivacionais e Atitudinais (FMA), Concepções e Ideias dos Estudantes (CIE), Outras Alternativas (OA), Processos Avaliativos (PA), Processos Curriculares (PC) e Outros Processos (OP).

Uma vez definidas as categorias, os artigos correspondentes foram classificados e quantificados em periódicos cuja seleção foi orientada pelos critérios de possuir o “maior número de artigos” e/ou “periódicos da região latino-americana”, no período de 2000 a 2022, inclusive. Alguns periódicos surgiram após 2000. Como eram em inglês, português e espanhol, os termos de busca foram: “*chemistry learning*” e “*chemistry teaching*”; “*aprendizagem de química*” e “*ensino de química*”; “*aprendizaje de la química*” e “*enseñanza de la química*”, de acordo com o idioma da revista. É claro que esses termos não são suficientes, mas foram considerados adequados para os propósitos desta revisão.

Na maioria dos casos, foi necessário revisar o resumo quando o título não estava explicitamente relacionado ao ensino médio e, em alguns artigos, foi essencial revisar o texto do artigo. É pertinente fazer dois esclarecimentos: primeiro, não foi levado em conta nenhum tipo de revisão bibliográfica, segundo, dos artigos que apresentaram cruzamentos de categorias, optou-se por aquele que fosse mais definitivo, por exemplo, no artigo *High school students' understanding of molecular representations in a context-based multi-model chemistry learning approach*, (Avargil; Piorko, 2022), combina as categorias ASC, ABM e CIE, mas foi colocado na categoria ASC porque se considerou que o fator determinante neste estudo é o contexto.

Os resultados são apresentados na Tabela 1. Foram consultados 18 periódicos em suas respectivas plataformas, nos quais foram encontrados 798 artigos, dos quais se destaca que 13,3% recorrem a processos vinculados ao uso de tecnologia, especialmente simulações, programas de computador, jogos ou aplicativos de computador; 13,2% consideram processos

sociais, contextuais ou comunitários, incluindo conhecimento ancestral; 11,9% trata das ideias, crenças e visões dos alunos; 9,0% usam filosofia ou história da ciência para ensinar química; e 6,3% dependem de tratamentos experimentais ou laboratoriais. Nota-se também que o maior número de publicações sobre a temática em questão aparece nos periódicos *Educación Química*, com 13,2%; *Chemistry Education Research and Practice*, com 12,5%; Química nova na Escola, com 10,0%; *International Journal of Science Education*, com 9,3%, e *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias* com 7,9%. Vale esclarecer que este último só começou a publicar abertamente em 2015.

Foram consideradas como outras alternativas, OA, aquelas abordagens de ensino que não puderam ser categorizadas entre as cinco primeiras da tabela, por exemplo, aquelas baseadas em jogos e aspectos lúdicos ou por meio do uso de analogias. Da mesma forma, trabalhos de pesquisa que não puderam ser classificados como FMA, CIE, PA ou PC, foram localizados em outros processos, OP, por exemplo, a formação de professores de química para o ensino fundamental e médio ou o efeito do discurso e das atitudes dos professores.

Essa exploração revelou que em diferentes países da América, Europa e Ásia, há uma preocupação significativa com o ensino e a aprendizagem da química, refletida nas diferentes propostas categorizadas conforme indicado anteriormente. Todos os artigos compartilham uma visão crítica dos métodos usados para ensinar química, explicando várias razões: resultados ruins em avaliações internas e externas, baixos níveis de compreensão de estruturas conceituais, procedimentos experimentais inadequados, negligência de fatores motivacionais e atitudinais e evasão de alunos em sala de aula. Questiona-se também a prática docente, desde sua postura em relação à sua fundamentação epistemológica ou à ausência de propostas didáticas condizentes com os tempos atuais.

Tabela 1 - Classificação de artigos sobre ensino e aprendizagem de química.

Revistas	HFC	ABM	ASC	ABT	ABE	FMA	CIE	OA	PA	PC	OP	T
Science & education	27	2					2	3		2	6	42
Research in Science Education	1	2	4	5	6	5	3	6	1	2	8	43
Journal of Science Education and Technology		1	2	27	2	1	4	2		3	4	46
International Journal of Science Education	4	1	11	8	1	10	15	7		4	13	74
Journal of chemical education		1	4	6	7	3	4	6	2	4	8	45

Chemistry Education Research and Practice	1	2	8	9	6	4	21	13	10	5	21	100
Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias	1	1	12	4	2	1	4	8		2	4	39
Enseñanza de las ciencias	1			3	1	1	1	5			2	14
Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias	2	1		1	1		1	2			1	9
Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias	4	1	13	4	1	2	12	3			23	63
Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias	2		1	1	2		1	3	1		2	13
Educación química	12	4	9	11	8	7	14	14	2	6	18	105
Tecné, Episteme y Didaxis	2	1	7	5	5		1	6		4	10	41
Química nova na Escola	5	1	20	16	6		4	23	1		4	80
Ciência & Educação	4	2	1				1	2			4	14
Ensaio Pesquisa em educação em Ciências			1		1		1	1		1	4	9
Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências	5	1	9	1		1	4	3	2	2	14	42
Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia	1		3	5	1		2	2			5	19
TOTAL	72	21	105	106	50	35	95	109	19	35	151	798
PORCENTAGEM %	9,0	2,6	13,2	13,3	6,3	4,4	11,9	13,7	2,4	4,4	18,9	

HFC: História e Filosofia da Ciência, ABM: Abordagens baseadas em Modelos, ASC: Abordagens Socioculturais, ABT: Abordagens baseadas em Tecnologias, ABE: Abordagens baseados em Experimentos, FMA: Fatores motivacionais e atitudinais, CIE: Concepções e Ideias dos Estudantes, OA: Outras Alternativas, PA: Processos de Avaliação, PC: Processos Curriculares, y OP: Outros Processos.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Como pode ser visto, praticamente duas abordagens dividem o primeiro lugar. 13,3% das propostas defendem o uso de tecnologias computacionais, vistas como um conjunto de ferramentas que podem fomentar a motivação, melhorar a atenção, ampliar as possibilidades de conceituação, visualizar o mundo microscópico, entre outras. Enquanto 13,2% das propostas defendem a importância dos contextos; histórico, social, tecnológico, cultural ou familiar, na

construção de aprendizagens significativas, tendo em conta que o aluno é um sujeito cognitivo que opera em diferentes contextos, nos quais constrói significados.

Em terceiro lugar, 11,9% das propostas enfatizam a necessidade de levar em conta as ideias dos alunos, tanto no sentido de gerar espaços de diálogo, democráticos e inclusivos, que motivem os alunos a terem uma atitude de participação, respeito e convivência; como em termos de construção conceitual, no entendimento de que não existem conceitos isolados, mas sim inscritos em estruturas conceituais que o indivíduo constrói, de modo que o ensino de qualquer conceito científico deve levar em conta a estrutura conceitual do aluno.

Em quarto lugar, 9,0%, trabalhos cuja abordagem considera a importância da história e da filosofia da ciência, partindo do reconhecimento de que os professores muitas vezes exercem sua prática a partir de uma visão a-problemática e a-histórica, o que leva ao ensino de dogmas, algoritmos e fórmulas, desvinculados da vida do aluno, mostrando uma ciência desprovida de vida, pertencente a outro mundo, sendo, portanto, tediosa para eles. Em quinto lugar, 6,3%, estão os trabalhos que enfatizam os processos experimentais, dentro ou fora do laboratório, levando em conta que eles facilitam o aprendizado das teorias e modelos da ciência, bem como seu processo de produção e validação, além de motivar a prática da pesquisa, o que envolve a concepção da proposta experimental, a execução do procedimento e a discussão dos resultados.

Para o caso específico da Colômbia e do Brasil, os resultados são apresentados na Tabela 2. Com exceção do *Journal of Chemical Education*, os cinco periódicos restantes de língua inglesa consultados contêm apenas 24 do total de artigos, ou seja, apenas 7,6%, pelo que foram agrupados como *Journals in English*. Em geral, há poucas publicações em inglês sobre os problemas de ensino e aprendizagem de química produzidas nesses dois países.

Por outro lado, há uma variação significativa na abordagem predominante. Embora a tendência geral seja compartilhada por duas abordagens, uso de tecnologias e contextos socioculturais, no caso do Brasil e da Colômbia há uma preferência notável por contextos socioculturais, 20,3%. Isso provavelmente se deve à acentuada variedade sociocultural de ambos os países, tanto pelas suas origens africanas, indígenas e europeias, quanto pelas suas nuances atuais, que incluem a segregação, e afetam diretamente os processos escolares.

Em segundo lugar, 12,4%, estão estudos baseados em ideias, concepções e visões dos alunos, mostrando que se trata de um tema de pesquisa e prática atual, talvez ligado justamente à diversidade sociocultural, que influencia a miríade de visões e ideias dos alunos. Em terceiro lugar, há uma queda notável de 13,3% para 8,9% para abordagens apoiadas por tecnologias, provavelmente devido às dificuldades socioeconômicas de ambos os países, que afetam grandes setores da população, e às dotações orçamentárias para Instituições Educacionais, que foram

gradualmente cortadas a partir da década de 1990, com a implementação do modelo econômico neoliberal (López; Flores, 2006). Em quarto e quinto lugar estão as abordagens baseadas na história e filosofia da ciência, 7,9%, e a abordagem baseada em processos experimentais, 5,1%, que se mantém dentro da tendência geral.

Tabela 2: Artigos sobre ensino e aprendizagem de química no Brasil e na Colômbia

	HFC	ABM	ASC	ABT	ABE	FMA	CIE	OA	PA	PC	OP	T
Journals in English	6	2	2			1	8			1	4	24
Journal of Chemical Education		1	1	3	4	2	1	3	1			16
Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias	1	1	10	1	1	1	3	5		2	4	29
Enseñanza de las ciencias								2			2	4
Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias	2							2			1	5
Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias	2	1	10	4	1	2	11	1			20	52
Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias	2		1	1			1	1			2	8
Educación química	2	2	2		1		5	2	2	1	3	20
Tecné, Episteme y Didaxis	2	1	6	4	4		1	5		1	7	31
Química nova na Escola	3	1	20	10	4		1	17	1		4	61
Ciência & Educação	2	1	1				1				4	9
Ensaio Pesquisa em educação em Ciências			1		1		1	1		1	2	7
Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências	3	1	9	1		1	4	3	2	2	13	39
Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia			1	4			2	2			1	10
TOTAL	25	11	64	28	16	7	39	44	6	8	67	315

Porcentagem %	7,9	3,5	20,3	8,9	5,1	2,2	12,4	14,0	1,9	2,5	21,3
--------------------------	------------	------------	-------------	------------	------------	------------	-------------	-------------	------------	------------	-------------

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Vale destacar que o Brasil supera a Colômbia em pesquisa e apoio ao ensino de química. Um amplo segmento da comunidade química acadêmica brasileira reconhece a importância desta área tanto para o avanço da química em si quanto para o desenvolvimento da sociedade. De fato, a Sociedade Brasileira de Químicos (SBQ), fundada em 1977, já em 1982 considerou a importância de promover encontros nacionais em torno do ensino de química, inaugurando o I Encontro Nacional de Ensino de Química (I ENEQ) e, instituiu a Divisão de Ensino (DE/SBQ), em 1988, sendo a mais antiga divisão científica da SBQ. Em 2018, durante o XIX ENEQ, foi oficialmente criada a Sociedade Brasileira de Ensino de Química, SBEnQ. Várias edições do ENEQ foram publicadas até o momento, sendo a 22ª edição a mais recente, em 2024. Da mesma forma, a SBQ publica o periódico Química Nova desde 1978, que inclui uma seção dedicada ao ensino de química. Além disso, na Reunião Anual de 1994 (RASBQ) foi proposta a publicação do periódico Química Nova na Escola, cujo primeiro número foi publicado em 1995, dedicado aos professores de química dos níveis fundamental e médio (Silveira; Souza; Kundlatsch, 2020).

O volume de trabalhos na área, iniciado desde o final da década de 1970, incluiu múltiplos encontros regionais, a começar pelo primeiro Encontro de Debates sobre o Ensino de Química (EDEQ), em 1980. O Simpósio Mineiro de Educação Química (SMEQ), o Congresso Paranaense de Educação Química (CPEQUI), o Encontro Norte-Nordeste de Ensino de Química (ENNEQ), o Encontro Sudeste de Ensino de Química (ESEQ), o Encontro Centro-Oeste de Ensino de Química (ECODEQ), entre outros. (Silveira; Souza; Kundlatsch, 2020). Todos esses encontros contam com o apoio de universidades como: Universidade de São Paulo, Universidade Estadual Paulista, Universidade Estadual de Campinas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Universidade Federal de São Carlos, Universidade Federal do Espírito Santo, Universidade Federal de Viçosa e Universidade Federal de Juiz de Fora, entre outras, em algumas delas, os programas de pós-graduação em química incluem a área de Ensino de Química.

Isso, sem dúvida, contribui significativamente para a formação inicial e continuada de professores de química, bem como para a publicação de livros e artigos tanto sobre a aplicação de propostas pedagógicas quanto sobre reflexões teóricas. (Schnetzler, 2002). Em contraste, na Colômbia, apenas a Universidade de Antioquia e a Universidade de Caldas incluem a educação

química como uma linha de pesquisa em seus programas de pós-graduação em química. Não há encontros dedicadas ao ensino de química, nem há nenhum periódico dedicado a essa área.

Como existem diversos trabalhos sobre o ensino e a aprendizagem da química, seus fundamentos serão vistos imediatamente.

2.1 FUNDAMENTOS DO ENSINO E DA APRENDIZAGEM DE QUÍMICA NO ENSINO MÉDIO

Para Schnetzler (2002), a pesquisa em Ensino de Ciências é um campo com identidade própria, pois seu objeto de análise corresponde à especificidade do conhecimento científico que fundamenta os problemas do Ensino de Ciências e as dificuldades que envolvem sua Aprendizagem. Portanto, suas pesquisas, em linhas gerais, concentram-se em métodos de ensino relevantes, transformações conceituais apropriadas a contextos escolares específicos, conhecimento das concepções dos alunos e fatores psicossociais que afetam a aprendizagem. Certamente, ensinar química envolve transformar o conhecimento químico em conhecimento escolar, utilizando uma didática adequada aos contextos e problemas abordados, considerando o papel central do aluno, tanto por questões socioafetivas quanto de aprendizagem, entre outras.

Em outras palavras, embora o conhecimento químico seja condição necessária, ele não é suficiente para o ensino de química, nem para o desenvolvimento do ensino de química como uma área do conhecimento que, dada sua complexidade, se apoia em campos como a filosofia, a psicologia, a sociologia, a antropologia e a história da ciência, bem como o papel do professor, entre outros.

Segundo Santos *et al.* (2013), de modo geral, o ensino de Química tem sido feito por meio de práticas que levam à memorização de informações, fórmulas e dados, situação que limita a aprendizagem dos alunos e contribui para sua apatia em relação ao estudo desta ciência. Por sua vez, Gilbert (2006) afirma que o ensino de química enfrenta cinco problemas inter-relacionados: 1) sobrecarga de conteúdo, que acaba sendo uma apresentação desconectada de sua origem científica; 2) agregação de fatos isolados, o que não permite a formação de esquemas mentais que recuperem o sentido da sua aprendizagem; 3) falta de transferência, fazendo com que os alunos tenham dificuldade em resolver problemas com os mesmos conceitos apresentados de forma diferente; 4) falta de relevância, pois é considerado instrumentalmente sem compreender sua importância; e 5) ênfase inadequada, tradicionalmente visando uma “base sólida” de conhecimento e o “desenvolvimento de habilidades científicas”, que são infrutíferas e distantes do objetivo de alcançar a alfabetização científica cidadã.

Uma visão no mesmo sentido é compartilhada por Parga e Piñeros (2018) para o contexto colombiano, pois, apesar das mudanças nos desenhos curriculares e metodológicos, promovidas pelo Ministério da Educação Nacional (MEN) desde o início do século XXI, ainda existe uma certa tendência ao cumprimento do volumoso plano de estudos, que acaba sendo um conjunto de conhecimentos acabados, desconexos, distantes da realidade do aluno, carentes de significado e com muito pouca contribuição para seu processo formativo. Portanto, os autores expressam que melhorar o ensino de química na Colômbia enfrenta três desafios: 1) gerar processos que motivem os alunos, por meio de conteúdos contextualizados, próximos aos seus interesses e ao seu cotidiano; 2) promover a compreensão da natureza da química, sua aplicabilidade e seus problemas no âmbito das relações CTSA, em integração com os conteúdos disciplinares; e 3) integrar propostas de ensino adequadas aos planos curriculares e aos conteúdos de ensino.

Segundo Andica (2015), o objetivo é recuperar a motivação e a contextualização para uma aprendizagem significativa, capaz de contrariar a imagem negativa dos alunos em relação à química, manifestada numa série de atitudes inadequadas, “uma química para entender a vida cotidiana, ou os problemas sociais, ambientais ou políticos associados” (Parga; Piñeros, 2018, p. 57, tradução própria).

Por outro lado, segundo Santos *et al.* (2013), as limitações da aprendizagem científica do aluno se manifestam principalmente em três aspectos: 1) suas dificuldades em exercer a abstração conceitual, tendo em vista que um conceito não se reduz a uma definição linguística, nem é uma construção isolada, mas sempre faz parte de um arcabouço conceitual, mais ou menos complexo; 2) seus problemas em desenvolver e compreender modelos científicos, com os quais possam dar conta de vários fenômenos, dentro da estrutura de algum suporte teórico que os sustente; e 3) suas persistentes concepções alternativas, que parecem impedi-lo de uma reelaboração conceitual adequada.

No processo de enfrentamento dos desafios acima mencionados, a educação científica vem se consolidando como um campo interdisciplinar com múltiplas abordagens e enorme influência na prática docente, respondendo às atuais demandas socioeducacionais. Esse progresso é evidente no percurso desde abordagens enciclopédicas, centradas no saber do professor, transmissor do conhecimento que o aluno deve memorizar, e que ainda persiste na atividade escolar (Díaz-Barriga, 2011), até tendências atuais, centradas no aluno, construtor do seu conhecimento. (Campanario; Moya, 1999).

Nas abordagens transmissionistas podem ser reconhecidas algumas características, como: 1) a soma de conceitos científicos que o aluno é obrigado a memorizar, geralmente sem

nenhuma integração; 2) a autoridade enciclopédica do professor, detentor do conhecimento disciplinar que pretende transmitir ao aluno; 3) a transmissão de um conhecimento científico completo, sem nenhuma problematização, sem história, universal e, normalmente, associado a alguma mente brilhante que o descobriu; 4) um aluno receptor com pouquíssima participação na construção do conhecimento; e 5) a presunção de uma neutralidade e objetividade da ciência, que a apresenta como atividade infalível no conhecimento da realidade, sem nenhum tipo de viés interpretativo, ideológico ou axiológico (Mejía, 2011).

Em relação às tendências atuais, algumas de suas características são: 1) destacam a construção conceitual do conhecimento, que implica relações conceituais e, portanto, visam à integração e estruturação; 2) emergem o aluno como sujeito epistêmico, possuidor de conhecimentos e estruturas conceituais suscetíveis de serem modificadas com o auxílio de diferentes mediadores; 3) reconhecem diferentes níveis de complexidade epistêmica e/ou ontológica na compreensão dos fenômenos, implicados em sua teorização e experimentação; 4) valorizam a importância da história e da filosofia da ciência para o ensino de conceitos científicos; 5) enfatizam as relações entre a ciência, o cotidiano do aluno, os aspectos socioculturais e tecnológicos que incidem no desenvolvimento do indivíduo e das comunidades; 6) promovem a formação de cidadãos com capacidade crítica para tomar decisões responsáveis em relação ao desenvolvimento socioeconômico da sociedade, onde a natureza deixa de ser concebida como sua despesa¹; 7) evidenciam dificuldades metodológicas e problemas éticos na atividade científica; e 8) atuam sob uma abordagem interdisciplinar, visto que o mundo é uma unidade complexa, multiforme e não atomizada (Caballero; Recio, 2007).

Em relação à ênfase indicada no número cinco, Meroni; Copello e Paredes destacam que sua finalidade é a formação do cidadão científico e que “ela só é possível se a ciência estiver relacionada à vida real e responder às necessidades e aos interesses dos nossos alunos” (Meroni; Copello; Paredes, 2015, p. 276, tradução própria). Em outras palavras, se o processo de ensino de conceitos, modelos e experiências científicas for realizado de forma contextualizada, com a participação ativa dos alunos, tendo em conta que “o desenvolvimento individual é indissociável do contexto sociocultural em que se realiza e dos processos de aprendizagem que o condicionam e configuram” (Gutiérrez, 2005, p. 89, tradução própria). Essa perspectiva se baseia na premissa da natureza sociocultural do conhecimento, essencialmente justificada por Lev Vygotsky (1896-1934).

¹ Uma perspectiva sobre esse conceito pode ser encontrada no âmbito do Metabolismo Social, uma teoria que nos permite compreender as interações entre sociedade e natureza. Ver Infante-Amarante; González e Toledo (2017).

Segundo Schunk, Vygotsky defendeu “a interação de fatores interpessoais (sociais), histórico-sociais e individuais como a chave para o desenvolvimento humano” (Schunk, 2012, p. 242, tradução própria), o que está intimamente ligado à aprendizagem em sociedade. Assim, da perspectiva de Vygotsky, os processos mentais superiores são mediados por ferramentas psicológicas, como linguagem, signos e símbolos. Desse modo, quando as crianças internalizam tais ferramentas, elas se tornam mediadoras de processos de aprendizagem mais avançados. Nesse sentido, a linguagem desempenha um papel essencial na construção de conceitos, indo além de ser um mero instrumento de comunicação ou codificação; é um mediador que possibilita processos de pensamento de nível superior. De fato, continuando com Schunk (2012), tais ferramentas facilitam o ensino na interação social, onde os pares ensinam uns aos outros, os pais ensinam os filhos e os professores ensinam os alunos. Mesmo aqueles que aprendem por conta própria o fazem socialmente por meio da linguagem e dos símbolos adquiridos em interações sociais anteriores.

Vale ressaltar que “a utilidade das interações não está, como no sentido tradicional, em fornecer informações às crianças, mas em permitir que elas transformem suas experiências a partir de seus conhecimentos e características, bem como reorganizem suas estruturas mentais” (Schunk, 2012, p. 242, tradução própria). Essas estruturas mentais se tornam poderosas estruturas conceituais para a compreensão dos fatos apresentados nas aulas de química. Nessa interação social, o ensino dos modelos científicos escolares adquire maior significado por meio de práticas sociais, articuladas ao contexto sociocultural do aluno, no qual ele desenvolveu seus mediadores psicológicos. Nesse contexto, a aprendizagem do conhecimento científico envolve formular perguntas adequadas ao contexto e ao desenvolvimento do aluno, bem como propor e avaliar modelos pertinentes a diferentes fenômenos.

Por outro lado, Izquierdo (2004), em consonância com Johnstone², chama a atenção para uma problemática que considera específica do ensino de química, relacionada à transformação do conhecimento científico químico em conhecimento escolar válido, dado que a química é uma ciência concreta e abstrata ao mesmo tempo. Concreto porque é uma ciência na qual são manipuladas substâncias com propriedades visíveis e facilmente reconhecíveis pelo aluno. Abstrato porque qualquer explicação proposta sobre o comportamento físico-químico das substâncias remete ao mundo atômico-molecular, que não é acessado diretamente, mas sim por meio de um modelo teórico, interpretável pela linguagem. Portanto, segundo Izquierdo

² A. H. Johnstone (1993) afirmou que a psicologia da formação da maioria dos conceitos químicos é um processo diferente do normal, uma vez que três níveis simultâneos de pensamento operam e se inter-relacionam: o macro, o submicro e o uso representacional de símbolos e matemática.

(2004), parte do problema reside na forma como a linguagem da explicação científica é utilizada.

De forma complementar, Sjöström (2013), com base na abordagem de Mahaffy para o triângulo químico³, propõe a divisão do contexto em três níveis hierárquicos de complexidade, do menor para o maior: 1) o mais próximo da base conceitual da química aplicada, vincula aspectos sociais e cotidianos, o que exige conhecimento químico para além de algoritmos ou receitas, embora se limite a uma perspectiva técnico-instrumental; 2) no meio, o contexto sociocultural, que se refere às perspectivas históricas, sociológicas, culturais e políticas da química, diretamente ligadas à natureza da ciência; e 3) a abordagem crítico-filosófica, que busca refletir sobre os riscos e benefícios da química, tendendo a formar cidadãos competentes nos ideais de uma sociedade mais justa, democrática e comprometida com a sustentabilidade da vida no planeta.

A partir de diferentes perspectivas ou pontos de partida sobre o ensino de ciências, tem-se destacado a importância dos contextos no processo pedagógico de ensino de conceitos científicos, dando-lhes vida e significado. Algo semelhante acontece com palavras, ações, símbolos ou eventos da vida cotidiana, que sempre adquirem algum significado dentro de um contexto que inclui diversas inter-relações humanas. (Gilbert, 2006). Nesse sentido, os contextos contribuem para melhorar a motivação e o interesse dos alunos, ao vincular de alguma forma o conhecimento químico à vida real, facilitando uma aprendizagem significativa dos alunos (Parchmann *et al.*, 2006).

Entretanto, quando falamos em “contexto” não há um significado único ou um modelo único de aplicação, e alguns autores inclusive destacam a impossibilidade de defini-lo, o que torna necessário esclarecer quais modelos são aplicados no ensino de química, pois “[a] compreensão do significado de contextualização é essencial para a elaboração de estratégias de ensino que favoreçam a preparação para o exercício da cidadania”. (Wartha; Faljoni-Alário, 2005, p. 152, tradução própria). Nessa ordem de ideias, esses autores enfatizam que “[o] conhecimento científico deve ser caracterizado como produto da vida social, marcado pela cultura da época, como parte integrante, influenciando e sendo influenciado por outros saberes” (p. 151, tradução própria).

Dada a impossibilidade de uma definição, Duranti e Goodwin (1992), citados por Gilbert (2006), apontam quatro atributos como critérios de avaliação para qualquer contexto

³ Mahaffy (2004) converteu o triângulo de Johnstone em um tetraedro, cujo vértice superior enfatiza o contexto humano: a vida cotidiana e os aspectos sociais da química.

educacional: um cenário, um ambiente comportamental, uma linguagem específica e a relação com o conhecimento prévio, que Gilbert (2006) reinterpreta para a educação química: 1) o cenário, como um arcabouço social, espacial e temporal para uma comunidade de prática, na qual se encontram os eventos focais do domínio da química, que devem ser reconhecidos e valorizados pelos alunos, por meio da interação produtiva; 2) o ambiente comportamental determina as tarefas a serem assumidas no domínio da química: planos de pesquisa, análises químicas, experimentos, etc.; 3) A linguagem química que os alunos devem aprender a usar é definida pela natureza do ambiente comportamental, onde os conceitos adquirem significado e relevância para o aluno; e 4) o conhecimento prévio deve dar suporte produtivo ao ambiente comportamental químico e à linguagem química específica, permitindo ações de recontextualização em outros eventos focais. Gilbert (2006) enfatiza a seleção de eventos focais relevantes para os alunos e a linguagem química apropriada que lhes permite compreender o significado da química envolvida.

É claro que os quatro atributos têm um caráter normativo; a maneira como podem aparecer na prática do ensino de química implica reconhecer alguma tipologia de contextos. Para isso, Gilbert (2006) distingue quatro modelos genéricos: 1) Contexto como aplicação direta de conceitos, trazendo situações do cotidiano pessoal, social ou industrial, nas quais os conceitos químicos são aplicados. É uma relação unidirecional, de conceitos e aplicações, que não satisfaz nenhum dos quatro critérios. 2) Contexto com relação recíproca entre conceitos e aplicações. É uma relação bidirecional na qual surgem no aluno justaposições de conceito-aplicação, o que pode ser confuso e que atende parcialmente aos três últimos critérios. 3) Contexto fornecido pela atividade mental da pessoa, em que situações, contextos produzidos pela transformação de situações, dada a atividade mental pessoal e narrativas, ou seja, as ligações entre contextos e algum tópico em andamento, são importantes. Em geral, esse tipo de contexto parece ter maior valor para os desenvolvimentos recentes em química, mas dificilmente atende a todos os quatro critérios. 4) Contexto como produto de circunstâncias sociais, que relaciona temas e atividades de importância para a vida das comunidades em sociedade. Como a aprendizagem é baseada em ações, ela não pode ser separada do contexto em que ocorre, e professores e alunos se tornam participantes de uma comunidade de prática.

Este último seria o modelo mais adequado, caso o propósito vá além de ilustrar aplicações do conhecimento químico, para desenvolver atitudes e valores que tornem a aula um espaço de discussão sobre questões ambientais, econômicas, sociais e éticas, em consonância com a proposta de Sjöström (2013). Isto é, se almejamos cenários pedagógicos tendentes à alfabetização científica. Nesse sentido, a contextualização torna-se uma posição permanente

que permite ao aluno construir significados a partir do seu ambiente natural ou social e, ao mesmo tempo, reconhecer seu caráter histórico e sua carga valorativa, geralmente afetada por determinadas tensões sociais. Além disso, contribui para fortalecer a autonomia do aluno, na medida em que constrói sua visão de mundo, sem que isso implique assumir o relativismo extremo de Paul Feyerabend (1924-1994).

Um problema específico a ser levado em conta para os propósitos desta pesquisa foi expresso por Izquierdo (2004) como a “abordagem inadequada da teoria atômica” (p. 119), que pode ser pensada tanto em um sentido ontológico quanto epistemológico. Do ponto de vista ontológico, o incômodo aparece com apresentações escolares reducionistas, originadas quando certos conceitos dentro da teoria são levantados no sentido físico, seja mecanicista⁴ ou assumindo o estatuto ontológico físico do orbital (Harris, 2008), em vez do seu sentido químico, em que estão ligados à composição de um todo, reconhecido como um sistema químico⁵, no qual surgem novas propriedades e novas entidades, além dos componentes físicos elementares, como “aromaticidade” ou “interações de van der Waals”. Em termos epistemológicos, a dificuldade surge quando as experiências parecem depender da teoria, desconsiderando seu contexto e perdendo o significado para o aluno. Segundo Izquierdo (2004), não foi possível compreender que “a experiência química não é apenas uma condição para a aprendizagem, mas também a chave para dar sentido à teoria atômica”. (Izquierdo, 2004, p. 119, tradução própria).

Esta é uma das razões pelas quais uma alta porcentagem de estudantes do ensino médio que fizeram aulas de química estão cientes da existência de átomos e moléculas, mas mantêm a crença de que essas entidades se comportam com as mesmas propriedades macroscópicas das substâncias e materiais. Dessa forma eles constroem conceitos errôneos para construir a explicação química referente ao micromundo. Por exemplo, explicações do comportamento de átomos e moléculas longe de uma perspectiva química, reduzidas à física (Izquierdo, 2004), em termos mecanicistas ou pseudomecanicistas. Em ambos os casos, eles concebem essas entidades como partículas pontuais no espaço, capazes de interagir umas com as outras. A diferença é que, no primeiro caso, a explicação inclui, de alguma forma, os princípios de conservação de energia, massa e momento⁶, o que não ocorre no segundo caso.

⁴ O mecanismo a que me refiro levou a uma série de dicotomias que ainda persistem no pensamento ocidental, limitando as possibilidades de transcendência em direção a formas mais complexas de pensamento, incluindo o pensamento químico. (Bacarlett y Fuentes, 2007)

⁵ Uma descrição mais completa do que pode ser chamado de sistema químico pode ser vista no trabalho de Reiher (2003).

⁶ Momento é uma grandeza vetorial, diferentemente da energia.

Equiparar o comportamento dos átomos e moléculas ao dos objetos macroscópicos e assumir as propriedades das substâncias em cada partícula constitui um obstáculo epistemológico, no sentido indicado por González-Galli *et al.* (2022), ao qual deve ser dada muita atenção em sala de aula devido ao seu efeito no estudo da estrutura da matéria e das transformações químicas, tendo em conta que ambos os temas são estruturantes na ciência química, e que por isso servem de âncora na estrutura cognitiva do aluno para a construção de diferentes modelos químicos básicos, com os quais podem dar conta dos fenômenos de transformação de substâncias que ocorrem na natureza, na indústria ou no laboratório.

Por outro lado, cabe destacar que a química explica e prevê os fenômenos de sua área recorrendo a modelos particulares, sujeitos a idealizações ou simplificações, dada a complexidade dos fenômenos químicos, que não podem ser reduzidos ao comportamento dos sistemas físicos. Na verdade, os modelos químicos têm uma estrutura diferente dos modelos físicos. (Tobin, 2013).

Segundo Díez e Moulines (1999), os modelos representam a estrutura causal de alguma parte do mundo, permitindo a explicação de diferentes fenômenos. Como “a noção de modelo é uma noção fundamentalmente semântica” (Díez; Moulines, 1999, p. 328, tradução própria), essa abordagem de conceber a explicação científica por meio de modelos é conhecida como concepção semântica de teorias e foi consolidada na filosofia da ciência na década de 1980, quando análises formais da ciência foram revividas em resposta aos excessos dos historicistas e às deficiências da concepção sintática.

Essa ideia de explicar por meio de modelos foi trazida para o campo da educação científica e tem a vantagem de retratar os cientistas como seres humanos que constroem modelos, com uma ampla gama de interesses e motivações, não como sujeitos idealmente racionais isolados de qualquer contexto. Nesse processo, foram importantes as abordagens de Ronald Giere (1938-2020), que apontou que não é aceitável a pressuposição de racionalidade absoluta da ciência, dada pelos filósofos, mas também não é aceitável a de uma construção social sem mais, como propõem os sociólogos da ciência, que esquecem a interação causal entre cientistas e mundo. Partindo dessas premissas, ele propôs que as teorias seriam um tipo de representação, um modelo (Giere, 1988).

Izquierdo e Adúriz-Bravo (2021) encontram muitas vantagens nas abordagens de Giere para o ensino de ciências. Por exemplo, conceber os alunos como agentes cognitivos com capacidade de pensar sobre modelos de ciência escolar; A metáfora de Giere de que os modelos são como mapas de um lugar implica que pode haver tantos modelos quantos mapas de uma única localização geográfica, dependendo das intenções subjacentes a eles, de modo que,

embora diferentes, eles devem ser amplamente compatíveis; sua ideia de realismo perspectivo se posiciona contra o positivismo e o relativismo, que ele considera inadequados para o ensino escolar de ciências voltadas ao desenvolvimento humano, entre outros aspectos.

Diversas propostas de ensino têm sido implementadas por meio de modelos, que são construídos em sala de aula com a participação dos alunos, fomentando a compreensão da ciência como uma construção humana repleta de conflitos e, portanto, não linear. Da mesma forma, esse processo pedagógico mostra aos alunos que a mesma parte específica do mundo - como um evento, sistema, objeto ou processo - pode ser referenciada por diferentes modelos, dependendo de seu escopo, contexto ou propósito. Assim, Justi e van Driel (2005) justificam o uso de modelos no ensino argumentando que, por um lado, eles são essenciais na ciência para o tratamento de entidades abstratas e para seus objetivos preditivos e, por outro, se enquadram nos três propósitos da educação científica indicados por Hodson (1992): Aprender com a Ciência, Aprender sobre a Ciência e Aprender a fazer Ciência.

Considerando a necessidade de os alunos participarem das atividades de modelagem, ou seja, desenvolver, avaliar, modificar e discutir tanto os contextos de uso quanto o escopo e as limitações dos modelos, Justi e van Driel (2005), e Cardoso e Justi (2011) aplicaram o diagrama do Modelo de Modelagem, proposto por Justi e Gilbert (2002), para analisar experiências de ensino de conceitos de química por meio de modelagem. O que eles descobriram, além de promover uma aprendizagem significativa, é que essas atividades de modelagem em sala de aula exigem interação aluno-professor, a organização de grupos de alunos que facilitem a discussão e a moderação do professor para orientar o processo, já que o professor é responsável por definir objetivos, selecionar um fenômeno, propor cenários hipotéticos, apresentar a questão do problema e garantir que os alunos entendam os conceitos pré-requisitos do modelo. (Cardoso; Justi, 2011)

Alcançar esses objetivos exige um professor com conhecimento além do campo disciplinar, sobre as concepções alternativas dos alunos, sobre a natureza da ciência, sobre a história e a filosofia da ciência e, claro, sobre a modelagem da ciência em sala de aula. Como mencionado anteriormente, as tendências atuais também ressaltam a necessidade de explicitar as ideias com as quais os alunos chegam à sala de aula e de construir conhecimento a partir delas, já que estas constituem seus fundamentos conceituais, com os quais confrontam qualquer explicação de qualquer fenômeno. A razão desta abordagem reside na consideração de que a aprendizagem a que nos referimos consiste na construção de representações da realidade expressas em redes conceituais, cada vez mais complexas à medida que se avança na compreensão dos diversos fenômenos. (Díez; Moulines, 1999).

Como a compreensão requer a articulação de mais e melhores conceitos que representem a complexidade dos fenômenos, a estrutura conceitual é modificada em maior ou menor grau

[...] somente à medida que crescemos é que começamos a ordenar e interpretar melhor o que acontece ao nosso redor, por meio de categorias e inferências cada vez mais adaptadas, que tornam o ambiente complexo em que nos movemos menos variável e mais previsível; e isso depende de um conhecimento progressivo, cada vez mais amplo e organizado - ou, se preferir, mais funcional - que se materializa em conceitos cada vez mais ricos e elaborados... (Gutiérrez, 2005, p. 15, tradução própria).

De fato, a articulação e a complexidade conceitual são características essenciais da teorização científica (Mosterín, 2000), de certa forma também pretendidas no ensino de ciências. Entretanto, diferentes estudos têm mostrado a resistência das estruturas conceituais dos alunos às estruturas conceituais científicas ensinadas em sala de aula. Nesse ponto, os pesquisadores propuseram o modelo de mudança conceitual, que foi sendo ajustado à medida que a pesquisa avançava, da abordagem da suficiência do conflito cognitivo para a ideia de mudanças nos princípios centrais, que causariam, segundo Moreira e Greca (2003) “o surgimento de novos princípios, incomensuráveis com os antigos” (p. 304, tradução própria). Mas, na prática, ficou claro que esse tipo de mudança conceitual não é fácil de alcançar: “o conflito cognitivo, por mais crucial que seja, não parece ser suficiente para substituir definitivamente uma concepção alternativa” (Moreira; Greca, 2003, p. 303, tradução própria).

Como afirmam Moreira e Greca (2003), o problema dessa visão é que ela pretende que o aluno substitua o que aprendeu significativamente em seu cotidiano, ou seja, o que passou a fazer parte de sua estrutura cognitiva e de seu ser, constituindo suas próprias concepções. Diante disso, esses autores argumentam que estratégias para mudança conceitual devem promover a aprendizagem significativa, que acrescenta “novos significados aos conceitos existentes, sem apagar ou substituir os significados existentes. Ou seja, o conceito se torna mais elaborado ou mais rico, em termos de significados a ele adicionados, ou evolui sem perder sua identidade”. (Moreira; Greca, 2003, p. 305, tradução própria). Além disso, eles dizem que

Uma concepção (subsumidor) pode ser imaginada como uma nuvem de significados, adquiridos principalmente por assimilação, desenvolvendo-se de tal forma que nenhum é eliminado, abandonado, descartado, todos estão sempre presentes, pelo menos residualmente (Moreira; Greca, 2003, p. 308, tradução própria)

e cabe ao sujeito conhecedor discriminá-los contextualmente. Assim, a mudança conceitual envolveria um processo evolutivo no qual a exposição a conceitos científicos, em diferentes contextos, enriquece a nuvem de significados do aluno ao longo do tempo, não a eliminação de uma estrutura conceitual em favor de outra completamente nova e incomensurável.

Outra perspectiva para compreender a persistência de concepções alternativas são os perfis conceituais, sugeridos por Mortimer (1995) com base no modelo de perfil epistemológico de Gaston. Bachelard⁷ (1884-1962). Em sua proposta, Mortimer mantém a ideia de hierarquização das zonas de perfil proposta por Bachelard, mas ressalta duas diferenças: 1) cada zona do perfil conceitual guarda diferenças que não são apenas epistemológicas, mas podem ser também ontológicas, apesar de se referirem ao mesmo conceito, como é o caso do conceito de átomo. Essa caracterização ajudaria a identificar possíveis obstáculos que de outra forma passariam despercebidos, levando em conta que “muitas das dificuldades na aprendizagem de conceitos científicos foram identificadas com as dificuldades em mudar as categorias ontológicas às quais os conceitos se referem” (Mortimer, 1995, p. 273, tradução própria). 2) Os limites das zonas pré-científicas não são delimitados por escolas de pensamento, mas pelos compromissos epistêmicos e ontológicos do indivíduo, que por sua vez são influenciados culturalmente, de modo que, apesar das individualidades, os perfis conservam as mesmas categorias na mesma cultura, pois fazem parte de representações coletivas.

Como resultado, um perfil conceitual é dependente do contexto, em virtude da formação do indivíduo, e dependente do conteúdo, pois faz referência a um conceito específico. Mas, ao mesmo tempo, as categorias são independentes do contexto, uma vez que são culturalmente compartilhadas, como pode ser visto na história da ciência e em estudos sobre concepções alternativas. Consequentemente, é possível, em alguns casos, ensinar um conceito em uma categoria, sem referência a um nível menos complexo, dadas suas diferenças epistemológicas e ontológicas.

O processo de aprendizagem pode ser pensado como a construção de um corpo de noções com base em novos fatos e experimentos apresentados aos alunos no processo de ensino. O novo conceito não depende necessariamente de conceitos anteriores e pode ser aplicado em um domínio novo e diferente. Somente quando o conceito alternativo constitui um obstáculo epistemológico ou ontológico ao desenvolvimento do conceito em um nível mais complexo, torna-se necessário abordar a contradição, [...] Superar essa contradição significa encontrar uma maneira de explicá-la, o que é possível no nível mais

⁷ Em 1940, Bachelard afirmou que um sujeito possui diversas posições sobre o conhecimento de um conceito, analisado a partir de diferentes posições epistemológicas.

complexo do conceito, mas não significa abandonar a antiga maneira de vê-la, que continua a fazer parte do perfil conceitual” (Mortimer, 1995, p. 273-74, tradução própria).

Nessa perspectiva, o professor deve determinar as divisões do perfil conceitual e identificar os obstáculos, tarefa em que a literatura sobre concepções alternativas, a história da ciência e a filosofia da ciência se tornam importantes. Por sua vez, o aluno deve tomar consciência do seu próprio perfil, permitindo-lhe avaliar os seus próprios perfis e reconhecer as limitações dos seus próprios conceitos. Isso significa que o aluno se torna capaz de analisar seus próprios pensamentos e adquirir habilidades críticas que lhe permitem superar suas próprias ideias. Mortimer (1995) afirma que o aluno deve generalizar o novo conceito em diversas situações perturbadoras e problemáticas que confrontam suas ideias, superando a tendência confortável de usar concepções anteriores. Ou seja, é preciso ser capaz de determinar em que contexto uma ou outra concepção é plausível e frutífera.

Além dos aspectos conceituais, contextuais da ciência que influenciam seu ensino, deve-se considerar também a influência da motivação do aluno, eixo central do processo de aprendizagem das ciências. Segundo Severo e Kasseboermer (2017), pesquisas permitem concluir que a relação entre aprendizagem e motivação é recíproca. Portanto, o complexo sistema de fatores que influenciam a motivação dos alunos deve ser levado em consideração no planejamento dos processos de ensino, embora este seja um campo de pesquisa no qual ainda há muito a ser compreendido. Segundo Dávila-Acevedo *et al.* (2021), a educação científica tem se limitado à esfera dos conteúdos, ignorando os afetos e as emoções que ocorrem nos sujeitos envolvidos, cuja integridade implica também crenças, atitudes, valores e ideais.

Essa primazia do conteúdo pode ser compreendida no marco de certas orientações positivistas que se consolidaram no ensino de ciências, ainda presentes nas escolas, que consideram válidos os fatos positivos, de modo que a subjetividade, os afetos e as emoções são considerados inadequados para o processo de ensino de ciências. Infelizmente, segundo Dávila-Acevedo *et al.* (2021), essas práticas também contribuíram para distanciar “a ciência das preocupações dos alunos e da emoção que historicamente marcou os momentos de construção do conhecimento”. (Acevedo *et al.*, p. 824, tradução própria). Como resultado, eles sugerem que os estudos sobre a mudança conceitual, ou construção de conhecimento, não deve se restringir ao cognitivo, mas também deve incluir o emocional.

Assim, aprender ciências, especialmente no nível do ensino médio, é um processo cognitivo que envolve eventos que colocam em jogo as habilidades, capacidades, atitudes, intenções e interesses do aluno. Ou seja, situações ligadas aos seus estados emocionais, que

podem ser positivos ou negativos. De fato, “as emoções positivas produzem sentimentos de prazer em pouco tempo, enquanto as negativas geram sentimentos desagradáveis e a mobilização de muitos recursos para enfrentá-los” (Dávila-Acevedo *et al.*, 2021, p. 824, tradução própria). Portanto, espera-se que a aprendizagem seja potencializada quando os alunos vivenciam emoções positivas na construção de conteúdos científicos, onde se sentem capazes de aprender o conteúdo. O oposto ocorre quando eles percebem emoções negativas, por exemplo, a visão de uma imagem da ciência como chata, difícil, retórica e de pouca utilidade, o que é reforçado pela orientação inadequada que o professor dá à sua turma. Entretanto, o verdadeiro papel das emoções na aprendizagem está longe de ser totalmente compreendido, pois há casos de ambiguidade e, de fato, nem todos os indivíduos reagem da mesma forma às mesmas circunstâncias.

Em relação aos problemas do ensino de química, Santos *et al.* (2013) sustentam que, em grande medida, nem os alunos nem os professores têm clareza sobre o porquê de estudar química. Segundo suas observações, a orientação que muitos professores fornecem em sala de aula para estudos de química é leve, seja porque focam na resolução de provas internas e/ou externas, seja porque a apresentam como um requisito para as perspectivas futuras de carreira do aluno. Para esses autores, a importância do estudo da química reside nas possibilidades que ela oferece para “o desenvolvimento de uma visão crítica de mundo, sendo capaz de analisar, compreender e, principalmente, utilizar os conhecimentos construídos em sala de aula para solucionar problemas sociais atuais e relevantes para a sociedade” (Santos *et al.*, 2013, p. 1). Essa é a perspectiva que geralmente orienta novas propostas de ensino de química.

2.2 BASES TEÓRICAS DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA E DA FILOSOFIA DA CIÊNCIA

Desde a década de 1960, diversos movimentos sociais têm questionado a atividade científica e seus resultados, diante de inúmeros problemas que afetam os indivíduos, a sociedade e a vida no planeta, como a manipulação genética, as mudanças climáticas, a poluição ambiental, a produção de armas, o uso da energia nuclear, a síntese de substâncias cancerígenas e a produção de diversos medicamentos, entre muitos outros (Medina; Sanmartín, 1990). A isto se soma, como Matthews (2015) aponta, que

Com a globalização econômica e cultural, questões muito sérias têm sido levantadas sobre a suposta universalidade da ciência e sobre a justificação e utilidade do ensino da ciência ortodoxa em culturas que têm seu próprio

conhecimento tradicional sobre a natureza e visões de mundo não científicas (Matthews, 2015, p. 10, tradução própria).

Essas questões, certas ou erradas, são veiculadas pela mídia e são de conhecimento público, por isso podem ser abordadas em sala de aula, com o objetivo de esclarecê-las, mas principalmente porque proporcionam uma oportunidade de contextualizar conteúdos, alcançar uma aprendizagem significativa e contribuir para a alfabetização científica cidadã, com contribuições da história e da filosofia da ciência. Como destacam Barbosa e Guerra (2016), devemos questionar o porquê, o que e como ensinar ciências.

Por outro lado, é evidente que é graças à ciência e tecnologia que se pode sustentar a sociedade contemporânea, tão exigente em recursos materiais e energéticos para a vida diária, não só devido à crescente população mundial de milhões, mas também devido às exigências de inúmeras instituições sociais (Gallego-Badillo, 2001). Graças à ciência, a produção de alimentos está aumentando para atender às demandas da população mundial; a saúde é melhorada com a invenção de medicamentos e a criação de programas de saúde preventiva; vários objetos são construídos para atender às necessidades de pessoas e instituições; a energia necessária é gerada, pois é um recurso indispensável à vida de toda a sociedade; entre outros. Esses fatos, assim como os problemas mencionados, fazem da ciência a forma de conhecimento que mais contribui para a compreensão do mundo natural e social e, conseqüentemente, para a configuração de visões de mundo em diferentes culturas.

Essas visões de mundo fazem parte de posicionamentos e nuances da cultura de qualquer sociedade contemporânea e convergem no cenário escolar, sendo imprescindível compreendê-las para alcançar um ensino mais adequado, no sentido de formar cidadãos com maior capacidade crítica, pautados em uma visão humanizada da ciência. Dada a complexidade e a inter-relação das diferentes visões, sua compreensão implica recorrer às contribuições da história e da filosofia da ciência, pois, de fato, as visões de mundo implicam compromissos filosóficos que se tornam mais claros à luz das fontes históricas (Farías; Molina; Castelló, 2013). Felizmente, como afirma Matthews (2015), nos últimos anos, filósofos e historiadores da ciência voltaram a se preocupar com os problemas do ensino de ciências, contribuindo significativamente para “a reconciliação atual entre história, filosofia e ensino de ciências [que] representa, em parte, um renascimento da longa tradição liberal, ou contextual, marginalizada, do ensino de ciências” (Matthews, 2015, p. 33, tradução própria). Essa tradição liberal defende a transcendência do conteúdo disciplinar em direção ao conteúdo sobre ciência, a fim de formar cidadãos críticos.

Mesmo que se pense numa educação exclusivamente técnico-científica, Matthews (2015) argumenta que:

é melhor quando os alunos sabem o significado dos termos que usam; se eles conseguem pensar criticamente sobre textos, relatórios e sua própria atividade científica; se eles podem elucidar a maneira como certas evidências se relacionam ou não com as hipóteses que buscam provar; se eles conseguem representar dados e passar de dados para fenômenos de forma inteligente e cuidadosa, e se conseguem discutir, argumentar e propor ideias entre seus colegas. [...] Alunos que conduzem e interpretam experimentos precisam saber algo sobre como a descrição de dados depende da teoria, como as evidências se relacionam com fundamentos indutivos ou falsificações dedutivas de hipóteses. (Matthews, 2015, p. 35, tradução própria).

Segundo Matthews (2015), no ensino e na aprendizagem das ciências, a história da ciência pode auxiliar: 1) na humanização da ciência, 2) na promoção do pensamento crítico, 3) na significação e no significado dos temas científicos, 4) na promoção da aprendizagem de alguns conceitos, 5) na formação de professores, 6) na proposição de elementos de julgamento no debate educacional. Estas contribuições são complementadas pelas contribuições da filosofia da ciência, uma vez que “tornar a filosofia mais explícita [na sala de aula] contribui para atingir os objetivos de uma boa educação científica” (Matthews, 2015, p. 220, tradução própria). Tanto a história da ciência quanto a filosofia da ciência mostram que a atividade dos cientistas e seus produtos teóricos não constituem uma prática unânime, orientada pelo método científico e produtora de verdades infalíveis. Consequentemente, a apropriação da história da ciência e da filosofia da ciência pelo professor contribuiria para aprimorar sua prática e tornar a aprendizagem das ciências mais significativa.

Entretanto, apesar do impacto positivo dessa mudança de perspectiva sobre a natureza da ciência, ela ainda é rara nas práticas de ensino do ensino médio. (Camacho; Gallego; Pérez, 2007). O triste é que, ao ensinar com base em resultados científicos definidos, por meio de leis, teorias e equações prontas, sem uma história por trás, sem avaliar os pressupostos ontológicos e epistemológicos em jogo, a partir de uma visão ingênua da ciência e, por vezes, por meio de práticas educacionais autoritárias, corre-se o risco de ensinar dogmas, que limitam o exercício do pensamento no aluno e sua capacidade criativa, dando origem a uma atitude de rejeição. Se, além disso, esse conhecimento é atribuído a mentes brilhantes, dotadas de capacidades extraordinárias, abstraídas de seu contexto sociocultural, acaba-se criando o mito de uma ciência fabulosa, sem história, neutra e inatingível para o ser humano comum. Em outras palavras, cria-se uma barreira enorme que fortalece a apatia dos estudantes em relação à ciência.

A articulação com a história e a filosofia da ciência pode ajudar a quebrar essa barreira, pois ajuda os alunos a valorizar os vínculos entre a ciência e os interesses pessoais, éticos, culturais, econômicos e políticos, revelando seu lado humano e, portanto, gerando interesse adicional no aluno. De fato, a vida dos cientistas e a dinâmica de suas épocas se desenrolam cercadas por eventos socioculturais particulares e em meio de confrontos de ideias marcantes e explicações engenhosas, que os alunos podem "ler", avaliar e contrastar com sua própria realidade. “A história [e acrescento, a filosofia] é uma forma de dar um rosto ao que de outra forma não passa de terminologia estranha” (Mathews, 2015, p. 167, tradução própria).

Esta leitura, avaliação e contraste de acontecimentos, bem como o confronto de ideias, deveriam convidar e motivar o aluno ao exercício permanente da criatividade e do raciocínio, ao desenvolvimento da capacidade de pensamento lógico e de pensamento crítico, através do processo de investigação conceptual, de avaliação processual, da argumentação e de contraste de hipóteses, levantadas em sala de aula. “Um professor que conhece a história de sua disciplina pode identificar quando seus alunos estão fazendo os mesmos movimentos intelectuais que cientistas anteriores e pode incentivá-los a reconsiderar debates que ocorreram no passado” (Mathews, 2015, p. 189-190, tradução própria). Enquanto a história da ciência fornece as informações necessárias, a filosofia da ciência fornece as ferramentas que permitem explicar os fundamentos ontológicos e epistemológicos que fundamentam os confrontos de ideias, a inteligibilidade das teorias, a validade das hipóteses, a leitura crítica dos fatos, a importância dos experimentos, tanto empíricos quanto mentais, na construção de teorias, entre outros (Diez; Moulines, 1999).

É claro que o papel do professor não é o de um historiador da ciência ou de um filósofo da ciência; ele ou ela deve simplesmente trazer as análises dessas disciplinas para o contexto das aulas, para usá-las em todo momento oportuno, com o objetivo de motivar o pensamento crítico, pois não se trata de “repetir slogans [sobre ciência] ou insistir nos preconceitos do momento” (Mathews, 2015, p. 255, tradução própria). Essa visão de ensino visa que os alunos sejam capazes de entender a ciência e sua natureza, valorizar as relações entre o desenvolvimento científico e a sociedade, e vai além de qualquer currículo de ciências baseado apenas na aplicabilidade e utilidade do conhecimento.

Consequentemente, isso ajudaria os alunos a encontrar significado em tópicos científicos, contribuindo para mudar sua atitude e comprometimento em se tornarem sujeitos cognitivos ativos. Os tópicos científicos não seriam mais uma coleção de conceitos descontextualizados e desconexos, nem fórmulas ou equações instrumentalmente úteis, mas carentes de interpretação. Em vez disso, eles se tornariam um processo de construção

conceitual, incluindo possíveis reconstruções experimentais, cuja intenção é aprender com, sobre e da ciência, recorrendo aos chamados conceitos estruturantes, que são identificados, precisamente, a partir de estudos de história e filosofia da ciência. Como disse Mayr (1982), citado por Matthews (2015), em referência à história da ciência:

Acredito que estudar a história de uma área é a melhor maneira de entender seus conceitos. Somente examinando o árduo trabalho que levou à sua descoberta - aprendendo todas as suposições errôneas anteriores que tiveram que ser refutadas uma por uma - é que se pode esperar adquirir uma compreensão verdadeiramente sólida e profunda. Na ciência, aprendemos não apenas com nossos próprios erros, mas com a história dos erros de outras pessoas (Mayr, 1982, *apud* Matthews, p. 164, tradução própria).

Este acompanhamento histórico ajuda a fornecer uma compreensão muito mais significativa dos conceitos científicos, pois examina suas origens e as inter-relações que foram tecidas durante seu desenvolvimento, incluindo quaisquer implicações socioculturais que isso possa ter acarretado. Como tais abordagens exigem uma análise das estruturas conceituais em que se articulam e, uma vez que estas guardam compromissos epistemológicos e ontológicos, vale a pena relembrar o aforismo de Lakatos (1922-1974), "A filosofia da ciência sem a história da ciência é vazia; a história da ciência sem a filosofia da ciência é cega" (Lakatos, 1987, p. 11, tradução própria), para reafirmar que a história da ciência não basta; a filosofia da ciência também é necessária para que o aluno encontre o significado dos diferentes constructos científicos dos quais ele tenta se apropriar.

Assim, recorrendo à história da ciência, podem ser trazidos vários exemplos da observação do "mesmo fenômeno"⁸ que, no entanto, foi lido, analisado e compreendido de forma diferente por diferentes cientistas. Ou seja, embora seja o mesmo "fenômeno físico", diferentes interpretações teóricas são construídas pelos cientistas, portanto não é um problema de percepção, mas uma questão epistemológica e até ontológica.

Sem dúvida, é importante que o professor reconheça essas características ontológicas e epistemológicas, bem como a distinção entre um fenômeno físico e sua interpretação teórica. É importante deixar claro aos alunos que os objetos, variáveis e relações de interpretação teórica estão sujeitos a restrições e idealizações, por isso se comportam de acordo com um modelo teórico, e que fenômenos físicos reais apresentam "desvios" em relação ao modelo teórico.

⁸ Falar de fenômeno é bastante problemático, no entanto, eu cunho o termo em um sentido amplo, para me referir a um evento natural ou experimental, de interesse do cientista.

Nesse sentido, a história e a filosofia da ciência permitem uma possível compreensão de alguns problemas na aprendizagem de determinados conceitos, considerando o chamado paralelismo entre as ideias dos alunos e as ideias dos cientistas do passado, que deve ser entendido em termos funcionais e não estruturais, ou seja, raciocinando sobre seu caráter explicativo. Dessa forma, ao compreender a lógica das explicações passadas, é possível reconhecer obstáculos epistemológicos e ontológicos para antecipar potenciais dificuldades de aprendizagem. Isso ajudaria os professores a “organizar o programa, selecionar experimentos e atividades, planejar perguntas e desafios para a sala de aula, ‘reproduzir’ experimentos originais e invocar interpretações e debates históricos sobre os experimentos”. (Matthews, 2015, p. 165, tradução própria).

Além disso, facilita a determinação de conceitos estruturantes, fundamentais para o ensino de ciências, na medida em que são conceitos articuladores, atuando como âncoras que mantêm unidas diversas estruturas conceituais. Tal reconhecimento depende dos períodos históricos em que surgiram, pois são conceitos que possibilitaram grande progresso devido à sua capacidade explicativa e preditiva; isto é, conceitos que permitiam articular e construir uma complexidade crescente de ideias, com as quais conceber novos fatos. (Bizzo, 1993).

Por sua vez, Solbes e Traver (2003) propuseram oito critérios para a seleção de conteúdo histórico: 1) extrair problemas significativos que podem ser resolvidos pelos alunos; 2) introduzir momentos de crise no desenvolvimento da ciência para mostrar sua natureza hipotética e provisória; 3) apresentar a aventura da criação científica, reconhecendo que ela também é cumulativa; 4) mostrar o caráter coletivo e controverso da pesquisa científica; 5) valorizar adequadamente a contribuição dos diferentes grupos tradicionalmente discriminados; 6) expor os principais problemas que ameaçam o futuro da humanidade; 7) apresentar alguns exemplos da responsabilidade dos cientistas em relação às questões sociais; 8) revelar a contribuição da ciência para o desenvolvimento da humanidade e para uma visão de mundo baseada na racionalidade em oposição a qualquer forma de fundamentalismo ou pseudociência.

A história e a filosofia da ciência também fortalecem a formação de professores. Gil *et al.* (2001) delinearam sete visões distorcidas da ciência, não necessariamente excludentes, que costumam estar presentes em sala de aula: 1) a empírico-indutivista e atórica, 2) a rígida, algorítmica e infalível, 3) a não problemática, a-histórica e dogmática, 4) a analítica e incoerente, 5) a cumulativa e linear do conhecimento, 6) a individualista e elitista, cheia de gênios, e 7) a socialmente neutra. Isso ressalta a necessidade de os professores aprofundarem suas reflexões sobre a natureza da ciência e os objetivos de seu ensino, com vistas a promover a alfabetização científica entre os cidadãos e evitar tais concepções errôneas. Analisar diferentes

fatos históricos da ciência e os interesses a eles vinculados, bem como os compromissos filosóficos defendidos nos debates teóricos, no contexto histórico específico, proporcionaria ao professor uma maior compreensão da natureza da ciência como um processo de construção do conhecimento, bem como uma visão dos problemas metodológicos, ontológicos e epistemológicos enfrentados.

Esse treinamento restauraria um lugar intelectual e social para os professores na busca por soluções para problemas de ensino, proporcionando aos alunos oportunidades mais bem fundamentadas de avaliar o trabalho dos cientistas e seu impacto na sociedade, bem como maiores elementos de julgamento sobre as decisões que devem ser tomadas. Nesse sentido, o professor seria capaz de se posicionar criticamente diante dos debates em torno de tendências educacionais que tendem a virar moda e são seguidas de forma acrítica. Ao reconhecer e tornar explícito os princípios e compromissos filosóficos subjacentes, suas origens históricas e as controvérsias que eles levantam, estaria em posição de ampliar sua visão de mundo e alcançar uma melhor compreensão das teorias educacionais.

Por exemplo, a reflexão filosófica de Matthews (2015) sobre racionalismo e empirismo, na qual ele argumenta que ambas as posições partem da experiência do indivíduo como fundamento do conhecimento, da experiência interna da mente para o racionalismo e da experiência externa dos sentidos para o empirismo. Mas como a experiência é afetada pelas circunstâncias, cultura e ideologia dos indivíduos, ambas as posições minam os fundamentos do conhecimento e a solidez do edifício da ciência, levando ao ceticismo, o que é inadequado para o ensino de ciências. Ele ainda acrescenta que o construtivismo é uma variante moderna do mesmo problema, então precauções devem ser tomadas. Em sua reflexão, o erro está na supervalorização da experiência passiva em detrimento da intervenção experimental e da mensuração, que permitem reconhecer processos causais e estabelecer limites à subjetividade rorschachiana⁹. Sem maiores detalhes, este exercício exemplifica o escopo da filosofia para a melhoria do ensino de ciências.

Por sua vez, Camacho, Gallego e Pérez (2007) realizaram uma reconstrução histórico-epistemológica e didática da Lei Periódica, destacando que as comunidades científicas podem enfrentar certos problemas, “formulando modelos químicos e/ou modelos educacionais” (Camacho; Gallego; Pérez, 2007, p.278). Considerando tanto a importância desta lei para o ensino de química quanto o fato de sua origem ser essencialmente didática, eles analisaram seu

⁹ O teste de Rorsch é uma avaliação projetiva na qual os sujeitos observam imagens ambíguas de manchas de tinta e descrevem o que veem em cada uma delas. É assumido como uma forma de revelar pensamentos, motivos ou desejos inconscientes de uma pessoa.

tratamento em alguns livros didáticos de Química Geral utilizados em duas universidades colombianas. As categorias de análise para avaliação dos textos foram: a) análise dos fatos que permitiram a construção da Lei Periódica como modelo de ensino e como modelo científico, b) utilização da categoria epistemológica modelo científico para dar conta da química como ciência e da Lei Periódica, e c) do trabalho científico que, como atividade humana, foi desenvolvido coletivamente, em um dado contexto cultural.

Os resultados mostraram que os livros didáticos negligenciam o componente histórico da atividade científica, não apresentando a ciência como uma atividade humana desenvolvida em contextos sociais e culturais específicos. Consequentemente, eles não oferecem oportunidades para reflexão crítica sobre o desenvolvimento desta lei e sua importância para a compreensão da química. Este é outro exercício que destaca o valor da história e da filosofia da ciência no ensino de diferentes disciplinas.

No entanto, há vozes de historiadores e cientistas que rejeitam a inclusão da história da ciência no ensino de ciências. Alguns historiadores dizem que a história usada no ensino de ciências é uma versão empobrecida, uma história ruim; do lado dos cientistas, argumenta-se que tal inclusão retira tempo do ensino de conteúdo científico. A justificativa dos historiadores é que a seleção de materiais, neste caso para fins pedagógicos, é contrária ao padrão da boa história, pois molda o relato histórico com os padrões da estrutura conceitual vigente ou com interesses pedagógicos e, portanto, distorceria tanto os problemas que realmente preocupavam os cientistas da época, quanto os contextos reais em que atuavam, o que supõe uma perspectiva anacrônica, conhecida como historiografia Whig (Lombardi, 1997).

Outra crítica enfatiza a diferença de perspectiva entre o historiador e o cientista. Argumenta-se que os fatos que interessam ao historiador são de natureza complexa, com muitas informações e sujeitos a interpretações, o que os coloca em uma linha de pensamento divergente; e que, em contrapartida, os fatos para o cientista parecem mais restritos, em busca de informações precisas e inequívocas, o que o coloca numa linha de pensamento convergente. Segundo os críticos, isso seria contraproducente para o ensino de ciências porque envolve duas linhas de pensamento diferentes, além de ser confuso para os alunos, minando seu espírito científico (Lombardi, 1997).

A este respeito, Kuhn (2010) mostrou que os jovens cientistas são treinados no pensamento convergente por meio de livros escritos para esse fim, e que esse tem sido um procedimento fundamental para o desenvolvimento da ciência, entendendo-se que os novos cientistas devem ser treinados dentro da estrutura da ciência normal. Nesse sentido, durante as aulas de ciências, com o auxílio de livros didáticos, a história da ciência é truncada,

apresentando exclusivamente os resultados da revolução mais recente, geralmente em referências esparsas

Com base nessas referências, tanto estudantes quanto profissionais passam a sentir como se estivessem participando de uma tradição histórica muito antiga. No entanto, a tradição derivada dos livros didáticos, da qual os cientistas passam a se sentir parte, nunca existiu de fato (Kuhn, 2010, p.143, tradução própria).

As críticas podem ser respondidas: antes de tudo, qualquer investigação deve ser seletiva para chegar a algum resultado e não se perder na multiplicidade de detalhes. No caso da interpretação do registro histórico, isso não significa aceitar qualquer interpretação baseada na negação da validade dos fatos, nem significa negar a multiplicidade de possíveis relatos históricos do mesmo evento. Em segundo lugar, cultivar processos mentais diversos, em vez de ser um desafio para professores de ciências, deve ser um objetivo da educação, pois é essencial que os alunos sempre considerem abordagens diferentes e bem fundamentadas. Então o problema não é história e filosofia nas aulas de ciências, mas sim a falta de foco de currículos cheios de conteúdo e pouca reflexão. Terceiro, não se trata de pesquisar história, mas de usar a história em sala de aula, já que o propósito do professor é pedagógico, não histórico, então ele não aplica o rigor exigido pela pesquisa histórica. Além disso, na pedagogia é preciso simplificar sem distorcer, para transformar o conhecimento disciplinar em conhecimento escolar de forma válida.

De qualquer forma, como Matthews (2015) aponta, mitos e ideologias abundam nas histórias da ciência, assim como nas histórias políticas, sociais e religiosas, por isso é necessário reconhecer isso e ter cuidado com as histórias que são levadas para a sala de aula. É claro que o grau de conhecimento do professor de História e Filosofia da Ciência o ajudará a evitar muitas ideias falsas e ingênuas relacionadas ao método científico, experimentação, medição, teorização, observação, entre outras.

2.3 CONTRIBUIÇÃO DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA E DA FILOSOFIA DA CIÊNCIA PARA O ENSINO DE QUÍMICA NO ENSINO MÉDIO

Diferentes pesquisadores têm apontado que o ensino e a aprendizagem da química não alcançam os efeitos esperados nem em termos conceituais (Lin, 1998) nem em termos das demandas educacionais atuais, sendo repetitivo e atrasado em relação às linhas de pesquisa (Chamizo, 2019a). Da mesma forma, mostraram que melhores resultados são alcançados por

meio de um ensino que aborde aspectos relacionados à construção da própria ciência. Nessa direção e com o objetivo de abordar o conhecimento escolar de forma crítica, um dos caminhos possíveis é por meio da história (Campanario, 2002; Chamizo, 2019a), da filosofia e da sociologia da ciência (Barbosa; Guerra, 2016). Essas abordagens podem ser usadas em uma dimensão metacognitiva para promover uma visão humanizada da química, mostrando os cientistas como seres humanos que discutem ideias em uma comunidade acadêmica e fora dela, fazendo parte de um contexto sócio-histórico, no qual os conceitos científicos adquirem significado.

Pode-se ainda fortalecer a ideia de que o conhecimento químico, como todo conhecimento humano, é uma construção social e não individual, que responde a problemas originados em circunstâncias sócio-históricas específicas e que, portanto, envolve também questões relacionadas à sociedade, à tecnologia e ao meio ambiente, afetadas pela “influência dos poderes políticos, econômicos e culturais” (Fariás; Molina; Castelló, 2013, p. 116, tradução própria). Em meio a essa complexidade, a reflexão filosófica da química possibilita abrir oportunidades para pensar a química a partir de perspectivas desafiadoras, que contribuam para o debate no ambiente escolar (Dunlop; Hodgson; Stubbs, 2020).

Por outro lado, deve-se levar em conta a existência de diferentes abordagens históricas que foram trazidas ao processo de ensino de química (Lin, 1998), mas nem todas são adequadas aos objetivos atuais da educação. Por exemplo, a historiografia utilizada nos livros didáticos é tipicamente caracterizada por ser linear e anedótica, destacando fatos relevantes e figuras centrais, o que leva a uma concepção de ciência elitista e inatingível para o cidadão comum (Erduran, 2001), também anacrônica e defensora da aplicação do “método científico” como um caminho rigoroso e infalível, o que acaba distorcendo a história vivida em seu contexto e criando uma imagem pobre e, de certa forma, sem sentido da química, na qual se descobrem verdades não problemáticas e, portanto, carentes de justificativa. (Quilez, 2009).

Outra forma de historiografia, na perspectiva anti-Whig, caracterizada pelo diacronismo, penetra no conhecimento histórico de eventos específicos e situa as ideias no contexto do pensamento científico do período analisado, obtendo assim “pistas explicativas sobre os processos que envolvem a evolução dos conceitos químicos... [E ajuda] a compreender as dificuldades e concepções alternativas dos estudantes” (Quilez, 2009, p. 1204, tradução própria). Essa abordagem permite que os alunos se envolvam nos processos da ciência, analisando como os cientistas desenvolveram construções teóricas e atividades experimentais e como o contexto sócio-histórico em que o fizeram os influenciou. Assim, aspectos da natureza

da ciência estão vinculados ao conteúdo disciplinar, em vez de serem tratados como um tópico separado, como de Berg (2008) destacou.

Trata-se de uma mudança de foco que não ignora a lógica interna das teorias químicas nem a natureza abstrata de seus conceitos, mas estimula a curiosidade intelectual dos alunos (Campanario, 2002), sem sobrecarregar o conteúdo (Solbes; Traver, 2003). Nesse sentido, Monk e Osborne (1997) levantam a necessidade de justificar o apelo à história e filosofia da ciência, HFC, e determinar os pontos em que esta contribuiria para a aprendizagem das ciências, de modo a integrá-los de forma coerente com os objetivos dos programas de estudo. Assim, eles propõem um modelo que equipara as ideias alternativas dos alunos às ideias científicas do passado, enfatizando a dimensão epistemológica da ciência. Este modelo poderia estimular emoções positivas nos alunos, aumentar sua curiosidade e confiança em suas habilidades, fazendo-os participar da construção do conhecimento químico escolar (Solbes; Traver, 2003), considerando a advertência de Gauld (1991), *apud* Quilez (2009), para ter em mente a diferença de contextos.

Devido à pluralidade de pontos de vista, tanto cenários de ensino mediados por perspectivas construtivistas e de aprendizagem significativa, quanto avaliações epistemológicas que enriqueçam as redes conceituais dos alunos, seriam incentivados, melhorando suas habilidades de pensamento crítico. “Objetividade, certeza e infalibilidade como valores universais da ciência podem ser desafiados pelo estudo de ideias científicas controversas em seu contexto original” (Quilez, 2009, p. 1204, tradução própria), auxiliando o desenvolvimento conceitual dos alunos, segundo Monk e Osborne (1997), de duas maneiras: dando-lhes confiança na percepção de que os cientistas pensaram de forma semelhante e mostrando-lhes que essas formas de pensar foram às vezes superadas pelo pensamento de maior escopo, utilidade e previsão.

Ao mesmo tempo, essa abordagem reconhece as preocupações do professor tanto com a aprendizagem de conceitos científicos quanto com as demandas da sala de aula em seu contexto. Dessa forma, contribui para o aprimoramento do seu processo de ensino, pois, ao enriquecer suas visões epistemológicas, sua compreensão das múltiplas formas como a ciência é construída, sua identificação dos referenciais teóricos a partir dos quais os problemas são abordados, seu reconhecimento das múltiplas interpretações dos fatos experimentais, sua apropriação do papel da imaginação e da criatividade e seu conhecimento das limitações dos modelos, bem como sua compreensão para abordar as ideias alternativas dos alunos, pode implementar estratégias de ensino que facilitem a reestruturação conceitual dos alunos. Portanto, essa integração da HFC com o processo de ensino e aprendizagem de química o torna

um componente central do ensino de química (Monk; Osborne, 1997), e distorce a ideia de seu uso como um elemento acessório ou marginal, comum em livros didáticos. (Solbes; Traver, 2003).

Entretanto, está claro que é necessária uma melhor formação de professores para alcançar a integração da HFC no ensino de química. Nesse sentido, Viana e Porto (2010) propõem que a formação de professores inclua estudos de casos históricos norteados pelas novas perspectivas do HFC, uma vez que as visões historiográficas anteriores não se mostram adequadas aos desafios educacionais atuais e não fornecem ferramentas adequadas para levar análises históricas e filosóficas para a sala de aula, dada sua predominância na linearidade da história. De fato, os resultados das análises a partir dessas novas perspectivas permitem apropriar-se tanto da complexidade da atividade científica, que envolve processos sociais e psicológicos, quanto da natureza dinâmica dos conceitos científicos, que envolve reconhecer continuidades e rupturas. Como resultado, os alunos podem adotar uma concepção mais realista da natureza da química e os professores se tornam mais conscientes da riqueza de possibilidades para o ambiente da sala de aula.

Um estudo de caso histórico visa entender como um cientista propõe uma teoria, lei ou conjunto de experimentos, as circunstâncias que cercam suas propostas e os conceitos que fundamentam suas ideias. Como resultado, podem surgir conexões entre aspectos que muitas vezes são fragmentados no ensino, ajudando os alunos a desenvolver a ideia de que a ciência tem uma certa consistência interna e, portanto, a estabelecer conexões significativas entre os conceitos, o que contribui para fortalecer as redes conceituais dos alunos.

Por outro lado, Chamizo (2019a) destaca que pesquisadores educacionais têm apontado que um possível obstáculo para incorporar a história ao ensino de química é a dificuldade de criar uma história da química adequada para os professores. Portanto, para fins educacionais, propõe uma reconstrução histórica baseada em cinco momentos revolucionários da química (Chamizo, 2019b), reconhecidos por: 1) uma reinterpretação radical do pensamento existente, que deu origem a novos conceitos ou teorias, 2) a utilização de novos instrumentos, que mudaram a forma de trabalhar, introduzindo novas entidades, e 3) o surgimento de novas subdisciplinas e suas respectivas comunidades científicas. Para isso, ele recorreu às ideias de Kuhn sobre continuidade e rupturas na história da ciência, onde cada paradigma incorpora instrumentos, subdisciplinas e entidades, sem que haja incomensurabilidade absoluta entre eles.

Devido à sua própria natureza, as revoluções químicas podem ser consideradas revoluções de localização, com mudanças em instrumentos, ou em subdisciplinas, ou em entidades, onde a interrupção de uma delas não implica necessariamente a interrupção das

outras. A partir de uma visão estratificada da história (Elwick, 2012), múltiplas condições de possibilidade são permitidas, o que é muito útil na interpretação histórica da química, dada sua tradição experimental. Assim, em sua abordagem, Chamizo (2019a) considera as três primeiras revoluções como parte da química clássica, e a quarta revolução química (1945-1966), dada pelos instrumentos espectroscópicos e cromatográficos, como aquela que transformou a substância química de ser uma entidade material para uma estrutura abstrata, modificando seu papel epistemológico e metodológico.

Nesta quarta revolução, a técnica de espectroscopia de RMN se tornou o principal método para obtenção de informações estruturais, com enormes aplicações e implicações na ciência e na indústria. Com a ajuda de computadores e programas, a estrutura da matéria passou a ser pensada em termos de mecânica quântica e, a partir daí, o termo substância começou a perder seu status de referência de identidade, dando lugar ao conceito de espécie química (Chamizo, 2019a).

Em geral, o conhecimento científico tem origem na busca de soluções para um problema, o que leva ao surgimento de conceitos que podem até mesmo fazer parte de uma teoria desenvolvida para um contexto diferente daquele do problema inicial. Além disso, alguns conceitos podem desaparecer sem interromper o desenvolvimento da teoria. Se os alunos tomarem consciência das críticas e dificuldades na gênese de uma teoria, eles estarão mais propensos a entender que as teorias são o produto de um esforço coletivo para encontrar uma solução e, como tal, têm um caráter histórico e cultural. Dessa forma, conceitos difíceis para os alunos podem se tornar seu domínio, por meio da criação de relações conceituais significativas em suas estruturas cognitivas (Viana; Porto, 2010).

De Berg (2008) levanta outro argumento sobre o porquê do HFC no ensino. Os conceitos científicos que conhecemos hoje têm uma história e têm sido objeto de debate filosófico quanto à sua referência ontológica e relação epistemológica. Nesse sentido, pode-se dizer que os conceitos científicos passaram por fases em que adquiriram diferentes valores epistemológicos, onde cada antecessor serviu de trampolim para o surgimento de ideias científicas subsequentes. Nessa perspectiva, as concepções alternativas dos alunos podem ser abordadas de forma mais apropriada, pensando-as como etapas e não como obstáculos que devem ser eliminados, muito em linha com os perfis conceituais de Mortimer (2000). A tarefa é realizar o exercício em sala de aula de relacionar os conceitos alternativos dos alunos às ideias científicas ultrapassadas, sem negligenciar as diferenças contextuais. É claro que os relatos históricos escolhidos devem ser de interesse dos alunos e ser cuidadosamente estruturados para facilitar a construção de novas ideias (de Berg, 2008).

Alcançar um ensino de química que atenda a essas expectativas também exige que a reflexão da filosofia da ciência e da filosofia da química chegue aos professores (Labarca; Bejarano; Eichler, 2013). Existem muitas discussões tanto em termos ontológicos quanto epistemológicos, que afetam diretamente a racionalidade das teorias, bem como a compreensão da dinâmica da pesquisa, por isso pode-se dizer que a filosofia da química permite uma compreensão mais profunda do conteúdo da química (Dunlop; Hodgson; Stubbs, 2020) e da explicação científica (Scerri, 2001). Esse conhecimento fornece recursos valiosos para a prática docente em sala de aula, na medida em que o professor tenha consciência de que suas posições afetam a visão de ciência que os alunos podem adquirir.

Um exemplo disso é a dicotomia contexto de descoberta-contexto de justificação, que foi um pilar amplamente difundido pelos filósofos positivistas da ciência, ao falarem sobre pesquisa científica, nos quais minimizavam o contexto de descoberta (Raicik; Peduzzi, 2016), posição que foi adotada no ensino de ciências. Entretanto, tal dicotomia foi rejeitada pelos filósofos historicistas, que notaram a impossibilidade de ambos os contextos serem independentes um do outro. Outro exemplo é a defesa da autonomia da química, levantada no debate sobre sua suposta redução à física, que suscita reflexões profundas de ordem epistemológica e ontológica (Vihalemm, 2011) e, na mesma linha, o tratamento da ligação química em termos puramente quânticos, que distorce sua natureza como entidade química (Harris, 2008) ou as discussões em torno do estatuto epistemológico e ontológico das entidades químicas (Labarca, 2005), entre muitos outros.

Segundo Holton (2003), “os educadores científicos que puderem ser persuadidos a recorrer à história e à filosofia da ciência poderão encontrar material fascinante com o qual infundir suas próprias atividades” (Holton, 2003, p. 604, tradução própria). Infelizmente, para este autor, há um abismo entre a atuação dos educadores científicos e a dos historiadores e filósofos da ciência, refletido nas próprias universidades e nos livros didáticos, que, quando utilizam fatos históricos, são meras anedotas, ou em alguns casos, interpretações do passado em termos de valores e ideias atuais. Consequentemente, a ideia de ciência transmitida é a de um corpo de conhecimento estabelecido que não requer justificação, o que permeia muitos professores que acabam preocupados apenas com o que sabemos, esquecendo como sabemos (Quílez, 2009) e o que justifica o que sabemos, ou seja, os aspectos epistemológicos e ontológicos.

3 BOHR, HUMANISTA E CIENTISTA

Como afirmou Pais (1993), “para compreender Bohr, é essencial colocá-lo no contexto da sociedade dinamarquesa” (Pais, 1993, p. 15). De fato, esta afirmação é válida para qualquer autor se considerarmos que o ser humano é um ser histórico, social e cultural (Zabala, 2009), portanto suas ideias se situam em um contexto sócio-histórico específico, embora o transcendam ao contribuir para o patrimônio cultural da humanidade. Em outras palavras, o modo de vida da sociedade à qual pertencem afeta, entre outras coisas, sua personalidade, suas formas de trabalhar, seus modos de expressão e sua visão de mundo. Embora o reconhecimento do efeito sobre o indivíduo, formando-o como membro de uma sociedade, não esgote sua existência

A sociedade não está separada do indivíduo; antes, o indivíduo é a síntese de seu pertencimento social e de sua existência não social. Essa unidade forma uma relação de interioridade e exterioridade entre o indivíduo e a sociedade. O indivíduo é parte do todo social, mas também é um todo em si mesmo. O social se apresenta como a forma necessária, mas sempre incompleta, de explicar a individualidade (Wilkis; Berger, 2005, p. 81, tradução própria).

Sendo o ser humano um ser social, pode-se pensar na noção de Émile Durkheim (1858-1917) de “representações coletivas” que unem uma sociedade; entretanto, como sugere Serge Moscovici (1925-2014), para a sociedade contemporânea, caracterizada pela invasão da ciência no pensamento das pessoas, pela rápida circulação de informações em diferentes setores sociais e pela fragmentação dos espaços da vida, o conceito mais adequado é o de “representações sociais”, que definem configurações mais precisas em diferentes grupos sociais. Trata-se de um novo senso comum,

[...] uma forma particular de conhecimento, cuja função é a elaboração de comportamentos e a comunicação entre indivíduos. É um corpus organizado de conhecimento e uma das atividades psíquicas por meio das quais as pessoas tornam a realidade física e social inteligível e se integram a um grupo ou a uma relação cotidiana de trocas (Mora, 2002, p. 7, tradução própria).

Nesse sentido, o surgimento da mecânica quântica, tendo Niels Bohr (1885-1962) como um de seus expoentes, provocou mudanças em todas as esferas da sociedade, possibilitando novas representações sociais que adaptaram novos conceitos e ideias abstratas à sociedade e, ao mesmo tempo, orientaram as interações sociais para adaptar a sociedade a novos conjuntos de categorias e informações. Segundo Moscovici, citado por Villarroel (2007), no mundo contemporâneo, é o desenvolvimento científico que propõe “a maioria dos objetos, conceitos,

analogias e formas lógicas” (Moscovici, 1979, *apud* Villarroel, 2007, p. 438), utilizados pelos indivíduos num processo de reconstrução permanente dado pelas trocas entre sujeitos e grupos sociais. Nesse processo, a sociedade intervém por meio de esquemas comunicacionais e cognitivos vinculados à cultura e por meio de sistemas de valores e ideologias. (Villarroel, 2007).

Juntamente com as representações sociais, existem crenças, mitos, teorias implícitas e imagens populares. Esse tipo de conhecimento não é aceito no ensino tradicional porque é considerado pensamento ingênuo e um obstáculo ao conhecimento científico, dissociado do rigor dos conceitos científicos. Assim, o filósofo, o sociólogo e a pessoa comum oferecem interpretações diferentes: o primeiro se interessa pelo conhecimento científico e sua lógica, o segundo pelas interpretações que as pessoas fazem em seu cotidiano e o terceiro pela compreensão de seu mundo imediato ou cotidiano. No entanto, esse conhecimento está interligado ao conhecimento escolar e não pode ser descartado sumariamente. É necessário reconhecer que ele está presente porque faz parte do ser humano (Piña; Cuevas, 2004).

Por outro lado, os conceitos que um autor põe em jogo, no âmbito de sua proposta, não são criações no vácuo, mas estão inseridos em algum sistema conceitual que se refere a determinados fatos ou fenômenos que, ao menos, são objeto de pesquisa e discussão dentro de alguma comunidade acadêmica, na qual são especificados e validados (Mosterín, 2003). Nesse sentido, para compreender um autor e sua obra, é importante reconhecer a sociedade e o momento histórico em que ele está inserido, no que se refere às ideias e aos conceitos que são debatidos naquele momento e que formam o contexto do pensamento do autor: precisar a origem do problema que ele tenta resolver em sua obra; determinar se a discussão apela aos mesmos conceitos ou se há disparidades; destacar a validade de suas conclusões no contexto da discussão e seus efeitos em abordagens futuras, bem como apontar suas possíveis limitações; reconhecer quem são seus interlocutores e seus argumentos, entre outros aspectos.

Além dos argumentos filogenéticos e ontogenéticos que justificam o componente histórico da premissa, ela também pode ser compreendida considerando as mudanças no modo de ser humano, o que ele é e o que ele faz, como parte de uma história, de um coletivo, que compõe a cultura e é o espaço vital, onde atua como agente ativo (Herrera, 2006). Assim, às vezes os seres humanos vivem o seu tempo com absoluto otimismo; em outras ocasiões, como transição para uma plenitude futura e ilusória; Em outros períodos, a época é vivida com sentimentos de pessimismo; e há momentos de percepção crítica (Lain, 1944), como o que enquadra a sociedade dinamarquesa, e a sociedade europeia em geral, no final do século XIX e

início do século XX, caracterizada pela “mudança de mundo”, onde o sistema de convicções da geração anterior é desestabilizado pela construção de um novo.

De acordo com Laín (1944), qualquer que seja o modo de ser do ser humano, sua ação histórica assume três formas diferentes: 1) repetir o que outros fizeram em tempos passados, 2) imitar o que alguém faz em seu meio histórico-social e 3) criar novos modos de existência, amparados pelo legado cultural. Quanto a estes últimos, podem ser “modos de existir” ou “modos de resultados”. Por exemplo, Jacques Charles (1627-1691) criou um resultado sobre a relação temperatura-volume dos gases, John Dalton (1746-1823) criou muitos resultados, mas também propôs uma nova maneira de ver a estrutura da matéria, de tal forma que explicou de uma maneira inovadora vários fenômenos químicos de sua época (Viana y Porto, 2010).

Nessa perspectiva, pode-se dizer que Bohr foi um criador de modos de existir que contribuiu, juntamente com Max Planck (1858-1947) e Albert Einstein (1879-1955), para a construção do novo mundo mostrado pela mecânica quântica. Além disso, Bohr foi um guia constante de inspiração para várias gerações de físicos, como James Killian, presidente do *Massachusetts Institute of Technology* y presidente del *National Academy of Sciences*, reconhecera na cerimônia de entrega do Prêmio Átomos pela Paz a Niels Bohr, em outubro de 1957:

Você [Bohr] explorou a estrutura do átomo e descobriu muitos outros segredos da Natureza. Você lançou as bases para uma maior compreensão da matéria e da energia... Na sua profissão, no seu ensino, na sua vida pública, você demonstrou que o campo da ciência e o campo das humanidades são, na verdade, um único reino. Ao longo de sua carreira, você exemplificou a humildade, a sabedoria, a humanidade e o brilhantismo intelectual que o Prêmio Átomos pela Paz reconhecera. (Citado por Pais, p. 2, 1993. Tradução própria).

3.1 CONTEXTO HISTÓRICO, POLÍTICO, CIENTÍFICO E FILOSÓFICO DE BOHR

Bohr nasceu na Dinamarca na segunda metade do século XIX marcada por um espírito democrático, paz e neutralidade diante dos conflitos, após uma história de guerras. A economia da Dinamarca baseava-se principalmente na agricultura, no processamento de alimentos e na indústria têxtil, que, lenta e gradualmente, se transformou em uma economia mais industrializada. Inicialmente, o desenvolvimento foi impulsionado pelas necessidades do mercado interno, dadas as demandas decorrentes da mecanização da agricultura. As necessidades tecnológicas nos processos industriais levaram à criação de instituições de ensino

científico e tecnológico. Nesse cenário industrial, o movimento trabalhista reivindicou melhores condições de trabalho e contribuiu para o debate político que moldou a próspera Dinamarca. Enquanto isso, as exportações de laticínios e carne suína impulsionaram o comércio internacional e fomentaram a criação de cooperativas agrícolas, que contribuíram para o desenvolvimento do país (Menéndez, 2021).

As guerras pelo domínio econômico no contexto da consolidação do capitalismo europeu não foram estranhas à Dinamarca, que sofreu grandes perdas de seu território: com a Suécia, no século XVII; com a Noruega no início do século XIX, no contexto das Guerras Napoleônicas (Eyries, 1845) e com a Áustria e a Prússia em 1864, na Guerra dos Ducados, durante o reinado de Christian IX, que teve muitos conflitos com vários setores da sociedade, dadas suas posições políticas conservadoras, embora tenha se tornado um ícone nacional em virtude da moral pessoal que lhe foi atribuída. Seu reinado terminaria em 1906, quando Niels estava cursando graduação em física (Britannica).

O período de 1800 a 1850 é conhecido como a Era de Ouro cultural da Dinamarca, marcado pela exaltação do glorioso passado arqueológico, pelo rápido crescimento das ciências naturais e pelo desenvolvimento das artes, embora também seja um período de batalhas políticas (Slottved; Tamm, 2009) e grandes transformações. Na lenta recuperação do colapso econômico após as Guerras Napoleônicas e o bombardeio de Copenhague em 1807, políticos liberais, opositores da monarquia reacionária, deram seus primeiros passos em direção à monarquia constitucional de 1849, pessoas marginalizadas pelas práticas elitistas da Igreja se congregaram em movimentos cristãos alternativos e o mundo das letras voltou-se para o realismo buscando superar os excessos do Iluminismo e do Romantismo (Bravo, 2018). A segunda metade do século XIX, por outro lado, foi uma época de declínio para a Realeza em meio a disputas políticas no Parlamento, que incluíram a revisão em 1866 da constituição de 1849, após a perda dos Ducados (Slottved; Tamm, 2009).

Em 1862, Otto von Bismarck (1815-1898) tornou-se primeiro-ministro da Prússia e iniciou a unificação e expansão de todas as terras alemãs, incluindo os ducados dinamarqueses de Schleswig e Holstein. Assim, em 1º de fevereiro de 1864, a Prússia e a Áustria invadiram a Dinamarca, que teve que ceder um terço de seu território. Foi o declínio da Dinamarca em poucos meses (Britannica). No entanto, tal como a fênix, também significou o ressurgimento social e cultural da Dinamarca, o que lhe permitiu recuperar-se e tornar-se um dos 20 países mais ricos entre 1870-1890 (Peláez-Blandón, 2014). Maurice Egan (1852-1924), embaixador dos EUA na Dinamarca de 1907 a 1918, reconheceu: “É edificante ver uma pequena nação, lutando contra obstáculos que poderiam ter desencorajado um povo menos enérgico, lembrar

que a arte, a literatura e a música são tão parte de sua vida natural quanto os interesses materiais” (*apud* Pais, 1993, p. 43, tradução própria). Em meio a essas circunstâncias, Bohr nasceu e se tornou uma figura nacional.

A Europa Ocidental do século XVIII, no marco da Revolução Industrial, conheceu um crescimento económico significativo, sobretudo nos países de vanguarda do capitalismo, a Grã-Bretanha, a França e a Holanda, graças à contribuição de dois fatores: de um lado, a burguesia, liderando o comércio internacional, que incluía o tráfico de escravos para a América e a gestão financeira, no meio de conflitos recorrentes que implicavam a intervenção militar, dando origem às primeiras guerras "mundiais", desde o século XVIII, a dividir o mundo (Fontana, 2019); Por outro lado, os camponeses e artesãos, que desenvolveram o crescimento económico interno (Efimov; Galkine; Zoubok, 1964) e, segundo Fontana (2019), até o mesmo progresso tecnológico industrial em vez da revolução científica do século XVII.

O século XIX “seria a era que levaria à chegada da era mundial”. (Venayre, 2019, p. 4). A consolidação de uma nova divisão internacional do comércio marcou a evolução da economia mundial, baseada na produção de matérias-primas e no trabalho escravo na periferia colonial, o que sustentou o desenvolvimento tecnológico na Europa (Fontana, 2019), mas também a reconfiguração do mapa europeu e o aumento das lutas nacionalistas (Stone, 2019). O processo de industrialização, que eliminou a oficina artesanal; avanços nos diferentes sistemas de transporte; a publicação de livros e jornais que facilitassem a disseminação de ideias; urbanização e migração, baseadas na crescente força de trabalho e no desenvolvimento económico dos países imperialistas¹⁰; tudo isso impulsionou a reconfiguração do mapa europeu, envolvido em lutas e guerras expansionistas e colonialistas, em busca de recursos para nutrir suas economias, imerso em novas exigências (Venayre, 2019). Assim, nos últimos 30 anos do século XIX, destacam-se:

a incorporação de novas fontes de energia e a abertura de um novo campo em termos de tecnologia, que Veblen chama de “tecnologia da física e da química”. É uma tecnologia baseada na aplicação direta da ciência e da investigação científica, em vez de mera engenhosidade mecânica... [Que] exigiu o investimento de grandes volumes de capital e enormes unidades de produção... [especialmente na] indústria siderúrgica, da eletricidade, da química industrial e do petróleo. (Magdoff, 1969, p. 31, tradução própria).

Dentre esses Estados, destacaram-se Grã-Bretanha, França, Prússia, Itália e Bélgica, cujas ideias políticas visava justificar políticas de colonização, disfarçadas de desenvolvimento

¹⁰ Uma reflexão sobre o imperialismo pode ser encontrada em: Amin (1980).

e civilização. Consequentemente, as potências mantiveram uma intensa disputa pelas colônias africanas, asiáticas e americanas, cujo controle político e econômico lhes dava o direito de explorar a mão de obra e os mercados locais em benefício próprio, incluindo a usurpação de terras e o desenraizamento de comunidades nativas. As respostas das colônias e as tensões contínuas afetaram os desenvolvimentos políticos e científicos subsequentes na Europa, levando à Primeira Guerra Mundial (1914-1918), na qual a Dinamarca permaneceu um país neutro. (Efimov; Galkine; Zoubok, 1964).

As exigências do modo de produção capitalista exigiram o desenvolvimento da ciência e tecnologia (Magdoff, 1969) e, ao mesmo tempo, seus resultados criaram um clima de otimismo quanto ao domínio da Natureza, o que levou os fundamentos das ciências naturais a servirem de suporte ideológico ao nascente sistema capitalista. Assim, o determinismo mecanicista, que permeou todas as ciências a partir do paradigma da física, serviu para justificar o progresso europeu como uma história supostamente determinada (Fontana, 2009), enquanto a teoria darwiniana foi utilizada para legitimar as práticas predatórias do capitalismo e a ideia de raças humanas superiores (Monereo, 2009), ideologia defendida por Herbert Spencer (1820-1903) conhecida como darwinismo social. Nesse contexto, os fisiocratas, no século XVIII, apresentavam as regras do mercado como leis naturais (Scheifler, 1990).

Assim, o desenvolvimento da ciência moderna, que ocorreu paralelamente aos eventos sociopolíticos de sua época, não é o produto de algumas mentes brilhantes, embora alguns cientistas se destaquem por suas contribuições, que, em todo caso, também se basearam nas contribuições daqueles que os precederam, como I. Newton (1643-1727) reconheceu quando disse: “Se vi mais longe, foi porque estava sobre os ombros de gigantes”¹¹. Neste documento, qualquer menção a um autor é feita para reconhecer suas contribuições ao conhecimento, que não são unânimes nem lineares. Entende-se que cada autor está inserido em um contexto sócio-histórico e tecnológico no qual múltiplos atores atuam em torno das ideias, hipóteses, experimentos e teorias do momento.

Desta maneira, no século XVII, enquanto uma perspectiva quantitativa baseada no dinheiro e nos bens começava a emergir na Europa (Galbraith, 1983), Isaac Newton publicou em 1687 os *Principia*, nos quais realizou um programa completo de organização mecânica e matemática do cosmos, com tempo e espaço absolutos, pondo fim a qualquer diferença entre a física terrestre e a celeste, promovida pelo aristotelismo (Moledo; Oslzevicki, 2014). Ele também mostrou que a luz branca é composta de diferentes cores do espectro do arco-íris e

¹¹ Escrito em uma carta para Robert Hooke, em 1675.

propôs que cada cor é composta de partículas de tamanho específico, necessariamente se movendo na mesma velocidade, de modo que a refração era explicada pela diferença no tamanho das partículas. Ao contrário de Newton, Christiaan Huyghens (1629-1695) argumentou que a luz deve se propagar por meio de ondas longitudinais, transmitidas através da “matéria etérea”, que ocupa todo o espaço aparentemente vazio. Essa hipótese do éter serviu para justificar muitos fenômenos físicos, até que Albert Einstein (1879-1955) a abandonou em 1905 (Eisenstaedt, 2015). As duas visões sobre a natureza da luz foram esclarecidas pela mecânica quântica.

Filósofos naturais como Robert Hooke (1635-1703), Gottfried Leibniz (1646-1716) e Leonhard Euler (1707-1783) criticaram a imagem corpuscular da luz, mas a autoridade reverencial de Newton, mediada até mesmo por sua animosidade em relação a Hooke, prevaleceu ao longo do século XVIII e suas ideias sobre a luz reinaram até o século XIX, quando novas técnicas experimentais reverteram o conflito: Thomas Young (1773-1829), usando o fenômeno da interferência, contrastou experimentalmente o modelo de Newton e apresentou razões pelas quais as ondas deveriam ser pelo menos parcialmente transversais. Mas sua falta de rigor matemático ofuscou seus resultados, até que Augustin Fresnel (1788-1827) expressou essas ideias matematicamente de forma independente, para a Academia Francesa de Ciências, que foram revisadas pelos newtonianos Denis Poisson (1781-1840), Jean-Baptiste Biot (1774-1862) y Pierre Simon Laplace (), que procuraram por quaisquer falhas no modelo de Fresnel. Mas não havia ambiguidade nos cálculos e as previsões foram corroboradas em 1819, provando que Newton estava errado sobre a natureza da luz. A partir de então, o modelo ondulatório da luz deixou de ser uma mera hipótese, deixando seus detratores sem argumentos. Mas a teoria precisava ser desenvolvida e era necessário entender o que estava se movendo na transmissão da onda (Gribbin, 2006).

Com o desenvolvimento da teoria ondulatória no século XIX, tornou-se possível descobrir novos tipos de luz, com frequências abaixo do vermelho e acima do violeta. Em 1800, William Herschel (1738-1822), investigando a relação calor-cor, descobriu os “raios de calor” (luz infravermelha), embora não os considerasse uma extensão do espectro visível, já que, naquela época, não fazia sentido falar de luz invisível ou luz negra. Em 1801, Johann Ritter (1776-1810), encorajado pela descoberta de Herschel, procurou por possíveis radiações na outra extremidade do espectro visível, usando cloreto de prata para detecção, razão pela qual foram chamados de “raios químicos” (luz ultravioleta) (Moledo; Oslzevicki, 2014).

Por outro lado, na década seguinte à morte de Newton, os físicos começaram a estudar o fenômeno da eletricidade (Gribbin, 2006). Pieter van Musschenbroek (1692-1761) criou um

capacitor primitivo em meados da década de 1740. Charles de Coulomb (1736-1806) descreveu matematicamente as forças elétricas em 1785. No final do século XVIII, Alessandro Volta (1745-1827) inventou a bateria elétrica e abriu caminho para o trabalho de Michael Faraday (1791-1867) e James Maxwell (1831-1879). Hans Ørsted (1777-1851), em 1820, descobriu que uma corrente elétrica gera ação magnética, unindo assim ambos os fenômenos. Michael Faraday estudou eletromagnetismo e eletroquímica, sendo um cientista experimental muito prolífico, da década de 1820 até o dia de sua morte. Em 1831, mostrou a indução eletromagnética, com a qual foram inventados o motor elétrico e o dínamo, e em 1846 ele até sugeriu que a luz poderia ser explicada como um tipo especial de vibração das linhas de força elétrica, efetivamente descartando o éter (Gribbin, 2006), em 1834 publicou sua pesquisa eletroquímica, que contribuiria significativamente para a descoberta do elétron (Sánchez, 1997). Em 1826, André-Marie Ampère (1775-1836) organizou os resultados de Ørsted e deduziu a regra que hoje leva seu nome, um ano depois formulou a teoria da eletrodinâmica (Moledo; Oslzevicki, 2014).

Três anos antes da morte de Faraday, Maxwell publicou sua síntese eletromagnética, condensada em quatro equações, que segundo Pais (1993), a síntese de Maxwell poderia muito bem representar o coroamento dos enunciados da física do século XIX, pois unifica eletricidade, magnetismo e luz. Maxwell percebeu que as ondas elétricas e magnéticas devem se mover na velocidade da luz e concluiu que a luz deve consistir em ondas transversais do mesmo meio que causa fenômenos elétricos e magnéticos (Gribbin, 2006). Além disso, foi possível fazer previsões sobre outros tipos de radiação além da luz. O próximo passo foi dado por Heinrich Hertz (1857-1894), que demonstrou a existência de vibrações criadas eletromagneticamente que poderiam ser refletidas, refratadas e difratadas (Gribbin, 2006). Nestes tempos de ascensão da teoria eletromagnética, Wilhelm Röntgen (1845-1923) descobriu os raios X em 1895, e Paul Villard (1860-1934) descobriu os raios gama em 1900.

Entretanto, Maxwell e muitos físicos do século XIX defenderam a existência do éter como um meio necessário, onipresente e em estado de repouso absoluto, para explicar a propagação das ondas eletromagnéticas no espaço (Flores, 1997), o que também eliminou o conceito de espaço vazio. Assim, no final do século XIX, a velocidade da luz, c , era considerada relativa ao repouso absoluto do éter. Assim, um observador terráqueo medindo a velocidade da luz produzida por uma fonte em repouso na Terra, cuja velocidade é v no espaço, deveria obter um valor $c \pm v$, dependendo da direção do raio de luz em relação ao movimento da Terra. Mas, em 1881, Albert Michelson (1852-1931) realizou experimentos em busca de tais diferenças,

sem resultados satisfatórios, por isso alertou que a hipótese do éter estacionário não parecia correta (Gribbin, 2006).

Em 1887, Albert Michelson e Edward Morley (1838-1923) propuseram um novo e cuidadoso experimento (experimento Michelson-Morley), considerando que a velocidade da Terra é aproximadamente dez mil vezes menor que a velocidade da luz. Apesar da precisão do experimento, o resultado foi o mesmo: a velocidade da luz permanece constante, mesmo que a fonte de luz se mova a qualquer velocidade v , independentemente do sistema de referência adotado. George Fitzgerald (1851-1901) sugeriu que os resultados poderiam ser explicados considerando uma contração nos instrumentos, na direção do movimento. Uma ideia que também foi proposta por Hendrik Lorentz (1853-1928) e justificada nas equações conhecidas como transformação de Lorentz. Por outro lado, Henri Poincaré (1854-1912) criticou esta hipótese, críticas que Einstein considerou na sua formulação do princípio da relatividade (Eisenstaedt, 2015).

Esses avanços nas ciências físicas foram apoiados por desenvolvimentos matemáticos. O surgimento do cálculo infinitesimal na segunda metade do século XVII, desenvolvido por Newton e Leibniz independentemente, forneceu aos cientistas a partir de então uma ferramenta indispensável para realizar cálculos com magnitudes continuamente variáveis (Gribbin, 2006). Durante o século XIX, a preocupação com o rigor, a lógica e a abstração levaram ao desenvolvimento de dois ramos: a geometria, voltada para o abstrato, e a física matemática, focada em fenômenos físicos concretos. A teoria dos grupos, a álgebra matricial, os números complexos e a lógica matemática são desenvolvidas, o uso da análise vetorial é expandido e o cálculo tensorial começa. A geometria é renovada com a criação de geometrias não euclidianas. A topologia surge e a teoria da probabilidade avança. (Flores, 1997).

Em suma, pode-se dizer que o século XIX, com todas as suas singularidades, suas guerras e momentos históricos como a Revolução Industrial (1760-1840) e a Comuna de Paris (1871-1881), preparou o que seria a nova era do século XX na Europa, marcada por ventos de mudança em todas as áreas e em todos os sentidos. Especificamente, no campo científico, significou a ruptura da concepção científica clássica, que havia sido concebida como o ápice da ciência, dando lugar ao nascimento de uma nova concepção de ciência (Cadenas, 2000) e suas diversas teorias, para cujo desenvolvimento Niels Bohr foi um dos seus colaboradores (Flores, 1997).

Em 1903, Joseph Thomson publicou o livro *Conduction of Electricity through Gases*, baseado na descoberta do elétron, e Henri Becquerel (1852-1908), juntamente com os cônjuges Marie Curie (1867-1934) e Pierre Curie (1859-1906), dividiram o Prêmio Nobel pela

descoberta da radioatividade espontânea. No mesmo ano, Rutherford investigava como um grama de rádio poderia gerar tanta energia e, com Frederick Soddy (1877-1956), introduziram o termo “energia atômica”; Da mesma forma, Albert Einstein (1879-1955), trabalhando como técnico em um escritório de patentes, escreveu um artigo sobre física estatística. Havia muitos dados acumulados esperando por uma interpretação adequada. Werner Heisenberg (1901-1976), Paul Dirac (1902-1984) e Wolfgang Pauli (1900-1958) eram crianças. Erwin Schrödinger (1887-1961) frequentou o Ginásio de Viena e Niels Bohr (1885-1962) ingressou na Universidade de Copenhague.

Em 1905, Einstein, um físico desconhecido, publicou cinco artigos fundamentais para a física de pequena e grande escala. O primeiro, “Uma visão heurística da produção e transformação da luz”, lançou as bases para a teoria quântica da luz. O segundo, “Uma Nova Determinação das Dimensões Moleculares”, foi sua tese de doutorado. O terceiro, “Sobre o movimento exigido pela teoria molecular cinética do calor de pequenas partículas suspensas em um líquido estacionário”, foi fundamental para convencer os céticos da existência dos átomos. O quarto, “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”, introduziu a Teoria Especial da Relatividade (TER). E o quinto, “A Dependência da Inércia de um Corpo em seu Conteúdo Energético”, explicou a variação na massa de um objeto que emite energia, $m = E/c^2$. (Moledo; Oslzevicki, 2014).

O quarto artigo tratou do problema da interpretação de medidas, principalmente distâncias no espaço, intervalos de tempo, massa e energia, o que envolveu uma revolução conceitual, devido à mudança do cenário epistêmico e ontológico. Fitzgerald e Lorentz pensaram na contração em termos da aproximação de partículas carregadas como consequência do aumento da força de atração derivada do movimento. Einstein desenvolveu equações idênticas às da transformação de Lorentz, mas considerando a própria contração do espaço. Ele também assumiu a dilatação do tempo e um aumento na massa de objetos em movimento (Gribbin, 2006). Poincaré, considerado o último universalista, tinha a atitude de um filósofo, interessado no sentido das coisas, daí sua constante interpretação da teoria de Lorentz e, por isso, era ele quem melhor podia avaliar as ideias de Einstein, daí sua atitude cautelosa diante do paradoxo colocado pela revolução da relatividade. (Eisenstaedt, 2015).

A TER é baseado em dois postulados. O primeiro, afirma que as leis físicas são as mesmas para todos os observadores com movimento uniforme em qualquer sistema de referência, ou seja, não há sistema inercial de referência absoluta. Portanto, de acordo com o experimento de Michelson-Morley, a definição de velocidade de luz de Maxwell está errada, pois não pode haver status preferencial para um observador. O segundo, postula que a

velocidade da luz no vácuo é uma constante universal, por isso não tem importância se a fonte de luz estiver em repouso ou um movimento uniforme, daí os intervalos de tempo e espaço, assim como a massa se tornar relativa, entrando em conflito com a física clássica, no qual o espaço e o tempo são absolutos (Eisenstaedt, 2015). Isto é, os princípios clássicos, ao contrário da crença enraizada, não eram o pedestal da ciência.

Entretanto, a nova teoria não alterou a intuição clássica da experiência cotidiana, na qual as velocidades são muito pequenas comparadas à da luz. De fato, as leis da mecânica de Newton e as leis do eletromagnetismo de Maxwell continuam sendo a base teórica para uma interpretação adequada de muitos fenômenos naturais, bem como para muitos desenvolvimentos tecnológicos. Ou seja, o TER implica uma mudança de paradigma com enormes consequências, mas com efeitos imperceptíveis ao nível das velocidades quotidianas (Arriasecq; Greca, 2002). De qualquer forma, Einstein, assim como Bohr, contribuiu para a construção de uma nova imagem do mundo físico, com novos fenômenos, que exigiam novas interpretações com novas consequências.

Em meio a essa dinâmica do século XIX, a Dinamarca era um país com poucos recursos geológicos, com uma economia baseada na agricultura, peles e pesca, e uma tradição comercial bem-sucedida em quase toda a Europa. Essa atividade comercial provavelmente permitiu que as ideias do Iluminismo se espalhassem para a classe média dinamarquesa, aumentando a popularidade dos movimentos liberais e nacionalistas e influenciando a abolição do absolutismo monárquico em 1849, após 200 anos de existência, inaugurando assim a monarquia constitucional (Britannica). O parlamento foi dividido na câmara baixa, que representava fazendeiros, comerciantes, negociantes e a classe média, e na câmara alta, que representava a aristocracia (Quiroga, 2015).

A atmosfera plural e democrática na Dinamarca, que foi gradualmente estabelecida, desde o final do século XIX, foi consolidando diferentes correntes políticas liberais, social-democratas e nacionalistas, que levaram a uma série de reformas sociais com a qual o estado atual de bem-estar foi construído, e colocou a Dinamarca como um modelo de país de desenvolvimento político e cultural político (Peláez-Blandón, 2014). É de se esperar que esse ambiente plural e democrático tenha gerado representações sociais que influenciaram diretamente os espaços escolares e as possibilidades de tornar a Universidade de Copenhague um centro do pensamento europeu, no alvorecer do século XX, o que se refletiu posteriormente no Instituto de Física, chefiado por Niels Bohr, onde floresceu a chamada interpretação de Copenhague, muito importante para o desenvolvimento da mecânica quântica (Howard, 2004).

A Universidade de Copenhague é a instituição líder em atividade científica na Dinamarca, sendo a única universidade há mais de quatro séculos. Inaugurada em 1479, inicialmente católica e depois sob a influência da Reforma luterana em 1536. A física era ensinada de acordo com os escritos de Aristóteles, para difundir a obra de Deus, sem nenhuma dúvida. Assim, Tycho Brahe (1546-1601), o aluno mais ilustre nos primeiros 100 anos, considerado o maior observador do céu antes da invenção do telescópio, teve que fazer suas pesquisas fora da universidade, na ilha de Hven. Suas observações contribuíram para mudar a ideia de um céu imutável, por meio de Johannes Kepler (1571-1630), que utilizou os dados de Brahe para formular suas três leis sobre o movimento dos planetas. No século XVII, vários dinamarqueses, como Niels Stensen (1638-1686) e Ole Rømer (1644-1710), destacaram-se nas diferentes ciências do mundo acadêmico europeu, mas isso mudou com a chegada da monarquia absoluta em 1660. (Slottved; Tamm, 2009).

Com a fundação da Real Academia Dinamarquesa de Ciências e Letras em 1742, surgiram novas perspectivas para o desenvolvimento científico no país. Mais tarde, nos primeiros anos do século XIX, a física voltou a ganhar destaque com Hans Ørsted e suas contribuições ao eletromagnetismo e à compressibilidade de gases e líquidos, e sua descoberta do elemento argílio (alumínio). Ele usou seu prestígio internacional para espalhar a ciência na Dinamarca, fundando a Sociedade para a Disseminação da Ciência em 1824, onde deu palestras para o público em geral, e em 1829 apoiando a Polytekniske Loeranstalt (Universidade Técnica da Dinamarca), uma instituição de ensino de engenharia. Entretanto, ele não teve o mesmo impacto no ensino de física teórica, pois seus interesses se voltaram para as intuições da filosofia natural. (Slottved; Tamm, 2009).

Ludvig Lorenz (1829-1891), um proeminente físico teórico, formado na Universidade Técnica da Dinamarca e professor na Academia Militar de Copenhague, formalizou matematicamente vários fenômenos relacionados à luz, condutividade térmica e eletricidade. Seus estudos sobre a passagem da luz por diferentes meios, também investigados por Hendrick Lorentz, deram origem à chamada “equação de Lorentz-Lorenz” (Slottved; Tamm, 2009). Eram os tempos da expansão imperialista e da revolução industrial baseada na tecnologia da energia a vapor e na engenharia de máquinas, o que teve seus efeitos nos conteúdos e nos métodos das universidades.

Outro físico importante foi Christian Christiansen (1843-1917), orientador de Bohr nas teses de mestrado e doutorado, que contribuiu com seu trabalho sobre o espalhamento anômalo de luz em líquidos e foi o primeiro a observar que a radiação do corpo negro emana de um buraco em uma cavidade, uma ideia que Boltzmann imediatamente adotou. Ele também

conduziu pesquisas sobre as propriedades ópticas dos cristais, condução de calor e eletricidade por atrito, e inaugurou o estudo de física teórica na universidade. Seu livro sobre elementos teóricos da física foi muito elogiado e traduzido para vários idiomas (Slottved; Tamm, 2009).

Possivelmente, dada sua localização geográfica, a Dinamarca foi influenciada pelo método experimental e pela filosofia pragmática inglesa, bem como pela ênfase formal e teórica alemã, que nela se desenvolveram graças ao seu ambiente democrático, propício ao desenvolvimento de ideias, conceitos e teorias que necessariamente envolvem pensamentos ligados a questões ontológicas e epistemológicas, que revisarei brevemente antes de analisar o contexto filosófico que nutre o pensamento de Bohr.

Entre os pioneiros das ciências naturais modernas, era comum o método empírico-indutivo e mecânico-quantitativo, buscando a formulação matemática dos fenômenos, o que era tomado como uma lei natural, visto que a linguagem da natureza era matemática. Por essa razão, expressava a ontologia de um mundo completamente mecânico e cognoscível, que teve consequências filosóficas importantes. Assim, entre os séculos XVII e XVIII, surgiram duas tendências epistemológicas que justificaram o conhecimento, com nuances diferentes, até hoje: o racionalismo continental, inspirado em René Descartes (1596-1650), Baruch Spinoza (1632-1677) e Gottfried Leibniz (1646-1716), e o empirismo insular, inspirado em Francis Bacon (1561-1626), John Locke (1632-1704), George Berkeley (1685-1753) e David Hume (1711-1776) (Hirschberger, 2012).

Para os racionalistas, a fonte do conhecimento era a razão dada por Deus, que permitiria descobrir verdades universais com as quais deduzir e justificar o conhecimento, expresso em conceitos, a partir de certas ideias inatas, deixando um lugar secundário à experiência vivida através dos sentidos. Com o empirismo, aprofundou-se a ruptura com a metafísica aristotélico-platônica ainda difundida na filosofia. Eles rejeitaram verdades universais, já que a experiência sensorial era, em si mesma, toda a verdade, pois não seria possível pensar em nada que não tenha sido sentido primeiro. Assim, sendo a coisa concreta e singular a única realidade, a suposta universalidade não passaria de um pensamento vazio (Losse, 1981).

Após o período iluminista do século XVIII, caracterizado por um otimismo excessivo em relação ao progresso baseado na ciência, ou seja, na capacidade de raciocínio e experimentação, o idealismo alemão recuperou a profundidade da filosofia, retomando a justificação epistemológica do conhecimento. Assim, configuraram-se duas posições: o idealismo subjetivo, representado por Johann Fichte (1762-1814) para quem a realidade do objeto é o seu “ser pensado”, e o idealismo objetivo, no qual os entes são, em princípio,

incognoscíveis, embora haja uma aproximação assintótica, tendo como principal representante Immanuel Kant. (1724-1804). (Artigas, 2009).

Kant não se desvinculou da metafísica tradicional, apenas a reinterpreto através da epistemologia, buscando dentro dos limites do conhecimento, em que a metafísica deveria seguir o método de Newton, cujo espaço e tempo absolutos são as condições que tornam possível o conhecimento sensorial, (Artigas, 2009). Mas, embora todo conhecimento comece com a experiência, não se esgota nela, pois as sensações constituem apenas a matéria-prima do conhecimento, e é o sujeito cognoscente o responsável pela organização estrutural e funcional dessa matéria (Llano, 2004). Assim, ele propôs que o conhecimento se processa em três etapas: 1) as “sensações” são ordenadas em relação ao espaço e ao tempo; 2) assim ordenadas formam as “percepções”, que se relacionam por meio de doze categorias de entendimento, tais como unidade, substancialidade, causalidade e contingência; 3) Desse processo surgem os “juízos da experiência”, que se organizam em um sistema único de conhecimento, graças aos princípios reguladores da razão, que prescrevem certas regras ao entendimento (Losee, 1981).

Então, pode-se dizer que ele fez uma síntese das duas posições. Ao afirmar que é por meio da sensibilidade que vivenciamos o objeto, ele se aproximou do empirismo, e ao apontar que é a compreensão que nos permite pensar sobre ele, ele se aproximou do racionalismo. Nem o entendimento pode intuir nada, nem os sentidos podem pensar nada (Losee, 1981). Além disso, as coisas existem “em si mesmas” e contribuem para a experiência, mas são distintas dos objetos da experiência. Segundo Hirschberger (2012), “Nem o subjetivismo de Kant é individualista, nem o seu idealismo significa negação do mundo externo ou renúncia à objetividade” (p. 136, tradução própria).

Dentre as diversas considerações da filosofia kantiana, é pertinente destacar duas delas. Por um lado, o reconhecimento do uso de idealizações em teorias científicas, por exemplo, no caso da organização sistemática de leis empíricas que é facilitada por simplificações conceituais, como o uso do conceito “água pura”, que não é inferido de fenômenos químicos, mas que facilita sua explicação. Deste ponto de vista, para Kant, o empirismo ingênuo não é uma base conceitual suficiente para a ciência. Por outro lado, é interessante destacar o pessimismo de Kant quanto a uma interpretação causal dos processos biológicos, dada sua concepção de organismo vivo, em que há uma relação recíproca entre a parte e o todo, de modo que cada parte se relaciona com o todo ao mesmo tempo como causa e como efeito e, portanto, não pode ser totalmente explicada por leis causais (Losee, 1981). Essas visões aparecem em diferentes abordagens de Bohr.

Com Kant, a filosofia alemã havia alcançado uma construção homogênea e única na história, mas, nas primeiras décadas do século XIX, surgiram inúmeras novas posições entre os extremos do apriorismo idealista e do empirismo positivista, que pretendiam ser originais, embora boa parte de seu material fosse tomado justamente da filosofia kantiana, dificultando destacar o que era decisivo em cada caso. Dentre essas correntes, destacam-se o materialismo, o positivismo, o utilitarismo, o pragmatismo, o realismo, o fenomenalismo e o neokantismo (Hirschberger, 2012).

Muitas dessas correntes enfatizam nos fenômenos, perceptíveis e verificáveis, descartando os aspectos metafísicos impregnados no racionalismo. De certa forma, foi como um retorno ao empirismo inglês, com nuances diferentes, experimentando pela experiência o que Kant buscava com seu critério de síntese a priori (Fellowes, 2025). Por isso, Hirschberger (2012) os agrupa como fenomenalistas. Por exemplo, Auguste Comte (1798-1857) considerava que a única base segura do conhecimento científico eram os dados positivos, manifestos e perceptíveis, que mostrassem a realidade do mundo. Portanto, o mundo deve ter uma ordem natural para ser descoberta através do método científico. Nesse sentido, esse movimento filosófico, conhecido como positivista, defendia a objetividade e a causalidade. Para John Stuart Mill (1806-1873), no entanto, não há nada além da percepção do momento, sem essências objetivas, de modo que a ciência não tem escolha a não ser apresentar material da experiência e usá-lo para obter leis científicas a partir de regras indutivas (Hirschberger, 2012).

No pragmatismo, os fenômenos também são reconhecidos, mas para além da mera descrição e sem submetê-los ao exame crítico operado pela lógica. Em vez disso, coloca-os no plano de utilidade para o homem. É uma filosofia prática originária das ideias do neokantismo, onde o conhecimento objetivo seria possível e sua verdade seria definida em termos funcionais, de necessidade, de desejo humano. Ou seja, é a conexão entre conhecer o significado de uma hipótese e suas consequências, de modo que declarações de uma verdade predicada atribuem a propriedade de utilidade para acreditar em tal declaração. Ou, nas palavras de Charles Pierce (1839-1914), nossa ideia de algo é nossa ideia de seus efeitos sensíveis (Davini, 2020). Além disso, os pragmáticos rejeitam a reificação de conceitos e teorias, pois atribuem um caráter nominal às diferentes categorias. Entre seus representantes do século XIX estão Ch. Pierce, William James (1842-1910) e John Dewey (1859-1952) (Hirschberger, 2012).

Da mesma forma, houve quem retomasse as ideias de Kant diante do excessivo empirismo e da falta de crítica de algumas das novas correntes, dando origem ao neokantismo, que foi um movimento filosófico muito influente na Europa até as duas primeiras décadas do século XX, com suas múltiplas variantes. Esses filósofos, seguindo a tradição kantiana,

sustentavam que o conhecimento científico não depende da reflexão de um mundo independente da mente, uma vez que as coisas em si são diferentes de como nos parecem. Na verdade, qualquer padrão de verdade que usarmos envolverá nossas faculdades mentais, já que não sabemos nada fora delas. Na segunda década do século XX, o trabalho de Einstein trouxe problemas ao neokantismo ao mostrar que a física de Newton não estava correta. Enquanto a fenomenologia transcendental e o positivismo lógico ganharam popularidade (Fellowes, 2025).

Segundo o kantismo, a realidade era a síntese dos dados sensíveis no conceito. Mas no início do século XX, os filósofos, principalmente Edmund Husserl (1859-1938), retornaram ao objeto por meio da fenomenologia transcendental, que surgiu como uma novidade na filosofia, opondo-se ao positivismo e a toda ciência sem sujeito, argumentando que não faz sentido observar o ser e eliminar a intenção e a intencionalidade do observador: “A razão se limita quando considera como verdadeiro apenas o que é verificável, independentemente de quem e como serve; a razão se confina, se limita quando não mostra, nem quer mostrar, sua perspectiva humana, social e histórica” (Bolio, 2012, p. 21, tradução própria).

O objetivo da fenomenologia era descrever como as coisas se apresentam na subjetividade, determinando suas estruturas essenciais. Husserl acreditava que a filosofia deveria buscar a verdade objetiva no conhecimento de um fenômeno, onde a noção de objetividade está necessariamente ligada à possibilidade de ser vivenciada por uma comunidade intersubjetiva. Por sua vez, o fenômeno concebido por Husserl era como a doação imediata do objeto, sem separação entre mundo e consciência como duas realidades independentes, uma nova maneira de descrever o mundo sem cair na subjetividade. O pensamento objetivo como tal constitui um elo essencial que tem uma necessidade que reside em si mesmo, que tem uma estrutura. Essas essências são intuídas por meio da redução fenomenológica, que nos permite superar o factual para apreender o essencial, não apenas como o universal, mas como a ideia válida em si mesma, objetiva e intencional (Guamanga, 2016).

Essas ideias, brevemente delineadas, são encontradas de uma forma ou de outra nas várias abordagens de Bohr, pois fazem parte do contexto histórico em que Bohr desenvolveu suas ideias, embora não haja consenso entre os estudiosos sobre essa influência. No entanto, o contato de Bohr com o filósofo Harald Høffding (1843-1931) é inegável, e ele pode ser considerado o transmissor dessas ideias (Cockcroft, 1963). Em particular, as ideias de: Søren Kierkegaard (1813-1855), que enfatiza a importância da subjetividade e a natureza paradoxal da realidade. Émile Boutroux (1845-1921) com sua filosofia de contingência e a ideia de que padrões possíveis na natureza não implicam determinismo. Charles Bernard Renouvier (1815-1903) que critica a noção de causalidade determinística e levanta a contingência da natureza.

Ernest Mach (1838-1916), que criticou o espaço e o tempo absolutos e propôs o princípio da economia de pensamento baseado na experiência sem especulação metafísica. E Kant, que levanta a impossibilidade de conhecer a realidade em si mesma, apenas como ela nos aparece (Calvo, 2017).

3.2 CONTEXTO FAMILIAR

De acordo com Pais (1993), o tataravô de Niels, Christian Baar, nasceu em 1741 e teve nove filhos, incluindo Christian Fredrik Gottfred Bohr¹² e Peter Goerg Bohr. Christian Fredrik estudou na Universidade de Copenhague, mas desistiu por razões financeiras e se mudou para a Noruega, onde lecionou ciências e música. Apesar disso, suas habilidades científicas lhe permitiram manter contato com cientistas em Berlim, Londres, Paris, Estocolmo e Copenhague. Assim, em 29 de março de 1819, ele foi aceito como membro da Real Academia Norueguesa de Ciências e Letras, e em 24 de fevereiro de 1824, membro da Real Academia Sueca de Ciências. Christian Fredrik iniciou “a principal tradição Bohr: devoção ao aprendizado e ao ensino”. (Pais, 1993, p. 33). Sua preocupação com o analfabetismo dos artesãos o levou a fundar uma escola dominical em Bergen, para o ensino de leitura, escrita e aritmética, e uma escola para meninas pobres que as preparava para o trabalho em ofícios domésticos.

Peter Goerg, mais novo que Christian Fredrik, era o bisavô de Niels Bohr. Ele estudou teologia e ocupou vários cargos de ensino na Dinamarca e na Noruega, tornando-se reitor da Laerde Skole em Rønne em 1818. Ele escreveu vários artigos sobre pedagogia e, em 1836, um ensaio sobre os últimos trezentos anos da Dinamarca, por ocasião do 330º aniversário da fundação do país como um estado luterano. Ele teve quatro filhos, todos teólogos, e duas filhas. O mais velho, Henrik Georg Christian Bohr, avô de Niels Bohr, ensinou latim, história e geografia no Instituto von Westenske em Copenhague, onde se tornou reitor. Ele também publicou vários livros didáticos para o ensino médio e uma biografia de Tordenskjold, o herói naval norueguês/dinamarquês (Pais, 1993).

Em 1840, Henrik Georg casou-se com Augusta, filha de um juiz. Eles tiveram 7 filhos, o mais novo dos quais, Christian Bohr, nasceu em 1855 e era pai de Niels Bohr. Christian foi o primeiro ancestral de Niels a nascer em Copenhague, o primeiro a obter um doutorado e o primeiro a buscar carreira na Universidade de Copenhague, onde se tornou professor em 1881

¹² Es posible que el cambio de Baar a Bohr, tuviera su origen en la pronunciación “aa” como “oh” en danés. (Pais, 1993).

e reitor de 1905 a 1906. Além de fisiologista, ele também tinha bons conhecimentos de física e matemática. Em 1885, ele foi premiado com a medalha de prata da Academia Real Dinamarquesa de Ciências por sua pesquisa sobre o desvio do oxigênio da lei de Boyle-Mariotte em baixas pressões. Ele também descobriu a influência do CO₂ na liberação de oxigênio pela hemoglobina, hoje conhecido como “efeito Bohr”. Por seu trabalho sobre a fisiologia da respiração, ele foi indicado ao Prêmio Nobel de Fisiologia ou Medicina. Seu espírito amigável, sensível, modesto e disposto se reflete em seu apoio contínuo aos alunos, incluindo publicações conjuntas (Pais, 1993).

Em 1875, as mulheres dinamarquesas foram autorizadas a continuar os estudos universitários. Foi nessas circunstâncias que Christian Bohr conheceu Ellen Adler (1860-1930), futura mãe de Niels Bohr. A ascendência de Ellen Adler era judaica e ela tinha uma notável tradição comercial e financeira na Dinamarca. De fato, com a Constituição de 1849, os direitos civis dos judeus foram reivindicados e a participação judaica na ciência, literatura, jornalismo e política se tornou proeminente. Hanna Adler (1859-1947), irmã de Ellen, foi uma das primeiras mulheres a obter um mestrado em física, em 1892, e foi pioneira na Dinamarca na defesa da educação mista, fundando sua própria escola, a "Hanna Adler's Faellesskole", que mais tarde foi administrada pela cidade. Ele também estava interessado na situação dos negros na América. Aos 84 anos, ela foi capturada pelos alemães durante a Segunda Guerra Mundial, mas foi libertada a pedido das autoridades dinamarquesas (Pais, 1993).

Ellen Adler e Christian Bohr casaram-se no civil e tiveram três filhos: Jenny Bohr, nascida em 9 de março de 1883; Niels Henrik David Bohr, nascido em 7 de outubro de 1885; e Harald Bohr, nascido em 22 de abril de 1887. Nesses dias, em fevereiro de 1886, Christian foi eleito para uma vaga na universidade (Pais, 1993). O ambiente familiar era progressista, liberal e intelectual, consequentemente, a família vivia num ambiente agradável e compreensivo (Strathern, 1999) o que pode ser considerado estimulante para o desenvolvimento harmonioso das crianças. Christian era um acadêmico proeminente que estava perto de ganhar um Prêmio Nobel e Ellen era gentil, altruísta, proativa e determinada. Como boa leitora, ela era lúcida e transmitiu essa virtude aos filhos. Ellen Adler faleceu em 30 de novembro de 1930, vítima de câncer. Christian Bohr faleceu em 3 de fevereiro de 1911 (Pais, 1993).

A irmã de Niels, Jenny, teve muitos problemas de saúde ao longo de sua vida que, no entanto, não a impediram de estudar história na Universidade de Copenhague e fazer cursos de inglês em Oxford. Dado seu interesse permanente em ensinar, ele foi capaz de dar aulas particulares por alguns anos e, em 1916, ensinou história e dinamarquês na escola de Hanna Adler e em uma escola em Helsingør. Ela morreu em 5 de maio de 1933, depois de sofrer um

colapso nervoso devido à morte de sua mãe (pais, 1993). Por sua parte, Harald Bohr se tornou um excelente matemático e foi uma figura central na vida de Niels, como amigo, par acadêmico e confidente. Os irmãos inspiraram um ao outro em direção ao seu pleno potencial intelectual (Strathern, 1999).

Segundo Pais (1993), o pai de Niels expressou: "Eu sou prata, mas Niels é ouro", (p. 44). Desde tenra idade, Niels mostrou suas habilidades cognitivas, suas habilidades para reparar artefatos e sua liderança no desenvolvimento de uma tarefa (pais, 1993). No entanto, em sua vida escolar, ele teve dificuldade em medir as consequências de suas ações, que não afetaram seu caráter meticuloso ou suas habilidades científicas, nem seu interesse em história e filosofia. Na verdade, ele sempre foi um bom leitor, apaixonado por arte e literatura, e admirava profundamente Johann von Goethe (1749-1832) e Friedrich Schiller (1759-1805). Esse hábito saudável lhe proporcionou os elementos de discernimento necessários para sustentar suas visões críticas sobre o que lia, por isso, ainda jovem estudante, chegou a dizer que determinado fenômeno apresentado em um livro de física deveria ser interpretado de forma diferente (Strathern, 1999).

Bohr se formou como físico em 1907 na Universidade de Copenhague. Naquele ano, ainda estudante, ganhou a medalha de ouro da *Royal Danish Academy of Sciences* por um trabalho sobre tensão superficial, publicado em 1909. Em seus primeiros anos de universidade, ele era membro do *Ekliptika Circle*, onde foram discutidas questões de ciência e filosofia (Strathern, 1999). Ele também participou das conferências do filósofo Harald Høffding que lidavam com a filosofia moderna (Cockcroft, 1963) e que provavelmente influenciaram sua formulação do princípio da complementaridade e seu pensamento filosófico. Da mesma forma, ele tinha um enorme interesse em grandes figuras religiosas do passado, como aponta Rosenfeld (*apud* Cockcroft, 1963):

Nesses textos sagrados, oriundos dos recônditos mais íntimos da alma humana, ele leu um esforço para explicar, em uma linguagem peculiar, aquela complementariedade mais profunda entre o conhecimento racional e a experiência viva do cosmos, que, a seu ver, caracterizava a posição ambígua do homem e regula toda a sua atividade (p. 37, tradução própria).

Bohr admirava Christian Christiansen, que era o único professor de física na universidade, e apreciava que ele tivesse sido seu diretor e guia em sua passagem pela universidade, incluindo seu domínio e doutorado. O manuscrito do trabalho do mestre, que teve que entregar em junho de 1909, cujo tema, "Aplicação da teoria dos elétrons para a explicação das propriedades físicas dos metais", havia sido designada por Christiansen, foi preparada por

Ellen Adler, dada as dificuldades de Bohr com a escrita (Aaserund; Heilbron, 2013). De qualquer forma, Bohr sempre contou com “caixas de ressonância” para o desenvolvimento de suas ideias teóricas: seus pais, seu irmão, sua esposa e os colegas mais jovens que frequentavam seu Instituto (Slottved e Tamm, 2009). Finalmente, ele se formou em 2 de dezembro de 1909, no mesmo ano em que conheceu sua futura esposa, Margrethe Nørlund, irmã de Niels Erik e Poul Nørlund, amigos de Niels do *Ekliptika Circle* (Aaserund; Heilbron, 2013).

Nos dias da morte de Bohr, seu amigo, Richard Courant (1888-1972), comentou sobre seus sucessos:

Acho que os ingredientes de sua vida não foram de forma alguma ditados pelo acaso, mas estavam profundamente enraizados na estrutura de sua personalidade... não foi sorte, mas uma intuição profunda que o levou a encontrar em sua juventude sua esposa, que, como todos sabemos, como todos sabemos, torna toda a sua atividade científica e pessoal possível e harmoniosa.” (Pais, 1993, p. 112, tradução própria).

3.3 BOHR, O CIENTISTA

Desde a infância, Bohr aprendera sobre ciência e filosofia por meio de discussões acadêmicas realizadas em casa, frequentadas, entre outros, por Christian Christiansen, Harald Høffding e o linguista Vilhelm Thomsen (1842-1927). Os irmãos, Niels e Harald, foram autorizados a participar dessas reuniões e, a partir de então, Niels começou a pensar por si mesmo, o que motivou seu pensamento filosófico original (Strathern, 1999). Assim, para sua tese de doutorado, sem interlocutores na Dinamarca, ele teve que criticar as leituras, encontrando erros em obras de Joseph Thomson e Poincaré. Ele também leu dois artigos de Einstein de 1909, que continham os germes do conceito de complementaridade, e parece ter se familiarizado com o trabalho de Planck sobre radiação de corpo negro (Pais, 1993).

Sua tese de doutorado, uma versão mais elaborada de sua dissertação de mestrado, "Estudos sobre a Teoria Eletrônica dos Metais", foi aceita em 12 de abril de 1911 e defendida em 13 de maio. Niels enviou uma cópia de seu trabalho a Hendrik Lorentz, Max Planck, Henri Poincaré e John William Strutt (1842-1919), conhecido como Lord Rayleigh, todos referenciados em sua tese. Nenhum deles respondeu, presumivelmente porque a tese foi escrita em dinamarquês. De fato, as tentativas de traduzir sua tese para o inglês não tiveram sucesso; somente após sua morte uma tradução adequada ficou disponível (Pais, 1993).

Nessa tese, Bohr destacou as deficiências da teoria dos elétrons nos metais, iniciando assim o caminho que o levaria às suas extraordinárias propostas. Suas preocupações o levaram

à fonte do estudo dos elétrons: o Laboratório Cavendish, em Cambridge, dirigido por J. J. Thomson (Strathern, 1999). Assim, em junho de 1911, Bohr escreveu à Fundação Carlsberg solicitando uma bolsa de estudos no exterior, que foi aprovada. Em julho, ele informou Thomson de sua intenção de pesquisar no Laboratório Cavendish. Em 2 de outubro, chegou a Cambridge, levando consigo uma tradução imperfeita de sua tese. Dadas suas dificuldades com o idioma e seu espírito persistente, ele se dedicou a aprender inglês, lendo Charles Dickens (1812-1870), William Shakespeare (1564-1616) y Mark Twain (1835-1910) (Spangenburg; Moser, 2008)

Ele saiu de seu primeiro encontro com Thomson em outubro muito encorajado; no entanto, os dias seguintes foram decepcionantes, pois Thomson prestou pouca atenção às suas ideias e nem leu sua tese. Em vez disso, propôs a Bohr que experimentassem com raios positivos, um projeto que Bohr considerou pouco promissor e, de fato, não funcionou como esperado. Mesmo assim, sua intenção era concluir a pesquisa encomendada por Thomson antes de 14 de dezembro de 1911, a fim de ter tempo para se dedicar à física teórica no primeiro triênio de 1912 (Spangenburg; Moser, 2008).

Bohr conhecia o trabalho de Rutherford sobre radioatividade e buscava uma oportunidade de se mudar de Cambridge para Manchester. Assim, em novembro de 1911, decidiu visitar James Lorrain Smith (1862-1931), que o apresentou a Rutherford. Os dois se deram bem imediatamente, inspirando Bohr a comparecer ao Jantar Anual dos Estudantes de Pesquisa Cavendish em dezembro de 1911, onde Rutherford apresentou o trabalho de Charles Thomson Wilson (1869-1959) com a câmara de nuvens. Bohr ficou impressionado com o entusiasmo de Rutherford, que o convidou para se juntar à equipe em Manchester (Spangenburg; Moser, 2008).

No final de dezembro de 1911, Harald Bohr visitou Niels em Cambridge e, juntos, viajaram para Londres no início de janeiro, período em que compartilharam seus planos para o futuro imediato, incluindo a continuação dos estudos de Niels no Manchester. Consequentemente, em 18 de janeiro de 1912, Bohr escreveu a Lorrain Smith sobre seus planos de viajar no final de março para trabalhar com Rutherford. De fato, na segunda quinzena de março de 1912, um ano após Rutherford ter proposto um modelo atômico para explicar os experimentos Geiger-Marsden, Bohr já estava em Manchester, participando de um curso de oito semanas sobre métodos experimentais em radioatividade, organizado por Hans Geiger (1882-1945) (Aaserund; Heilbron, 2013). Após o curso, Rutherford o encarregou de estudar a absorção de partículas alfa no alumínio. Nos dias seguintes, ele escreveu ao seu irmão, Harald,

que Rutherford era um homem que inspirava confiança, que frequentemente perguntava sobre o curso dos acontecimentos e seus mínimos detalhes (Spangenburg; Moser, 2008).

Bohr chegou ao laboratório de Rutherford interessado em problemas teóricos. Ele rapidamente se envolve com eles, como a possível explicação das propriedades dos elementos com base na carga nuclear, não da massa atômica como se acreditava até então, assunto que discutiu com George de Hevesy (1885-1966), que, mostrou evidências em 1912 de que o decaimento alfa de um elemento o move dois números para baixo na tabela periódica, enquanto o decaimento beta o move um número para cima. Isso apoiou a hipótese de Bohr. O conhecimento radioquímico de Hevesy acabou sendo exatamente o que Bohr precisava para trabalhos futuros (Cockcroft, 1963). É interessante notar aqui a influência da filosofia nas atitudes dos cientistas: o empirismo inglês sobre Rutherford o levou a exigir evidências experimentais e a ser cético em relação aos teóricos, enquanto as influências alemã e francesa sobre Bohr o levaram a análises lógicas rigorosas, construindo teoria sobre teoria (Strathern, 1999). Quando Bohr lhe apresentou os resultados de seus cálculos sobre o modelo atômico nuclear, Rutherford pensou que faltavam evidências (Spangenburg; Moser, 2008).

O problema teórico mais fascinante para Bohr foi a constituição eletrônica do modelo atômico de Rutherford. Enquanto aguardava um pouco de rádio para novos experimentos sobre espalhamento de partículas alfa, ele leu o artigo de Charles G. Darwin (1887;1962) sobre a perda de energia de partículas alfa que atravessam um material sem espalhamento. Nele, Darwin formulou a hipótese de que as perdas eram devidas a interações com elétrons livres. Para Bohr, a proposta de Darwin era conceitualmente insatisfatória e apresentava dificuldades matemáticas, visto que ele já estava concebendo o novo modelo atômico (Spangenburg; Moser, 2008), no qual recorria ao quantum de ação. De qualquer forma, Bohr apoiou suas conjecturas em evidências experimentais, como os resultados de Richard Whiddington (1885-1970) sobre a excitação de raios X característicos por bombardeio de elétrons, que poderiam estar relacionados à energia de ligação de elétrons girando em torno de um núcleo com uma carga dada pelo número atômico. Bem como as evidências experimentais fornecidas pelo trabalho de Rydberg sobre a série espectral, com o qual ele estava dando maior clareza às suas ideias (Cockcroft, 1963).

Em maio de 1912, Niels escreveu a Margrethe: “Pode ser muito tolo e não significar absolutamente nada, como sempre; mas acho que talvez tenha encontrado algo” (*apud* Aaserund; Heilbron, 2013, p. 85), e, na mesma carta, ele revela o quão dependente seria de Margrethe pelo resto de sua vida: “pois anseio além das palavras pelo momento em que você acompanhará meus pensamentos e os fará crescer para mim” (*apud* Aaserund; Heilbron, 2013,

p. 85). Em 12 de junho, ele escreveu a ela novamente: “Talvez eu não esteja tão mal no momento, porque talvez algo tenha acontecido afinal, e eu já elaborei quase completamente uma pequena teoria sobre a absorção de raios alfa” (*apud* Aaserund; Heilbron, 2013, p. 86). E ele escreveu ao seu irmão Harald que poderia ter uma teoria que desse pistas sobre a estrutura dos átomos. Acredita-se que este tenha sido o momento em que Niels voltou sua atenção para a estrutura atômica (Aaserund; Heilbron, 2013).

Em 25 de junho de 1912, ele escreveu a Ellen que Augustine Owen (1887-1973), talvez o único amigo que fez em Cambridge, se tinha oferecido para ajudar a escrever o artigo a ser publicado em inglês. Mas, o 29 de junho, ele escreveu novamente a Ellen sobre o artigo: “Parece que descobri uma variedade de pequenas coisas que estão interligadas de forma tão intrincada que talvez eu tenha que esperar até poder publicar vários artigos pequenos de uma só vez” (Aaserund; Heilbron, p. 89, 2013, tradução própria). A partir de 29 de junho de 1912, ele escreveu inúmeras cartas a Margrethe, o que sugere que ele estava engajado em sua própria teorização e na relação entre seu trabalho e Margrethe: “Ouso dizer que acho que descobri bastante; mas anseio por toda a sua ajuda, minha querida, e por toda a sua indescritível gentileza” (Aaserund; Heilbron, 2013, p. 90). Em 2 de julho, Niels escreve para Margrethe marcando o dia 1º de agosto de 1912 para o casamento (Aaserund; Heilbron, 2013).

Segundo Aaserund e Heilbron (2013), o período de 1911 a 1912, entre seu noivado e casamento com Margrethe Nørlund, deu origem a uma extensa correspondência entre os dois e foi decisivo na vida científica de Niels. Ele escreveu a Margrethe sobre suas expectativas desde o momento em que deixou a Dinamarca até seus primeiros dias em Cambridge, depois sobre suas frustrações com Thomson e sua busca por refúgio na leitura de C. Dickens e, finalmente, sobre seus sucessos em Manchester, onde se destacou por suas contribuições e apoio a toda a equipe de pesquisa do laboratório, que reconhecia sua modéstia e disposição para contribuir com ideias e soluções (Cockcroft, 1963). A importância de Margrethe para o cientista deriva do fato de ela ser sua caixa de ressonância, atenta a seus modos de raciocínio e procedimento científico; mais do que sua caneta, ela era a pessoa que lhe proporcionava a paz de espírito necessária para organizar suas ideias. (Aaserund; Heilbron, 2013).

Bohr sempre expressou que a sua alma estava sob a proteção de Margrethe, cuja alma era tão rica que podia pagar a pobreza da sua. Essa unidade foi um dos fatores que permitiu a ele clarificar seus pensamentos, apoiado por uma sólida relação de amor, afeição e respeito mútuo, e, assim, o desenvolvimento e a escrita de suas publicações, apesar da formação limitada dela em física. De fato, físicos que passaram pelo Instituto de Física de Bohr se referiam a Margrethe como o centro da atmosfera familiar ali (Aaserund; Heilbron, 2013) e, lembrando

as palavras de Richard Courant sobre Margrethe: "...ela desempenhou um papel decisivo em tornar toda a sua atividade científica e pessoal possível e harmoniosa..." (*apud* Pais, 1993, p. 112, tradução própria).

Em 2 de agosto de 1912, o casal iniciou sua lua de mel, alterando a rota planejada para Cambridge e Manchester, provavelmente devido à urgência de entregar a Rutherford o manuscrito do artigo sobre o poder de frenagem dos materiais, um projeto de pesquisa confiado a Bohr (Cockcroft, 1963). Assim, em 17 de agosto de 1912, Bohr escreveu a Ellen de Manchester, indicando que, com a ajuda de Margrethe, eles haviam dado os retoques finais ao artigo. De volta a Copenhague, no final de agosto, Bohr retornou ao problema da estabilidade do átomo, além das palestras e do trabalho experimental com Martin Knudsen (1871-1949)

Ele escreveu a Rutherford diversas vezes, indicando a evolução de suas ideias até 6 de março de 1913, quando lhe enviou a primeira parte de seu artigo *On the Constitution of Atoms and Molecules*, no qual fez uma interpretação do espectro do hidrogênio, incluindo o cálculo da constante de Rydberg (Cockcroft, 1963). Devido a algumas críticas de Rutherford, em 2 de abril de 1913, Bohr estava em Manchester, defendendo a primeira parte de sua trilogia. Depois, ele escreveu a Margrethe dizendo que o artigo estava sendo digitado, mas que desejava voltar para casa para contar com sua ajuda na criação das outras partes da obra. O entusiasmo de ambos em trabalhar juntos era mútuo. (Aaserund; Heilbron, 2013).

Em junho de 1913, ele retornou a Manchester com a segunda parte de seu trabalho, *Systems containing only a single nucleus*, que foi publicado em setembro de 1913. Lá, ele abordou a origem da radiação Barkla característica e o estado fundamental dos átomos de muitos elétrons, organizando elétrons em anéis, semelhante à estrutura proposta por Thomson. Em setembro do mesmo ano, ele retornou à Inglaterra para a reunião da Associação Britânica, com a presença de Rayleigh, Joseph Larmor (1857-1942), Lorentz, Rutherford e James Jeans (1877-1946), que fez uma introdução às aplicações da teoria quântica à composição atômica. Em 23 de setembro, G. Hevesy disse a Bohr que Einstein considerava sua teoria atômica interessante e importante se ela se provasse correta. Na mesma época, Johannes Stark (1874-1957) descobriu a divisão de linhas espectrais pela ação de um campo elétrico, então Rutherford apontou para Bohr a necessidade de explicar esse fenômeno de acordo com sua teoria. Em novembro de 1913, a terceira parte do artigo, *Systems containing several nuclei*, foi publicada na mesma revista. No início de 1914, Henry Moseley (1887-1915) escreveu a Rutherford sobre seu interesse em ajudar a refutar a visão generalizada de que o trabalho de Bohr era meramente uma manipulação de números (Cockcroft, 1963).

Na época de seu casamento, o futuro de Bohr em Copenhague era incerto. Ele não tinha chance de se tornar professor na Universidade, já que a instituição aspirava contratar um professor com habilidades experimentais, não um com um perfil teórico como o de Bohr. No entanto, ele tinha toda a intenção de permanecer em Copenhague e estava disposto a esperar por uma oportunidade na Universidade (Spangenburg; Moser, 2008). Felizmente, ele contou com a ajuda de seu irmão Harald e sua tia Hanna. Ela sabia da aposentadoria de Christiansen em setembro de 1912 e havia trocado algumas palavras com o influente magnata Gustav Adolph Hagemann (1827-1897), que era a favor da abertura de duas cadeiras de física após a saída de Christiansen. Harald, por sua vez, constantemente encorajou Bohr, manteve vários contatos e o aconselhou a viajar para Copenhague em janeiro de 1912 para mostrar seu trabalho e suas habilidades de oratória.

Em 29 de março de 1913, surgiu a possibilidade de Bohr ser nomeado professor assistente, pois a Faculdade recomendou à Universidade que ela fosse preenchida pelo Dr. Niels Bohr. Após algumas dificuldades, o Ministério da Educação garantiu financiamento para a cátedra associada e, em 18 de julho de 1913, nomeou o Dr. Niels Bohr, com efeitos retroativos a 1º de abril de 1913 (Aaserund; Heilbron, 2013). Depois, a publicação de seus artigos lhe garantiu definitivamente uma cátedra na Universidade. Em junho de 1914, Rutherford o convidou para substituir Darwin como leitor em Manchester, já que o grupo havia sido quase completamente dissolvido devido à guerra (Cockcroft, 1963). Nesse ano, Bohr lançou sua campanha pela cátedra de física teórica na Universidade de Copenhague, que passou a dirigir dois anos depois. Em 1917, iniciou seu projeto de estabelecer o Instituto de Física Teórica, que progrediu rapidamente graças principalmente a doações privadas. O Instituto foi inaugurado em 1921, perante a elite política e científica dinamarquesa, onde ficou claro que os experimentos seriam cruciais para testar as teorias propostas. (Slottved; Tamn, 2009).

Na década de 1920, Bohr já era reconhecido nos círculos científicos de todo o mundo, além de um herói em seu próprio país. Graças ao seu Instituto, que dirigiu até sua morte em 1962, é considerado o fundador da física moderna na Dinamarca e um dos desenvolvedores da mecânica quântica. Em 1921, ganhou a Medalha Hughes da Royal Society e, em 10 de dezembro de 1922, recebeu o Prêmio Nobel de Física. O Instituto logo se tornou o centro mundial da física atômica, onde Bohr dedicou tempo tanto a atividades administrativas quanto de pesquisa, demonstrando seu talento incansável (Pais, 1993). Dadas as inimizades persistentes que surgiram durante a Primeira Guerra Mundial e a neutralidade mantida pela Dinamarca, o Instituto tornou-se um refúgio onde cientistas podiam se reunir em um ambiente pacífico, independentemente de sua nacionalidade ou convicções políticas (Slottved; Tamn,

2009), o que permitiu a publicação de quase 1.200 artigos e a realização de conferências internacionais entre 1929 e 1938 (Pais, 1993).

Essa cooperação de físicos teóricos, sob o "espírito de Copenhague" marcado por Bohr, que pode ter sido influenciado pelo estilo de Rutherford em Manchester, permitiu uma generalização logicamente consistente da mecânica quântica (Slottved; Tamn, 2009). Em 1922, G. Hevesy e Dirk Coster (1889-1950) eram membros do Instituto; seus experimentos mostraram que o elemento químico 72 tinha propriedades consistentes com a teoria de Bohr. Esse elemento foi denominado Háfnio, que significa Copenhague em latim. Entre 1924 e 1927, Heisenberg foi membro do Instituto quando propôs sua mecânica matricial, de cujas discussões com Bohr surgiu o princípio da incerteza. Esses desenvolvimentos foram denominados Interpretação de Copenhague¹³, que enfatiza o princípio da complementaridade, segundo o qual fenômenos físicos no nível atômico se manifestam de maneiras diferentes e aparentemente contraditórias, dependendo da estrutura experimental de observação (Spangenburg; Moser, 2008).

A década de 1930 foi marcada por alguns eventos infelizes para Bohr. A morte de sua mãe e irmã, o suicídio de seu amigo Paul Ehrenfest (1880-1933), a morte de Rutherford durante uma cirurgia e, sua maior tristeza, a morte de seu filho mais velho em um acidente de barco. Além disso, ele ficou chocado com o ódio de amigos e colegas na Alemanha nazista e na Áustria. No entanto, ele teve o caráter necessário para assumir a presidência da Sociedade Dinamarquesa de Combate ao Câncer (1935) e da Academia Real Dinamarquesa de Ciências e Letras (1939) (Spangenburg; Moser, 2008). Foi também uma década em que realizou diversas viagens a países como Estados Unidos, Japão, China e URSS (Wang, L.; Yang, J., 2016).

Em 9 de abril de 1940, as forças nazistas invadiram a Dinamarca. Bohr conseguiu permanecer à frente de seu Instituto até setembro de 1943, quando teve que fugir com sua família para a Suécia. No outono de 1941, ele foi visitado por Heisenberg em um encontro desagradável. No início de 1943, ele recebeu uma carta dos ingleses para se juntar aos Aliados, uma proposta que Bohr não aceitou. Ele passou uma semana na Suécia e foi levado para Londres, onde foi informado de um projeto anglo-americano para produzir bombas atômicas que estava em andamento, embora sem resultados até então. Foi surpreendente para ele saber o quanto isso havia evoluído, porque ele não tinha certeza da aplicação prática dos processos de

¹³ Na verdade, não se trata de uma única interpretação da mecânica quântica, embora seja verdade que esteja ligada à profunda compreensão de Bohr sobre como a mecânica quântica aborda a descrição da natureza (Howard, 2004).

fissão. De qualquer forma, eles o convidaram para se juntar ao projeto como consultor, e ele aceitou, embora seu papel fosse secundário (Blaedel, 1988).

Desde o final de 1943, Bohr estava comprometido com o clima político do pós-guerra que previa como resultado do desenvolvimento de novas armas. Ele acreditava que estas prometiam melhorias nas relações internacionais, justamente por sua ameaça à segurança das nações. Nessa perspectiva, ele acreditava que consultas imediatas com os soviéticos sobre o assunto eram necessárias, pois o adiamento dessa reunião poderia gerar séria desconfiança com consequências potencialmente graves. Como um bom líder, em 1944, ele conseguiu se reunir com W. Churchill (1874-1965) em 16 de maio e com Franklin D. Roosevelt (1882-1945) em 26 de agosto, infelizmente com resultados negativos (Cockcroft, 1963).

Em 1947, Bohr recebeu a mais alta distinção da Dinamarca, o título de Cavaleiro da Ordem do Elefante. Ao escolher seu brasão, utilizou o símbolo *Yin-Yang* e acrescentou a frase "Contraria sunt complemento" (Blaedel, 1988), que resume sua filosofia. De volta à Dinamarca, continuou seus esforços para promover um mundo aberto. Assim, na primavera de 1948, tentou em vão convencer o Secretário de Estado dos EEUU, George Marshall (1880-1959), da importância de sua iniciativa. Depois disso, decidiu levar seu apelo ao público em geral por meio de uma carta aberta à ONU em 9 de junho de 1950, duas semanas antes da Guerra da Coreia. Em novembro de 1956, enviou uma segunda carta à ONU, novamente sem grande resposta (Cockcroft, 1963).

Assim, no período pós-guerra, a pesquisa de Bohr tornou-se escassa. Seu último avanço rumo às fronteiras da física remonta à década de 1930, concernente aos fundamentos da eletrodinâmica quântica. Ele não participou do desenvolvimento da física de partículas, que começava a florescer em meados do século XX. Em vez disso, publicou extensivamente em seus últimos anos sobre complementaridade dentro e além da física. Seus esforços foram dedicados à questão da *glasnost* e ao estabelecimento de novas instituições como o CERN (Comitê Europeu de Pesquisa Nuclear), Nordita, Laboratório Nacional de Risø e uma nova filial de seu Instituto, também localizada em Risø. Na década de 1950, ele também fez várias viagens aos Estados Unidos, Israel, Islândia, Groenlândia, Índia e URSS. Em junho de 1962, sofreu uma pequena hemorragia cerebral da qual pareceu se recuperar. Em novembro, morreu em sua casa de insuficiência cardíaca; ele tinha 77 anos. A partir de 1965, o Instituto de Física passou a se chamar Instituto Niels Bohr (Pais, 1993).

3.4 EL PENSAMIENTO DE NIELS BOHR

Embora o pensamento de Bohr fosse inovador em vários aspectos, em suas propostas científicas, em suas reflexões filosóficas sobre a natureza do conhecimento e da realidade, incluindo suas ideias sobre o problema da coexistência pacífica das nações, pela qual recebeu o Prêmio Átomos para a Paz em 1958, em todo caso, ele não deixa de manter uma relação de dependência com seu contexto histórico (Strathern, 1999). Sua filosofia se desenvolve no contexto do nascimento da física quântica no início do século XX, mas ele a expôs plenamente somente em 1927, quando havia base teórica suficiente para uma interpretação do formalismo e dos fenômenos a ele relacionados, quando já era possível apresentar algumas ideias com mais clareza, ao final do processo revolucionário da ciência naquele período (Strathern, 1999), apesar de sua forma de escrever tender a ser confusa (Calvo, 2017).

Da perspectiva de um pensador que pratica a filosofia da física centrada na física quântica, e considerando que somos seres sociais imersos em um contexto, é conveniente localizar as possíveis influências filosóficas em seu pensamento, embora não haja consenso entre os estudiosos sobre quais seriam. Sobretudo porque o próprio Bohr, em alguns casos, nega ter se inspirado em certas filosofias (Calvo, 2017). Contudo, é muito provável que o filósofo Harald Høffding tenha sido sua maior influência, já que lhe ensinou filosofia nos cursos universitários obrigatórios e Bohr frequentou seus seminários avançados de filosofia na Universidade de Copenhague. Isso, além da camaradagem e da discussão de ideias ao longo de muitos anos, além do fato de terem mantido encontros intelectuais ao longo de 30 anos e de serem amigos próximos desde a juventude de Bohr (Strathern, 1999).

Em geral, os cientistas atuais não tendem a aderir a nenhuma filosofia; pelo contrário, às vezes demonstram desprezo por esse tipo de reflexão, considerando-a improdutiva, ignorando que seu próprio trabalho se baseia em certas referências filosóficas e está inscrito em seu próprio momento histórico (Calvo, 2017). É possível também que eles não tenham absolutamente nenhum conhecimento dessas referências. No entanto, esse não era o caso da atividade científica no início do século XX, quando as visões filosóficas sobre a ciência eram evidentes, especialmente porque a ciência entrava em crise em seus fundamentos conceituais. (Cadenas, 2004).

Em particular, a mecânica quântica rompeu com a forma clássica dos ideais da ciência clássica, em relação ao realismo das teorias, à objetividade do observador, ao determinismo e descrição pictórica das explicações teóricas, e definitivamente renovou antigas discussões epistemológicas e ontológicas (Cadenas, 2004). Nesse contexto, Bohr foi um dos físicos mais

filosóficos do século XX, o que pode ser observado tanto em sua postura crítica em relação à construção do conhecimento, muito semelhante à epistemologia kantiana, apesar de autores como Gerald Holton, Dugald Murdoch e Henry Folse minimizarem qualquer similaridade (Kaiser, 1992), quanto em sua busca por uma interpretação da teoria quântica, desenvolvida por meio de sua proposta de complementaridade (Plotnitsky, 2007), considerada por alguns como uma filosofia para o século XXI (Roldan; Ben-Dov; Guerrero, 2004).

Segundo Calvo (2017), há aspectos comuns na filosofia de Høffding e Søren Kierkegaard (1813-1855) que podem ter influenciado o pensamento de Bohr, lembrando que a proximidade e as discussões filosóficas com Høffding foram permanentes por muitos anos. Um desses aspectos é a impossibilidade de o pensamento conseguir uma explicação totalizante da realidade, dado que o sujeito cognoscente faz parte do próprio sistema que se pretende explicar, distorcendo a divisão objetivo-subjetivo, conferindo à ciência e ao pensamento apenas um valor prático. Outro aspecto é a ideia de saltos, presente na teoria do desenvolvimento do pensamento de Kierkegaard, contrária à ideia de uma continuidade na evolução do pensamento, onde o salto de um estado para outro não depende do anterior. Høffding vai além e traz os saltos para a natureza, introduzindo descontinuidade e indeterminação no mundo físico. Ambas as ideias, a arbitrariedade da separação objetivo-subjetivo e a descontinuidade e indeterminação, poderiam servir como inspiração heurística para Niels desenvolver seu modelo atômico e como fonte filosófica para conceber e desenvolver suas reflexões sobre complementaridade (Calvo, 2017).

Como apontam vários autores, Bohr expandiu seu contato com ideias filosóficas por meio dos seminários de Høffding, em que ele chegou às abordagens filosóficas de Kant, algumas das quais ele compartilha no desenvolvimento da complementaridade, rejeitando outras. Por exemplo, a ideia de que os fenômenos têm sua origem em nossa interação com objetos e, portanto, não podem nos dar informações sobre o objeto em si mesmo (Calvo, 2017), ou a questão da distinção observável-inobservável, na qual a complementaridade vai além da mera distinção e compartilha o modo kantiano de garantir a realidade objetiva de nossos julgamentos. No entanto, autores como Gerald Holton e Dugald Murdoch ignoram essa influência, alegando falta de evidências históricas, como se Harald Høffding não tivesse sido importante no desenvolvimento das ideias de Bohr (Kaiser, 1992).

Como afirmado acima, Kant constrói um modelo de conhecimento que, mais do que uma síntese, é uma superação do debate entre o empirismo inglês e o racionalismo continental, introduzindo um novo argumento que incluía a representação, indo além da crença de que o conhecimento é produzido a partir de uma fonte única e exclusiva. Na análise de Kant, os empiristas assumiram que a representação se originava do objeto sem qualquer mediação a

priori; enquanto os racionalistas assumiram que era a representação que tornava o objeto possível (Solé, 2015). Para Kant, a sensibilidade nos coloca diante dos objetos, mas o entendimento nos permite pensar sobre eles. Kant afirmou que

Pensamentos sem conteúdo são vazios, intuições sem conceitos são cegas. Portanto, é tão necessário tornar os conceitos perceptíveis (isto é, adicionar o objeto à intuição) quanto tornar as intuições inteligíveis (isto é, submetê-las a conceitos). As duas faculdades ou capacidades não podem trocar suas funções. Nem o intelecto pode intuir nada, nem os sentidos podem pensar nada. O conhecimento só pode surgir da união de ambos (Kant, 2005, p. 62, tradução própria)

Na proposta de Kant, dois aspectos emergem claramente: o apriorismo e a distinção fenômeno-númeno. A intuição percebe o objeto somente quando sua representação se conforma ao espaço e ao tempo, que são as formas a priori da intuição. O entendimento então formula conceitos do objeto e os relaciona em juízos regidos por categorias, que são regras a priori do entendimento. Esses conceitos a priori não são experienciais, mas são necessários, universais e completos. No entanto, a possibilidade de conhecimento a priori do objeto requer uma distinção entre o objeto como aparência e o objeto como coisa-em-si, uma vez que nosso conhecimento se refere apenas às aparências, não ao objeto em si. O objeto da experiência possível, aquilo que aparece aos nossos sentidos, constitui o fenômeno, enquanto a coisa-em-si é o númeno. Esses dois aspectos, o apriorismo e a distinção fenômeno-númeno, estão profundamente interconectados, mas não são inseparáveis, e enquanto um pode ser aceito, o outro pode ser rejeitado, como pode ser visto na filosofia de Bohr (Kaiser, 1992).

No argumento de Kant, para que um juízo seja objetivamente válido em relação ao conhecimento empírico, ele deve ser adequadamente contido, incluindo a limitação sob a qual o juízo é feito, isto é, nenhum objeto pode ser determinado por meio de uma categoria pura, abstraída de todas as condições da intuição, de modo que o emprego de um conceito implica uma função de juízo pela qual um objeto é subsumido sob o conceito, pelo menos a condição formal sob a qual ele pode ser dado na intuição. Sem essa condição, a subsunção é impossível, uma vez que não haveria nada que pudesse ser subsumido; é necessário incluir as condições sob as quais um objeto é percebido para que os juízos a respeito dele sejam significativos (Kaiser, 1992).

É possível observar essa concepção kantiana de conhecimento na complementaridade de Bohr. Para ele, a física quântica deveria ser capaz de ser tão clara em suas explicações quanto a física clássica, o que só seria possível por meio da linguagem inequívoca da física clássica,

uma vez que os fenômenos quânticos são comunicáveis na linguagem clássica, com a terminologia clássica apropriada (Roldán; Ben-Dov; Guerrero, 2004). Por exemplo, a dualidade onda-partícula, em que a explicação requer o uso de conceitos de onda em algumas configurações experimentais e o uso de conceitos de partícula em outras, uma vez que nenhum experimento revela ambos os comportamentos simultaneamente (Kaiser, 1992). Assim,

... o postulado fundamental da indivisibilidade do quantum de ação [...] exige que renunciemos a um modo de descrição causal e que, devido ao acoplamento entre os fenômenos e sua observação, nos força a adotar um novo modo de descrição designado como complementar, no sentido de que qualquer aplicação dada de conceitos clássicos impede o uso simultâneo de outros conceitos clássicos que, em uma conexão diferente, são igualmente necessários para a elucidação dos fenômenos (Bohr, 1961, p. 10, tradução própria).

Ao descrever a complementaridade, Bohr utiliza uma linguagem semelhante à de Kant, quando afirma que "toda a nova experiência surge dentro do marco dos nossos pontos de vista e formas de percepção habituais" (Bohr, 1961, p. 1, tradução própria), ou quando diz que "não devemos esquecer que, apesar de suas limitações, não podemos de modo algum prescindir daquelas formas de percepção que coloreem toda a nossa linguagem e em função das quais toda a experiência deve, em última análise, ser expressa" (Bohr, 1961, p. 5, tradução própria). Segundo Kaiser (1992), Bohr adotou também uma epistemologia semelhante à de Kant, em que qualquer conteúdo requer um marco formal para ser captado, enquanto qualquer forma, por mais útil que seja, pode ser limitada na compreensão de novas experiências. Ou seja, ele chega à estreita relação entre a intuição, que fornece o conteúdo, e a compreensão, que fornece o marco formal para a apreensão da experiência. No entanto, Bohr rejeitou o apriorismo.

Quando Bohr utiliza o termo "fenómeno" para se referir a situações da mecânica quântica, fala no sentido kantiano do termo objeto de experiência possível, distinguindo entre sistemas fechados de objetos e "fenômenos". Defende que não é possível sustentar a ideia de fenômenos independentemente dos meios de observação, uma vez que a definição de um sistema fechado de objetos implica a impossibilidade de observação. Assim sendo, uma definição rigorosa de um sistema fechado não é possível e, na verdade, estes sistemas estariam para além do âmbito da experiência possível, sendo abstrações que podem ser pensadas (Kaiser, 1992). No entanto, podemos observar fenômenos através da interação com os meios de medição (Roldán; Ben-Dov; Guerrero, 2004).

Esta perspectiva de Bohr, em termos da possibilidade da experiência, indica um vínculo conceptual com a distinção kantiana entre fenómeno e númeno, em que não elimina a realidade

dos sistemas fechados de objetos, mas os considera incognoscíveis, enquanto o fenômeno, objeto da experiência possível, é condicionado pelos meios de observação. A ênfase de Bohr na epistemologia em detrimento da ontologia leva-o à mesma conclusão de Kant: os sistemas são reais, mas incognoscíveis, para superar aquilo que ele também empregou o mecanismo kantiano de contenção conceptual (Kaiser, 1992).

Nesse sentido, no debate com o EPR¹⁴, Bohr argumenta que os dois conjuntos de dispositivos e procedimentos experimentais, relativos à posição e ao momento, são mutuamente exclusivos, de modo que medições simultâneas hipotéticas ficam fora do escopo da experiência possível. Ou seja, não basta associar elementos da realidade física a observáveis, uma vez que os julgamentos seriam feitos sobre conceitos indefinidos; é necessário incluir informações relativas aos dispositivos e procedimentos experimentais (Whitaker, 2004), que são equivalentes às condições sob as quais cada julgamento é feito para garantir sua validade. Para Bohr, os julgamentos no argumento do EPR não são conceitualmente contidos, uma vez que as condições de cada julgamento são mutuamente exclusivas e, portanto, julgamentos simultâneos estão além da experiência possível (Kaiser, 1992).

Sob outra perspectiva, Pringe (2014) vê o conceito kantiano de analogia como um possível fio condutor para a compreensão do desenvolvimento histórico do pensamento de Bohr sobre a interpretação da teoria quântica, em seus dois momentos: o Princípio da Correspondência (PC1) e o Princípio da Complementaridade (PC2). Analogia, para Kant, é "uma similaridade completa de duas relações entre coisas completamente diferentes" (Pringe, 2014, p. 30, tradução própria), o que, em seu sentido filosófico, significa uma igualdade de duas relações qualitativas, na qual, dados três membros, é possível conhecer a priori a relação com o quarto membro, mas não o membro em si. Se o quarto termo é um objeto de experiência possível, é uma analogia de experiência; se o objeto é um símbolo, é uma analogia simbólica.

Kant identifica três relações como necessárias para a possibilidade da experiência: substância-acidente, causa-efeito e ação recíproca. "A distinção entre o curso subjetivo das percepções e o curso objetivo da experiência reside na representação dos fenômenos espaço-temporais como interconectados" (Pringe, 2014, p. 31, tradução própria). Uma analogia empírica do tipo "C é a causa de D, assim como A é a causa de B", $C : D = A : B$, em que A, B e D são fenômenos conhecidos, enquanto a causa C é desconhecida e buscada sob a suposição de que a relação causa-efeito é idêntica, baseia-se na analogia a priori $C : D = \text{Causa} : \text{Efeito}$,

¹⁴ EPR refere-se a Einstein, Podolsky e Rosen, que propuseram um experimento mental para demonstrar que a mecânica quântica da época não conseguia explicar certos fenômenos sem violar o princípio da localidade.

onde Causa : Efeito é uma relação causal geral no espaço e no tempo, que nos permite determinar que C deve ser um evento do qual o evento D necessariamente decorre. Então, esse princípio de causalidade, além de ser a condição de possibilidade da distinção, é também a condição para fundar analogias empíricas (Pringe, 2014).

Kant considera que o entendimento não é uma faculdade da intuição, e

como não há outra forma de conhecimento, além da intuição, senão a conceitual, segue-se que o conhecimento de todo o entendimento — ou pelo menos o do entendimento humano — é conceitual, discursivo, não intuitivo. Todas as intuições, na medida em que são sensoriais, baseiam-se em afetos, enquanto os conceitos baseiam-se em funções. Por função, entendo a unidade do ato de ordenar diversas representações sob uma única representação comum. Os conceitos, portanto, fundamentam-se na espontaneidade do pensamento, assim como as intuições sensoriais se fundamentam na receptividade das impressões.” (Kant, 2005, p. 71, tradução própria)

Contudo, ele também deixou em aberto a possibilidade de dar conta do numênico por meio de uma das possibilidades da linguagem, o símbolo (Amaya, 2016) e por meio de um procedimento analógico, realizado pela faculdade de julgamento, em dois momentos: i) aplicação de um conceito a um objeto da intuição sensível, ii) aplicação da mesma regra de reflexão a um objeto diferente que esteja fora dos limites da sensibilidade, tornando o primeiro objeto um símbolo do segundo. Por se basear na igualdade qualitativa das relações entre os membros de uma proporção, o que é simbolizado não pode ser conhecido como é em si mesmo; apenas lhe é atribuída, por meio de símbolos, uma mera relação com algo presente na sensibilidade (Pringe, 2014).

Segundo Pringe (2014), essas ideias kantianas fundamentam PC1 e PC2, que correspondem a realizações do mesmo procedimento analógico que articula a interpretação de Bohr da mecânica quântica. PC1 orientou a busca por analogias de experiência, enquanto PC2 estabeleceu analogias simbólicas (Pringe, 2014). Na verdade, PC1 alude ao fato de que

a visualização dos estados estacionários por meio de representações mecânicas revelou uma analogia de longo alcance entre a teoria quântica e a teoria mecânica. Essa analogia foi traçada investigando-se as condições nos estágios iniciais do processo de ligação descrito, onde os movimentos correspondentes a estados estacionários sucessivos diferem comparativamente pouco entre si. Aqui, foi possível demonstrar uma concordância assintótica entre espectro e movimento (Bohr, 1961, p. 36, tradução própria).

Dada essa correspondência, a busca pelo elo quântico entre ambos tornou-se um princípio do pensamento de Bohr entre 1913 e 1925, que Darrigol (1992), citado por Pringe (2014), distinguiu em cinco etapas, de acordo com as mudanças no objetivo de interesse: 1) movimentos periódicos que obedecem às leis clássicas (1913-1916), 2) movimentos multiperiodicos, também sujeitos às leis clássicas (1917), 3) perturbações de movimentos multiperiodicos clássicos de sistemas não necessariamente multiperiodicos (1918-1922), 4) movimentos multiperiodicos que não satisfazem às leis clássicas (1922-1925), e 5) abandono da noção de órbitas eletrônicas definidas (1925).

Neste período, ainda sujeito à concepção física clássica, o movimento do elétron no átomo, M_c , determinaria um espectro contínuo, S_c , mas o espectro obtido, S_q , é discreto. Assim, de acordo com o princípio da correspondência, a teoria quântica deveria determinar o movimento eletrônico, de modo que a analogia: $M_c : S_c = M_q : S_q$, seja cumprida, em particular, aqueles em que o quarto termo, M_q , é concebido como representável na intuição espaço-temporal. No entanto, com a teoria BKS¹⁵ (1924), se uma conexão espaço-temporal contínua entre o movimento e o espectro for assumida, o que explica as leis estatísticas das transições, não é possível sustentar a relação causal em processos individuais. Mas, a relação causal é necessária, de acordo com Kant, para sua unificação na experiência. Portanto, a representação do movimento eletrônico não está conectada com o conteúdo empírico do espectro e permanece como uma representação puramente formal, com significado matemático nas equações clássicas (Pringe, 2014).

Embora a teoria BKS tenha sido refutada por muitos físicos teóricos da época, Bohr continuou a sustentar sua incompatibilidade, e se os resultados experimentais forçassem alguém a aceitar a conexão causal em processos de transição individuais, uma descrição espaço-temporal contínua de fenômenos ópticos não seria possível e seria necessário recorrer a analogias simbólicas. Assim, de acordo com Pringe (2014), Bohr aprofundou sua crítica à possibilidade de uma descrição espaço-temporal de processos atômicos que também fosse causal.

Entre 1924 e 1925, as ferramentas disponíveis para os teóricos quânticos eram o princípio da correspondência, a teoria dos osciladores virtuais de Slater e a teoria de perturbação clássica. O problema central da época era o mecanismo das transições, necessário para calcular as probabilidades de transição e as intensidades das linhas espectrais. Em outras palavras,

¹⁵ BKS refere-se à teoria de N. Bohr, H. Kramers (1894-1952) e J. Slater (1900-1976), no qual tentam explicar o mecanismo de transição com a ajuda de osciladores virtuais, sem abandonar a teoria clássica e, portanto, dispensando a conservação de energia e momento. (Lupon, 1987).

determinar os coeficientes de probabilidade de Einstein¹⁶, denotados por A e B, era um dos principais problemas daquela época. Nesse sentido, Heisenberg propôs sua reinterpretação cinemática, baseada em quantidades observáveis e relações de comutação entre variáveis conjugadas canônicas, eliminando assim a ambiguidade clássico-quântica do princípio da correspondência. Surgiu, então, a mecânica matricial, mantendo a descontinuidade dos fenômenos quânticos e a noção de partícula (Lupon, 1987).

Contudo, a mecânica matricial não conseguia calcular os coeficientes, ou equivalentemente, as intensidades das linhas espectrais. Ao longo de 1926, Schrödinger publicou uma série de artigos nos quais introduziu a mecânica ondulatória e demonstrou sua equivalência com a mecânica matricial. Em um desses artigos, ele introduziu a equação de onda, que permite acompanhar a evolução temporal de um sistema quântico. Essa equação é uma ferramenta fundamental para o problema das probabilidades de transição e, de fato, um dos pilares da física quântica. Com a equação de onda, Dirac e Slater conseguiram calcular o coeficiente B em termos estritamente quânticos, sem recorrer ao princípio da correspondência. Posteriormente, Dirac também calculou o coeficiente A, introduzindo os primeiros conceitos de quantização de campos (Lupon, 1987).

Como foi demonstrado que um formalismo poderia ser traduzido no outro, para Bohr o problema era tornar compatíveis as suposições contraditórias que eram equivalentes na teoria. Assim, sua solução foi orientada para determinar os domínios de validade das suposições por meio do princípio da complementaridade, que ele expôs na conferência de Como em 1927 (Roldan; Ben-Dov; Guerrero, 2004).

Por um lado, a física quântica mostrou um campo em que os conceitos clássicos eram limitados; por outro, Bohr reforçou sua ideia de que os conceitos clássicos não poderiam ser abandonados, uma vez que

é decisivo reconhecer que, por mais que os fenômenos transcendam o escopo da explicação física clássica, a explicação de todas as evidências deve ser expressa em termos clássicos. O argumento é simples: com a palavra “experimento”, nos referimos a uma situação em que podemos relatar aos outros o que fizemos e o que aprendemos e, portanto, a descrição do arranjo experimental e dos resultados das observações deve ser expressa em linguagem inequívoca, com a devida aplicação da terminologia da física clássica (Bohr, 1958, p. 39, tradução própria).

¹⁶ Esses são três coeficientes que Einstein estabeleceu para calcular a probabilidade de transições espontâneas ou induzidas, sem determinar seu valor devido à falta de uma teoria exata dos processos eletrodinâmicos e mecânicos (Lupon, 1987).

Portanto, o problema era como resolver, ao mesmo tempo, a necessidade de conceitos clássicos com seus próprios limites de aplicação. Na base do problema estava o postulado quântico, "que atribui a todo processo atômico uma descontinuidade essencial, ou melhor, uma individualidade completamente alheia às teorias clássicas e simbolizada pelo quantum de ação de Planck" (Bohr, 1961, p. 53, tradução própria), cuja realidade implica a renúncia à causalidade dos processos atômicos no espaço e no tempo, uma negação da continuidade, condição necessária para a distinção entre percepções subjetivas e experiências objetivas, na perspectiva kantiana (Pringe, 2014).

Assim, como um objeto quântico não é suscetível à experiência possível e sua interpretação só é possível por meio de conceitos, Bohr utiliza o simbolismo da mecânica quântica para desenvolver o formalismo e, especialmente, para explicar o papel dos termos descritivos. Esse simbolismo não introduz novos conceitos estritamente quânticos, mas confere um uso distinto aos conceitos clássicos, seguindo a estrutura geral das analogias simbólicas: por exemplo, subsumindo os dados experimentais da interação elétron-fóton ao conceito clássico de partícula, à qual as leis de conservação do momento e da energia podem ser aplicadas. Em seguida, transferindo a relação para o objeto quântico, afirma-se que, em relação à configuração experimental, tal objeto se comporta como se fosse uma partícula clássica (Pringe, 2014).

A natureza simbólica da referência a objetos quânticos é uma primeira parte da solução, mas determinar como as representações se relacionam com os objetos não termina aí. Bohr apela à natureza complementar dessa referência, pois compreender a totalidade dos resultados experimentais associados a um objeto quântico requer arranjos experimentais incompatíveis entre si. Ou seja, a referência simbólica associada a um arranjo experimental será complementar a outra, associada a um arranjo incompatível com o primeiro. Portanto, a complementaridade permite a unidade do uso simbólico de conceitos clássicos na teoria quântica (Pringe, 2014).

Por fim, segundo Aaserund e Heilbron (2013), o pensamento de Bohr não deve ser reduzido à sua epistemologia, buscando respostas em filósofos que, sem dúvida, informaram suas discussões, visto que ele fazia parte do Círculo da Eclíptica, onde também lia escritores como Goethe e Schiller. Todas essas leituras também fizeram parte de sua bagagem de ideias antes de escrever sua Trilogia, fornecendo-lhe elementos que lhe permitiram "deixar sua imaginação vagar por um Norte fascinante por sua beleza, aterrorizante por sua imensidão e, para ele, cativante por suas contradições" (Aaserund; Heilbron, 2013, p. 106, tradução própria). Assim, sua imaginação e sua cultura literária, bem como sua filosofia, não podem ser ignoradas como fonte de inspiração para a composição da Trilogia.

De fato, Bohr tinha uma relação particular com a linguagem, o que o tornava muito sensível a nuances e imagens, o que sugere seu apelo à literatura para esclarecer as ideias em seus discursos e explica a extensão e as circunlocuções de suas composições. A esse respeito, ele comentou certa vez que “o amor de Høffding pela ‘poesia da vida’, expressa não apenas por filósofos, mas também por Shakespeare e Goethe, tornou possível sua obra mais importante” (Aaserund; Heilbron, 2013, p. 109, tradução própria). Quando perguntavam a Bohr para onde a ciência estava indo, ele frequentemente respondia com uma citação do Fausto de Goethe: “Não há como. Avante para o desconhecido” (Strathern, 1999, p. 69). Sua mentalidade também pode ter sido influenciada por suas origens judaicas, dadas as características de Bohr, como sua dependência da família, seus sentimentos de dívida e culpa, e seu senso de responsabilidade, típicos do intelectual judeu (Pais, 1993).

4 BOHR Y LA ESTRUCTURA ATÓMICA

Desde a era grega, os atomistas gregos (século V a.C.) já concebiam características discretas na descrição da natureza. No entanto, o conceito predominante foi o de continuidade, que chegou à ciência por meio de Aristóteles (384 a.C.-322 a.C.), que o aplicou à compreensão total da natureza, dos seres inertes aos vivos, onde concebeu a escala contínua do Ser. Por mais de dois mil anos, o pensamento de Aristóteles foi dominante no Ocidente, adaptado com interpretação bíblica, pois o Universo criado por Deus tinha que ser único, perfeito e contínuo, ideia que foi defendida de diferentes maneiras por filósofos como Descartes, Leibniz, Kant (Losee, 1981), entre outros, e expressa em leis como a lei da continuidade ou a lei da escala contínua dos seres criados.

Essas ideias, defendidas por estudiosos, mantiveram a imagem de um mundo contínuo, cujo aforismo, "*Natura non facit saltum*", persistiu ao longo do desenvolvimento da física moderna, como revelado nas equações de Newton, Maxwell e Einstein. Em contraste, a imagem discreta da natureza reapareceu no século XVII com o atomismo químico, graças a Pierre Gassendi (1592-1655) e alguns de seus contemporâneos. De fato, alguns consideravam os átomos simples dispositivos heurísticos. No entanto, evidências experimentais começaram a mostrar que os elementos químicos deveriam ser compostos de entidades únicas, distanciando-se do modelo contínuo dos quatro elementos: ar, terra, fogo e água (Sánchez, 1997). Dalton então enunciou a teoria atômica, que gradualmente ganhou força e constituiu a base filosófica para explicar os fatos da combinação química. Nessa época, bastava supor que os átomos agiam como unidades individuais e conhecer suas massas relativas. A partir disso, foi construída a teoria cinética dos gases, cujo poder explicativo serviu como um análogo para explicar outros fenômenos (Rutherford, 1923).

Pouco a pouco, ideias muito vagas sobre a possível estrutura dos átomos começaram a se espalhar, pois se raciocinava que as variações periódicas nas propriedades dos elementos, descritas por Mendeleiev, só seriam explicáveis se os átomos tivessem estruturas semelhantes, construídas de alguma forma. O problema foi esclarecido com a determinação da natureza da eletricidade. O sucesso da teoria eletromagnética concentrou a atenção no éter que envolve o condutor de eletricidade, e pouca atenção foi dada aos portadores reais da corrente elétrica. Ao mesmo tempo, ganhava força a ideia de que uma explicação para a eletrólise de Faraday só seria possível assumindo que a eletricidade era de natureza corpuscular (Rutherford, 1923).

No século XIX, Gustav Kirchhoff (1824-1887) foi um dos poucos físicos com habilidades experimentais e teóricas. Ele descobriu os elementos célio e rubídio e contribuiu

para o estudo de fluidos, correntes elétricas e emissão térmica. Juntamente com Robert Bunsen (1811-1899), ele criou técnicas e instrumentos espectroscópicos para a investigação de interações matéria-energia (Flores, 1997). Uma de suas contribuições foi seu estudo da radiação de corpo negro, conseguindo, apesar das dificuldades experimentais, caracterizar a densidade espectral, para diferentes frequências de radiação a uma dada temperatura, como uma função exclusivamente da radiação, independente do volume, forma ou material da cavidade. A busca por essa função, iniciada por Kirchhoff, levou à teoria quântica (Sánchez, 1997).

A formulação obtida por Kirchhoff na década de 1860 era simples, mas seu significado teve que esperar 40 anos, após as contribuições de Jozef Stefan (1835-1893) em 1879, Ludwig Boltzmann (1844-1906) em 1884 e Wilhelm Wien (1864-1928) em 1893. Stefan determinou que a energia irradiada era proporcional à quarta potência da temperatura, Boltzmann demonstrou teoricamente, a partir da termodinâmica e da teoria de Maxwell, que a hipótese de Stefan funcionava estritamente apenas para corpos negros. Hoje, ela é conhecida como a lei de Stefan-Boltzmann. Por sua vez, Wien estudou a distribuição de frequência da radiação de corpo negro, concluindo que a energia da radiação em uma faixa de frequência tem um valor máximo para um determinado comprimento de onda (λ), que se desloca para comprimentos de onda menores com o aumento da temperatura (T). Esses trabalhos ajudaram a entender que algo estava errado com a física clássica, marcando o início de uma nova física, que começou com Planck (Sánchez, 1997).

No início do século XX, o espetáculo da ciência refazendo seus passos era extremamente emocionante. E. Mach chegou a propor que o átomo era um conceito ultrapassado, um vestígio de uma forma de pensar não científica. A sólida fundação da ciência poderia ser questionada, e Bohr o fez, rejeitando também a posição de Mach, visto que o átomo existia e sua estrutura começava a ser compreendida. Despreocupado com as críticas, Bohr avançou rumo ao desconhecido com um golpe de teoria. Em sua tese de doutorado, argumentou que o magnetismo revelava deficiências na teoria eletrônica e começou a perceber que os pressupostos da física clássica não se aplicavam ao nível subatômico. Incerto sobre o que tudo isso significava, decidiu ir à fonte: J. J. Thomson, o pioneiro da pesquisa sobre a estrutura atômica (Strathern, 1999).

4.1 A CONCEPÇÃO CLÁSSICA DA ESTRUTURA DA MATÉRIA

A compreensão da maioria dos sistemas físicos e químicos não requer a determinação exata das características cinemáticas e dinâmicas de cada uma de suas partículas constituintes.

De fato, variáveis termodinâmicas como temperatura, pressão, energia interna ou entropia não têm sentido quando se referem a uma partícula. No entanto, a construção desse conhecimento baseou-se em teorizações e experimentações relacionadas à mecânica, como revelado no trabalho de Hermann von Helmholtz (1821-1894) sobre princípios termodinâmicos, ou como no caso da teoria cinética dos gases. A elucidação da relação entre o comportamento macroscópico e as propriedades microscópicas inerentes às partículas levou ao nascimento da mecânica estatística, introduzindo o cálculo de probabilidades na física (Flores, 1997).

Um sistema físico isolado tende espontaneamente a um estado de máxima desordem possível, no estado de equilíbrio térmico. Esse fenômeno foi definido como a segunda lei da termodinâmica, ou entropia, S , e foi discutido pela primeira vez em 1850 por Rudolf Clausius (1822-1888) em sua teoria mecânica do calor, sem se referir ao próprio termo, apenas que o fluxo de calor deve ser acompanhado por outra mudança no sistema, uma transformação. Ele usou o termo¹⁷ em 1865, mostrando que tende a um máximo no Universo, embora não tenha feito referência à constituição molecular dos corpos. A relação com conceitos moleculares deve-se principalmente a Boltzmann e seu trabalho em mecânica estatística, na década de 1870, a partir do qual ele propôs um teste molecular de por que a entropia aumenta quando um sistema isolado se move em direção ao equilíbrio (Sánchez, 2000).

Boltzmann foi duramente criticado, mas se defendeu das críticas recorrendo ao conceito de reversibilidade, um pilar da mecânica newtoniana, que ligava a entropia à probabilidade, de modo que o estado de equilíbrio se revelasse o mais provável. E essa abordagem probabilística permitiu o estudo de sistemas tão complexos, nos quais somente a mente de Deus conhece a posição e a velocidade de cada uma de suas partículas em qualquer instante t , com base em seus valores iniciais. Assim, a previsibilidade foi mantida na mecânica estatística. Mas isso não foi suficiente para Wilhelm Ostwald (1853-1932) e Ernest Mach, que negaram o atomismo, embora Ostwald finalmente tenha aceitado isso após a explicação de Einstein sobre o movimento browniano (Moreno, 2006).

No século XIX, a química estava alcançando o status de ciência sistemática, com linguagem própria, apesar do ceticismo ou da ambivalência de muitos químicos (Chamizo, 2022). De fato, os físicos também tinham posições diferentes em relação ao atomismo: Young, Clausius, Boltzmann e Maxwell estavam entre aqueles que o apoiavam e, na década de 1880, já existiam estimativas dos raios moleculares e do número de moléculas por unidade de volume,

¹⁷ Para Clausius, o segundo princípio era o conteúdo da transformação, por isso ele usou a palavra grega $\eta\rho\omicron\pi\eta$, que significa transformação, e a relacionou com energia; daí surgiu o termo entropia. (Sánchez, 2000).

entre outros. Planck, por outro lado, tendia a rejeitar o atomismo, razão pela qual resistiu a aceitar a interpretação probabilística de Boltzmann da segunda lei da termodinâmica, embora eventualmente a tenha aceitado. As ideias de Boltzmann foram cruciais para sua teoria da mecânica quântica.

De fato, a década de 1890 foi um período de muitos avanços científicos, tanto teóricos quanto experimentais. Em 1896, Henri Becquerel (1852-1908) e Marie Curie (1867-1934) descobriram a radioatividade, e logo se soube que os raios alfa, α , beta, β e gama, γ , eram misteriosamente emitidos por átomos individuais, embora não se soubesse de onde vinham ou por que eram característicos de algumas espécies atômicas. Também se descobriu que os raios β eram elétrons. Assim, havia muitas pistas experimentais de que o átomo não era a partícula final da matéria, como Dalton havia proposto, embora permanecesse o menor corpúsculo que retinha a identidade de um elemento químico (Rutherford, 1923).

A relação entre cargas elétricas e a átomo amadureceu a ideia de uma estrutura atômica. Nesse processo, experimentos com tubos de descarga pareceram corroborar a hipótese, proposta a partir de experimentos e análises eletroquímicas, da existência de partículas elétricas associadas aos átomos da matéria, que foram chamadas de elétrons por George Stoney (1826-1911) em 1891. Quanto à natureza da radiação gerada nos tubos, William Crookes (1832-1919) mostrou que ela era corpuscular, enquanto Heinrich Hertz (1857-1894) mostrou que ela era ondulatória. Em 1897, Thomson e seus colaboradores concluíram que se tratava de partículas de matéria de alta velocidade e carga negativa (Thomson, 2010), independentemente do material de onde eram originários (Baily, 2013).

Na Exposição Universal de Paris (1900), Thomson apresentou o novo mundo da física ao aludir à constituição da matéria que justificava a presença de elétrons em diferentes fenômenos, como o caso da condutividade metálica, que ele atribuiu aos elétrons livres na rede metálica, apoiado pelo trabalho de Eduard Riecke (1845–1915) e Paul Drude (1863–1906), que construíram, independentemente, modelos de metais análogos ao comportamento de moléculas de gás em um cano. Em suas propostas, os elétrons, tanto positivos quanto negativos, movem-se aleatoriamente, mantendo colisões elásticas com as moléculas do metal, mas se movem na direção do fio, gerando corrente elétrica, quando uma força elétrica externa é aplicada, cujo trabalho aumenta sua energia cinética. Cada colisão com as moléculas do metal gera uma perda de energia cinética, o que explicaria a resistência ao fluxo de corrente. As colisões entre elétrons foram consideradas como tendo muito pouca influência (Aaserud; Heilbron, 2013).

Thomson restringiu o modelo a portadores negativos, como havia encontrado nos raios catódicos (Thomson, 2010), e, em consonância com os avanços na explicação da condução

elétrica e térmica, sugeriu aplicações ao magnetismo e à radiação. Seu modelo sobre a teoria eletrônica dos metais forneceu a Bohr os ingredientes para sua tese de doutorado. Um resultado quantitativo dessa teoria foi a obtenção de uma lei empírica que Gustav Wiedemann (1826-1899) e Rudolf Franz (1826-1902) haviam enunciado em 1853, complementada por L. Lorenz em 1872: a razão entre as constantes de condutividade térmica e elétrica, κ/σ , é a mesma para todos os metais e proporcional à temperatura, $\kappa/\sigma = k T$. Os cálculos eram consistentes com a lei, mas a lei não correspondia aos fatos. Ainda assim, o otimismo permanecia, e a esperança persistia em aprimorar o modelo para fornecer uma resposta mais próxima dos fatos. Este modelo foi derivado da analogia entre elétrons em um metal e átomos de gás em uma caixa, uma vez que o mecanismo da teoria dos gases provou ser muito sofisticado e poderoso. Assim, os resultados experimentais foram interpretados recorrendo ao modelo da teoria cinética dos gases e sua lei empírica $P V = n R T$, para simular o comportamento dos elétrons do metal. De fato, a teoria cinética dos gases foi uma das maiores conquistas da física teórica no final do século XIX (Aaserud; Heilbron, 2013).

A partir de um modelo ideal de gás monoatômico, com N átomos contidos em uma caixa cúbica de lado l , o número A de átomos que ricocheteiam contra uma das paredes do recipiente em um instante t , é:

$$A = \left(\frac{N}{6}\right) \left(\frac{ut}{l}\right) = \frac{N u t}{6l}$$

onde a velocidade u , é invariante para todos os átomos.

O rebote de cada átomo é uma consequência do impulso, $I = F t$, dobro sobre ele no instante t , alterando seu momento, $m u$, do qual pode ser derivado que o impulso total em uma parede corresponde ao momento duplo de todos os átomos, $2 m u A$, de acordo com o princípio da conservação do momento.

Como a pressão em uma parede da caixa é dada pela expressão $P = F / l^2$, e que qualquer força pode ser calculada usando $F = m a = m u / t$, então a pressão total sobre uma parede da caixa pode ser determinada assim: $P = (2 m u / t l^2) (N u t / 6 l) = N m u^2 / 3 V$. Dessa expressão, conclui-se que $P V = N m u^2 / 3 = n R T$, de onde a energia cinética média, E_k , em equilíbrio térmico, é:

$$E_k = \frac{m u^2}{2} = \frac{3 n R T}{2 N} = \frac{3 k T}{2}, \text{ onde } k = n R / N.$$

Entende-se que o fator 3 da expressão está relacionado a cada grau de liberdade do átomo, referido aos 3 eixos coordenados, de modo que cada um correspondesse à mesma energia

cinética média, $k T / 2$. Algo perfeitamente razoável considerando a distribuição equitativa da energia.

Esta análise coincidiu parcialmente com os resultados experimentais, uma vez que, ao considerar gases moleculares, que possuem mais graus de liberdade, surgiram falhas claras, dadas as necessidades energéticas. Esta dificuldade de equipartição de energia tornou-se mais crítica em relação ao éter, dada a infinidade de modos vibracionais.

Em 1900, Lord Rayleigh (1842-1919) abordou o problema a partir de uma analogia entre as vibrações do éter em um espaço finito com as vibrações do ar em um recipiente e obteve uma expressão matemática para o número de modos vibracionais do éter, $N(\nu)$, incluídos entre certas frequências ν_n e $(\nu_n + \Delta\nu)$

$$N(\nu) = \left(8\pi\nu^2 / c^3 \right) \Delta\nu \quad (3.1)$$

onde c é a velocidade da onda.

Dessa expressão, conclui-se que o número de modos para altas frequências é milhões de vezes maior do que para baixas frequências, de modo que não haveria como cada modo de vibração receber sua parcela justa de energia. Isso sugeria que deveria haver alguma maneira de impedir que vibrações de alta frequência compartilhassem a energia disponível de forma equitativa. Assim, James Jeans (1877-1946) propôs que um processo mecânico desconhecido poderia ser responsável por impedir o fluxo de energia para modos de frequência mais alta no éter (Aaserud; Heilbron, 2013).

A pesquisa sobre a radiação no corpo negro revelou pistas para a solução do problema. W. Wien e seus colegas construíram um corpo negro com o objetivo de descobrir quanta energia de equilíbrio estava em cada um dos modos de éter, mantendo o princípio da equipartição e a hipótese de que a radiação dentro da cavidade dependia apenas da temperatura de equilíbrio. W. Wien mostrou que a densidade de energia $\rho(\nu, T) \Delta\nu$, para uma pequena faixa de frequência $\Delta\nu$, poderia ser expressa como $\alpha \nu^3 f(\beta \nu / T) \Delta\nu$, com α e β sendo constantes experimentais. Se $f(\beta \nu / T) = \text{const } k T / \nu$, a conexão com o princípio da equipartição é obtida, uma vez que $\rho(\nu, T) = \text{const } \nu^2 k T$. Por outro lado, da equação (3.1) segue-se que $N(\nu) = \text{const. } \nu^2$, portanto $\rho = N(\nu) k T$ (Aaserud; Heilbron, 2013).

Essa abordagem contradizia o princípio da conservação de energia, pois levava à expectativa de crescimento de energia indefinido em altas frequências. No entanto, os espectros obtidos por Wien e colaboradores mostraram que a energia se aproxima rapidamente de zero em altos valores de ν / T , então Wien concluiu que $f(\beta \nu / T)$ deveria ser uma função exponencial, tal que $\rho = \alpha \nu^3 \exp(-\beta \nu / T)$. Essa expressão se assemelhava ao fator de

distribuição de velocidade na teoria cinética dos gases, $\exp(-m v^2 / 2 k T)$ (Aaserud; Heilbron, 2013).

Se α e β fossem constantes universais, sua derivação teórica teria sido possível. Além disso, acreditava-se que elas estavam relacionadas às cargas elétricas oscilantes que geram a radiação do corpo negro. Assim, esperava-se que a compreensão dessas constantes permitiria entender o mundo submicroscópico, para o qual os *insights* das teorias termodinâmica e eletrodinâmica estavam disponíveis. Foi Max Planck quem propôs uma solução apropriada, com base nas ideias de Clausius sobre entropia e o conflito que ela gerava com as leis da mecânica, avaliando a teoria dos gases e sua tendência ao equilíbrio térmico, sem possibilidade de retorno. Nesse sentido, Boltzmann combinou métodos estatísticos com o determinismo da mecânica para que a entropia não se limitasse a uma única direção, mostrando que uma reversão do equilíbrio era possível, embora altamente improvável (Sánchez, 2000).

Planck não compartilhava das ideias de Boltzmann sobre entropia, mas não teve escolha a não ser aceitá-las. Como o espectro da cavidade não dependia de suas paredes, ele propôs que suas moléculas consistiam em pequenas molas, cada uma carregando a mesma carga elementar e em todas as frequências, através das quais poderiam trocar energia com os modos vibracionais correspondentes no éter. Ele então identificou $\text{const. } f(\nu / T)$ como a energia média $U(\nu / T)$ dos osciladores materiais em equilíbrio térmico com os modos do éter correspondentes em cada valor de frequência, ν . Apelando para conceitos termodinâmicos, Planck expressou U em termos da entropia S dos ressonadores e introduziu a temperatura através da equação termodinâmica padrão $dS/dU = 1/T$. No início dos anos 1900, Planck teoricamente encontrou uma relação que lhe permitiu obter a forma de Wien de $f(\nu / T)$.

Na reunião de 1900 em Paris, surgiram duas tendências: aqueles, como P. Drude, que defendiam as ideias de Boltzmann, e aqueles que se alinhavam com Wien. Planck pertencia a este último campo, dada sua confirmação teórica da formulação para $f(\nu / T)$ com base na aplicação da segunda lei. No entanto, embora as medições espectroscópicas de Friedrich Paschen (1865-1947) confirmassem as ideias de Wien, Otto Lummer (1860-1925) declarou em seu relatório que recentes experimentos mostraram desvios sistemáticos da lei de Wien para valores baixos de ν / T . Em Berlim, experimentalistas alemães descobriram que, neste limite, $f(\nu / T) = \text{const. } \nu / T$, que já havia sido obtido por Lord Rayleigh para a densidade de energia, ρ . Esses resultados alimentaram o debate filosófico sobre a compatibilidade da termodinâmica com a mecânica. Diante desses fatos, Planck encontrou uma relação entre a entropia e a energia de um conjunto de ressonadores que dava a ρ a forma de Lord Rayleigh em valores baixos de ν / T e a forma de Wien em valores altos de ν / T :

$$\rho(\nu, T) d\nu = N(\nu) d\nu \cdot h\nu / [\exp(h\nu / kT) - 1],$$

onde $h\nu / [\exp(h\nu / kT) - 1]$ é a energia média ε_ν de um ressonador de frequência ν .

Agora, de acordo com o princípio da equipartição, a energia não depende da frequência e, de fato, no limite de pequenos ν/T , $\varepsilon_\nu = \varepsilon = kT$, como seria de se esperar para um ressonador com um grau de liberdade. Por outro lado, para altos valores de ν/T , em baixas temperaturas, há pouca energia térmica total E disponível e, portanto, a probabilidade de ativar os modos superiores de ν é muito baixa e impossível para qualquer modo onde $h\nu > E$. Portanto, os ressonadores não eram iguais em sua competição por energia, uma vez que h limita o fluxo de energia para os modos superiores do éter. Mas isso não estava claro para Planck em 1900 (Sánchez, 2000).

Planck acreditava ter resolvido o problema da radiação negra com base nas teorias clássicas da termodinâmica e da eletrodinâmica e, de fato, seus fundamentos teóricos tiveram várias consequências: ele determinou as dimensões do mundo submicroscópico com maior precisão, calculou um valor mais preciso de e para a carga transmitida na eletrólise e, portanto, maior precisão na massa do elétron. Mas ninguém estava ciente das implicações da constante h na fórmula de Planck (Prasad, 2013)

Logo, teóricos como Einstein, Lorentz e Ehrenfest observaram que a equipartição deveria ser válida para a radiação negra e encontraram um problema na derivação de Planck, uma vez que ela não restringia a energia de cada ressonador individual a múltiplos inteiros de $h\nu$, mas assumia uma restrição mais comprometedora: a energia de qualquer sistema mecânico não estava disponível em um contínuo, mas como uma grandeza descontínua. Essa descontinuidade foi usada por Einstein em 1905 para resolver o problema do efeito fotoelétrico, consolidando a descontinuidade do princípio quântico, que foi introduzido por Bohr na Trilogia, embora mais como uma descrição física da natureza do que na própria natureza, como uma restrição a processos que eram perfeitamente válidos na física clássica (Prasad, 2013).

A teoria da relatividade de Einstein ajudou a esclarecer a teoria eletrodinâmica e a teoria dos gases ao eliminar o éter da equipartição. Isso ofereceu a possibilidade (Einstein considerou um requisito) de alterar os termos de interação entre a matéria comum e o campo eletrodinâmico que substituiu o éter mecânico (Bonder; Okon, 2018). Em 1906, Einstein argumentou que, se a fórmula de Planck para a radiação negra fosse segura e, consequentemente, a relação que ele deduziu da eletrodinâmica entre a densidade de energia no campo ρ_ν e a energia média de um ressonador $h\nu$ se mantivesse mais ampla, então o $h\nu$ de Planck deveria ser aplicado a qualquer mediador de trocas de energia entre a matéria e a radiação. Então, ao comparar os íons que

compõem um metal no estado sólido com ressonadores de Planck, Einstein estabeleceu que a energia térmica U em um mol do metal era igual à energia média de uma molécula multiplicada pelo número de Avogadro N .

Retornando à estrutura dos átomos, Joseph Larmor (1857-1942) propôs em 1898, com base nas ideias de William Thomson (1824-1907), conhecido como Lord Kelvin, a analogia do giroscópio como modelo para átomos, no qual conjuntos de partículas de igual massa, eletricamente carregadas, orbitam no éter, e sua direção determina o seu sinal positivo ou negativo. Mas, apesar da vantagem de utilizar conceitos dinâmicos, Larmor suspeitava que tais conceitos eram insuficientes para explicar o mundo atômico, pelo que acreditava que o objetivo dos físicos teóricos era descobrir as leis da dinâmica molecular e deduzir a mecânica ordinária a partir delas. Além disso, Larmor (1900), constatou que um campo magnético aplicado sobre um sistema de elétrons em órbita, ampliava as linhas espectrais. No entanto, Pieter Zeeman (1865-1943), independentemente, obteve resultados experimentais mais precisos, observando que as linhas espectrais não se alargarem, mas sim dividiram-se em várias, um fenômeno conhecido como efeito Zeeman. Esse efeito e a precessão de Larmor, foram importantes pistas experimentais na determinação da estrutura interna da matéria (Wiechowski, 1972).

Em 1897, Thomson propôs que as partículas negativas eram a componente básica da matéria, baseando-se na concordância dos valores de eL / mL que encontrou para a partícula de Larmor, para os portadores de carga libertados dos metais pela luz UV ou do cátodo pelo calor, e para os raios β . Essa proporção eL / mL foi aproximadamente mil vezes maior que a anterior conhecida por íons hidrogênio, eH / mH . Mas os cépticos duvidaram do resultado porque, além disso, isso significava que o átomo era divisível e seria formado, estranhamente, por milhões de corpúsculos. O próximo passo foi saber se a carga da partícula era igual ao do íon hidrogênio, $eL = eH$. Felizmente, Thomson tinha a equipe humana e o dispositivo instrumental, para medir a carga eL dos elétrons. Em 1899, estabeleceu a concordância do valor de eL com o valor de eH , e convenceu os cépticos a aceitarem que $mL \approx mH / 1000$ e a divisibilidade do átomo. O valor medido no Cavendish foi subsequentemente melhorado por Planck e Rutherford, cuja disponibilidade foi essencial para o sucesso da Trilogia de Bohr (Baily, 2013).

Thomson decidiu relacionar átomos de vórtice, dos quais tinha pleno conhecimento, com as cargas discretas, através de uma analogia com os resultados de Alfred Mayer (1836-1897) sobre a distribuição de ímãs flutuantes. Assim, sugeriu que configurações de anéis concêntricos, imersos em espaço positivo para estabilizar o sistema, poderiam ser a chave para a periodicidade nas propriedades químicas e espectrais dos elementos; mas em 1897 ele ainda não havia proposto nada mais do que uma imagem qualitativa de átomos corpusculares (Baily,

2013). Depois, Thomson e James Arnold Crowther (1883-1950) utilizaram vários métodos para determinar o número de cargas negativas em um átomo, com base em dados experimentais obtidos pelo espalhamento de luz e raios X em gases e pela absorção de partículas β ao atravessarem um material. Conseguiram determinar que o número de cargas negativas era da ordem da massa do átomo, mas Rutherford obteve melhores resultados ao realizar experimentos com partículas α (Baily, 2013).

De qualquer forma, o modelo de Thomson (1904) se destacou de seus antecessores, pois foi o primeiro modelo atômico com enorme suporte matemático e experimental, o que abriu muitas possibilidades de desenvolvimento (Rodríguez y Niaz, 2002). Para Thomson (1904), um átomo é:

uma esfera de eletrificação positiva uniforme e, dentro dessa esfera, uma série de corpúsculos dispostos em uma série de anéis paralelos, com o número de corpúsculos em um anel variando de um anel para outro: cada corpúsculo viaja em grande velocidade ao redor da circunferência do anel em que está situado, e os anéis são dispostos de tal forma que aqueles que contêm um grande número de corpúsculos ficam próximos à superfície da esfera, enquanto aqueles em que há um número menor de corpúsculos ficam mais para dentro. (Thomson, 1904, p. 254-55, tradução própria).

Os anéis são dispostos de tal forma que a repulsão entre eles seja equilibrada pela atração exercida pela eletrificação positiva da esfera. Com se observa em suas equações do artigo *On the structure of the atom* (1904), nenhum termo se refere a qualquer resistência, portanto, entende-se que a esfera atômica carece de densidade ou viscosidade.

Além de relacionar as propriedades periódicas dos átomos ao arranjo dos anéis: “a mudança gradual nas propriedades dos elementos que ocorre à medida que percorremos uma das linhas horizontais na organização dos elementos de Mendeleev, também é ilustrada pelas propriedades possuídas por esses grupos de corpúsculos [na disposição dos anéis]” (Thomson, 1904, p. 259, tradução própria), ele forneceu uma explicação para entender os elementos eletronegativos e eletropositivos, assim como o fenômeno da radiação. Como os sistemas de anéis eram estáveis acima de um certo valor crítico de velocidade angular para os corpúsculos, se eles originalmente tivessem um valor muito maior, dada a radiação, suas velocidades diminuiriam lentamente e, após um longo intervalo, atingiriam a velocidade crítica, produzindo uma explosão de corpúsculos que, ao se afastarem de suas posições, diminuiriam sua energia potencial e ganhariam energia cinética, suficiente para carregá-los para fora do átomo. Devido à baixa dissipação de energia da radiação, o tempo de vida médio do átomo seria muito longo (Thomson, 1904).

Quanto à importância da figura de Thomson, basta dizer que a maior parte da física atômica da primeira década do século XX se desenvolveu a partir de suas ideias sobre a possível estrutura atômica. Assim, Rutherford escreveu: "a ciência deve muito ao trabalho de Sir J. J. Thomson, tanto pela ousadia de suas ideias quanto por sua engenhosidade no desenvolvimento de métodos para estimar o número de elétrons no átomo e na investigação de sua estrutura" (Rutherford, 1923, p. 410, tradução própria), e em uma entrevista citada por Aaserud e Heilbron (2013), Bohr se refere a Thomson como o "gênio que realmente mostrou o caminho para todos" (p. 117).

Em 1895, Rutherford foi o primeiro estudante estrangeiro a trabalhar no Cavendish, sob a direção de Thomson. Suas investigações iniciais foram sobre ondas hertzianas e o efeito dos raios X nos gases, descobrindo que eles podiam ionizar o ar, desenvolvendo assim uma técnica para medir a velocidade dos íons. A descoberta da radiação representou um enorme avanço na determinação da estrutura dos átomos. Em 1898, ele começou a trabalhar na Universidade McGill, no Canadá, onde estudou o poder de penetração das radiações, ao cobrir a amostra de urânio com folhas de metal de diferentes espessuras e foi assim que ele descobriu que o urânio emitia dois tipos de radiação, chamando α , menos penetrante, e β , mais penetrante e com menor poder ionizante. Os radioativos, raios α e raios β . Juntamente com Frederick Soddy (1877-1956), formularam a teoria da transformação radioativa, segundo a qual corpos radioativos contêm átomos instáveis, uma fração fixa dos quais decai por unidade de tempo, para tornar-se átomos diferentes e mais estáveis. (Marques, 2006).

Em 1907, ele deixou Montreal para se tornar professor na Universidade de Manchester, onde fez a maior descoberta de sua carreira, após ter recebido o Prêmio Nobel de Química em 1908, a existência de uma região central de carga e massa, que mais tarde seria conhecida como núcleo do átomo. Ele iniciou sua pesquisa com Geiger e, em 1908, publicaram artigos sobre métodos diretos para contar o número de partículas α , uma vez que, a partir disso, a carga de cada partícula poderia ser conhecida e o problema da natureza da partícula α poderia ser resolvido. Em seguida, com Geiger, eles estudaram o espalhamento de partículas α e β à medida que passavam por finas folhas de ouro e alumínio. Um dos principais objetivos dos experimentos era determinar a quantidade relativa de energia perdida pelas partículas ao atravessarem os materiais, considerando as interações atômicas, cujo modelo atômico foi o de Thomson. No entanto, a partir do momento em que obteve os primeiros resultados, percebeu sua importância para a compreensão da estrutura dos átomos (Marques, 2206).

Em 1909, Geiger tinha Ernest Marsden (1889-1970) como seu assistente, a quem Rutherford incumbiu de investigar se alguma partícula α era dispersa em um grande ângulo,

embora ele próprio não acreditasse que isso fosse possível. Naquele mesmo ano, Geiger e Marsden relataram a descoberta de um número relativamente grande de partículas alfa dispersas atrás da placa de metal, cuja probabilidade era praticamente zero; esse foi o resultado que mais impressionou Rutherford. e o encorajou a propor o núcleo atômico (Baily, 2013).

Esses experimentos mostraram que o rebote das partículas α aumentava com a massa atômica do material da placa refletora e que seu número dependia da espessura da placa. O mesmo se aplicava para o rebote das partículas β , deixando claro que esse rebote ocorria essencialmente dentro do material. Tal fato era inacreditável, considerando o modelo atômico de Thomson, a massa e a velocidade da partícula α . Geiger estimou o ângulo médio de espalhamento causado por um encontro com um átomo, conforme proposto por Thomson, em $1/200$ de grau, portanto, a probabilidade de uma partícula α se espalhar em um ângulo grande devido a múltiplos encontros atômicos seria quase nula. Geiger não especulou sobre as razões que poderiam explicar essa disparidade, e foi Rutherford quem o faria um ano depois (Baily, 2013).

Dos resultados obtidos, ele concluiu que o modelo atômico de Thomson não explicava adequadamente as deflexões das partículas α e β , para ângulos maiores que 90° porque estas partículas atravessariam os átomos esféricos de Thomson sem sofrer qualquer interação apreciável. Embora Thomson fosse uma autoridade e seu modelo atômico não fosse descartado, Rutherford mostrou que o raio da esfera de carga teria que ser muito pequeno em comparação com a distância da interação com a partícula α . Portanto, em 1911, formulou um novo modelo de estrutura simples, com uma carga elétrica $\pm Ne$, e a massa concentradas em uma região central com raio dez mil vezes menor que o raio do átomo. Ele também demonstrou que o espalhamento devido a encontros com elétrons atômicos poderia ser ignorado, de modo que o átomo poderia ser neutralizado com uma quantidade igual de carga oposta distribuída uniformemente por toda a esfera atômica maior. Esse modelo explicou melhor os resultados experimentais e mostrou que o átomo é essencialmente espaço vazio, mas negligenciava a configuração dos elétrons atômicos e deixava muitas dúvidas sobre a estabilidade dinâmica do átomo nuclear (Rutherford, 1914).

Rutherford estava ciente de que seu modelo exigia corroboração total e que alguns problemas precisavam ser resolvidos, por exemplo, o valor e o sinal de N . Ele determinou o sinal comparando as taxas de absorção previstas com a absorção observada de raios β , que deveriam ser mais afetadas por uma carga nuclear positiva do que por uma negativa.

O modelo de Rutherford tinha dois problemas: 1) elétrons em órbita são continuamente acelerados em direção ao núcleo, mas, de acordo com a eletrodinâmica clássica, a aceleração

de partículas carregadas deve emitir radiação eletromagnética e perder sua energia, levando à redução contínua da órbita do elétron e ao colapso do elétron com o núcleo, levantando dúvidas sobre a estabilidade da matéria. 2) Os elétrons podem ter quantidades arbitrárias de energia, mas o raio da órbita (que determina a energia potencial) e a velocidade com que se movem na órbita (que determina a energia cinética) devem ser consistentes entre si para que a órbita seja estável. Dadas duas variáveis e uma restrição (manutenção da órbita), uma variável é livre para assumir qualquer valor. Consequentemente, a energia do elétron pode assumir qualquer valor. Como a energia tem uma faixa contínua, a faixa de frequência que pode ser observada no espectro de emissão ou absorção também deve ser contínua. Experimentalmente, no entanto, obtém-se um espectro de linhas discretas (Prasad, 2013).

4.2 ABORDAGEM DE BOHR

A solução para esses problemas deu origem à nova era quântica, cujos primórdios podem ser encontrados nos artigos de Bohr escritos entre agosto de 1912 e agosto de 1915, especialmente na trilogia de 1913. Em Manchester, ele ficou fascinado pelas experiências de colisão entre elétrons e partículas α e pelo sucesso desse novo tipo de física: (Weinberger, 2014).

Em Cambridge, Bohr teve acesso ao livro de Larmor, *Aether and Matter*, que lhe chamou a atenção, especialmente por sua abordagem epistemológica. Durante sua estadia em Manchester, aproveitou a oportunidade para estudar a transmutação de elementos durante o decaimento radioativo, o que o levou à compreensão da existência de isótopos. Com base no modelo de Rutherford, Bohr apontou que a partícula α emitida deveria se originar do núcleo, independentemente do ambiente eletrônico circundante, reduzindo a carga nuclear em duas unidades. A partir disso, ele explicou por que o decaimento α do urânio dá origem a um elemento quimicamente idêntico ao tório, que está localizado duas posições antes do urânio na tabela periódica. A partir disso, ele deduziu que a posição de um elemento na tabela periódica é determinada por sua carga nuclear (Prasad, 2013).

Embora Bohr tivesse sólida formação em física teórica e experimental, ele era profundamente atraído por problemas teóricos. Sua primeira tentativa de modelar o átomo foi mais diretamente influenciada pelas teorias recentes de Charles G. Darwin sobre absorção e de J.J. Thomson sobre processos de ionização. Darwin havia assumido um modelo no qual a perda de energia cinética de uma partícula α ao atravessar a matéria se devia principalmente ao encontro com elétrons atômicos em repouso, livres de qualquer interação eletrostática, tanto

entre si quanto com o núcleo. Além disso, a trajetória da partícula α só seria afetada ao entrar em um átomo. Assim, suas equações dependiam de dois parâmetros desconhecidos: o número de elétrons no átomo e o raio atômico. No entanto, ele concluiu que o número de elétrons em um átomo estava em algum lugar entre a massa atômica e sua metade, com exceção do hidrogênio (Prasad, 2013).

Bohr viu muitas dificuldades na proposta de Darwin e decidiu trabalhar nela, mesmo já estando na Dinamarca. Assim, em janeiro de 1913, ele publicou o artigo *On the theory of the decrease of velocity of moving electrified particles on passing through matter*, no qual ele afirmou que o cálculo das taxas de absorção α é simples, assumindo elétrons livres, mas elas são inadequadas para calcular a perda total de energia. Thomson havia encontrado dificuldades semelhantes ao desenvolver suas teorias de ionização (também com elétrons livres), que ele resolveu introduzindo uma distância de corte na interação, comparável à distância média entre elétrons atômicos. Para Thomson, incluir forças atrativas sobre os elétrons não produziria resultados muito diferentes, pois os tempos de interação eram muito menores do que os períodos vibracionais desses elétrons (Bohr, 1913a)

Thomson baseou sua escolha de critério em cálculos que mostravam que os efeitos de elétrons mais distantes no caminho de espalhamento tinham maior tendência a se anularem. Para Bohr, esse critério era adequado para espalhamento, mas não para descrever a transferência de energia cinética para elétrons ligados, uma vez que a interação de uma partícula α com um oscilador individual seria quase independente da presença de outros elétrons. Ele então introduziu um parâmetro de corte diferente, modelando elétrons atômicos como osciladores harmônicos (inicialmente em repouso) para comparar os tempos de interação com os períodos de vibração induzida. Como resultado, a influência na trajetória de uma partícula α seria maior se o período de oscilação induzida e o tempo de interação fossem comparáveis, e diminuiria significativamente se o tempo de interação fosse muito maior que o período induzido, como é o caso com elétrons mais distantes.

Bohr fez uma analogia entre sua teoria e a dispersão de luz, onde a resposta dependente da frequência de um meio dispersivo a diferentes comprimentos de onda de luz poderia ser comparada às diferentes frequências de oscilação eletrônica induzidas por partículas α passando a diferentes distâncias.

Como afirma Baily (2013), "as suposições que Bohr utilizou para derivar sua fórmula para a taxa de absorção de partículas α tornaram sua teoria muito adequada para tirar conclusões a partir de dados experimentais" (p. 30) sobre hidrogênio molecular e hélio. Além disso, ao assumir que o hélio e o hidrogênio molecular tinham exatamente dois elétrons, os cálculos de

Bohr estavam muito próximos das taxas de absorção medidas para ambos os gases, bem como para o oxigênio e outros elementos. Além destes resultados, Bohr utilizou a teoria da radiação de Max Planck no contexto de átomos, embora não tenha sido o primeiro a fazê-lo, para estimar as maiores frequências vibracionais no oxigênio molecular, a partir da quantidade mínima de energia que um vibrador atômico pode irradiar.

Depois que Planck propôs sua teoria do quantum de ação, os físicos começaram a debater sua interpretação física, se era ou não uma grandeza puramente termodinâmica, ou qual era a sua natureza. Assim, em 1909, Einstein suspeitou que ele pudesse ter alguma relação com a unidade fundamental de carga, enquanto Wien acreditava que a quantização da energia provavelmente se devia a alguma propriedade universal dos átomos. Em 1910, Arthur E. Haas (1884-1941) estabeleceu uma conexão entre a estrutura atômica e o valor numérico da constante de Planck, h . Em 1912, John W. Nicholson (1881-1955) repetiu os cálculos de Thomson de 1904 para um átomo hipotético com um núcleo de carga $+5e$ (ele chamou protoflúor), para explicar certas frequências espectrais na coroa solar. Ele utilizou a teoria de Planck para permitir que a energia de um oscilador atômico variasse apenas em múltiplos inteiros de h . No entanto, ele considerou mais plausível imaginar que o momento angular de um anel de elétrons pudesse mudar em uma quantidade discreta devido à perda ou adição de um elétron do que considerar a quantização de energia (Baily, 2013)

Bohr, preocupado com a instabilidade mecânica e eletrodinâmica dos modelos atômicos, incluindo o de Rutherford, como ele expressou claramente em diversas ocasiões:

É evidente que sistemas como o átomo nuclear, se baseados nas concepções mecânicas e eletrodinâmicas usuais, não possuíam estabilidade suficiente nem mesmo para produzir um espectro constituído por linhas nítidas (Bohr, 1922, p. 21, tradução própria).

apesar da visão da mecânica newtoniana sobre a harmonia dos movimentos planetários expressa pelas leis keplerianas, as propriedades de estabilidade de modelos mecânicos como o sistema solar, que quando perturbados não têm tendência a retornar ao seu estado original, claramente não apresentam semelhança suficiente com a estabilidade intrínseca das configurações eletrônicas dos átomos, que é responsável pelas propriedades específicas dos elementos (Bohr, 1958, p. 17, tradução própria).

apresentou suas hipóteses na chamada trilogia, em 1913.

No primeiro artigo da trilogia, Bohr (1913b) apresentou duas hipóteses gerais para desenvolver sua teoria. A primeira hipótese afirmava que os elétrons atômicos se movem em órbitas elípticas estacionárias e discretas ao redor de um núcleo massivo, o que poderia ser

calculado usando "mecânica comum", desconsiderando a instabilidade radiativa, o seja, sem energia de radiação. Em seu raciocínio, ele primeiro estabeleceu a energia de ionização W para um átomo de elétron único, igual à energia cinética do elétron em seu estado mais fortemente ligado, supondo que a massa do elétron, m , seja desprezível em comparação com a do núcleo, M , e que a velocidade do elétron seja pequena em comparação com a da luz.

Representando a carga do elétron como e , a carga do núcleo como E , a frequência de revolução, ω , e o eixo maior da órbita, $2a$, do elétron em seu estado de menor energia, serão dados por:

$$\omega = \sqrt{2}M^{3/2} / \pi eEm^{1/2} \quad 2a = eE/W \quad (3.2)$$

A partir dessas equações, obtém-se a equivalência entre a energia de ionização e a energia cinética do elétron: $W = \frac{m}{2}(2a\pi\omega)^2 = \frac{1}{2}mv^2$ (Bohr, 1913b)

Na segunda hipótese, ele assumiu que a ligação eletrônica emite radiação homogênea de frequência ν , igual à metade da frequência de revolução do elétron em sua órbita mais próxima do núcleo. Então, com base na teoria de Planck, a energia emitida no processo seria igual a $n h\nu$, onde h é a constante de Planck e n é um número inteiro. Assumindo que a radiação emitida é homogênea, esta segunda suposição, é justificada; se o elétron se estabilizasse no estado fundamental após a captura, a energia irradiada seria exatamente igual à energia de ionização, W (Bohr, 1913b):

$$W = n h\nu = n h(\omega/2) \quad (3.3)$$

Substituindo a equação (3.3) em (3.2), Bohr chegou a expressões para a energia de ionização, W , a frequência de revolução, ω , e o raio orbital, a , em termos de constantes fundamentais:

$$W = \frac{2\pi^2 me^2 E^2}{n^2 h^2}, \quad \omega = \frac{4\pi^2 me^2 E^2}{n^3 h^3}, \quad 2a = \frac{n^2 h^2}{2\pi^2 meE} \quad (3.4)$$

Se forem atribuídos valores diferentes a n nessas expressões, obtém-se uma série de valores para W , ω e a que correspondem a uma série de configurações do sistema, ou seja, estados do sistema nos quais não há radiação de energia. Estados que, consequentemente, serão estacionários enquanto o sistema não for perturbado externamente. Pode-se observar que o maior valor de W ocorre quando n é 1. Este caso, portanto, corresponderá ao estado mais estável do sistema, ou seja, corresponderá à ligação eletrônica para cuja quebra é necessária a maior quantidade de energia (Bohr, 1913b).

Em relação à equação (3.3), Bohr não forneceu maiores esclarecimentos sobre por que a frequência dos quanta de luz emitidos na captura de um elétron seria igual à metade de sua

frequência orbital final, exceto para dizer que tal suposição "se sugere, uma vez que a frequência de revolução no início da emissão é 0" (Bohr, 1913b, p. 5). Portanto, ele pode ter pensado na frequência irradiada como a média das frequências orbitais inicial e final do elétron. De qualquer forma, a justificativa final seria a concordância de seus resultados com os dados experimentais, embora ele posteriormente recorresse ao seu princípio de correspondência para mostrar que, para transições entre estados de energia mais elevados, $W = n h \omega / 2$ segue logicamente, uma vez que as frequências orbitais e espectrais são aproximadamente iguais, como seria de se esperar da eletrodinâmica clássica.

A concordância entre a ordem de grandeza dos valores observados para as frequências emitidas e dimensões dos átomos e os valores calculados era bastante impressionante para a comunidade científica da época. Por exemplo, o trabalho de J. Nicholson sobre os espectros de linha da coroa solar, em que mostrou que as relações entre os comprimentos de onda dos conjuntos de linhas espectrais poderiam ser explicadas assumindo que a razão entre a energia do sistema e a frequência de rotação do anel é igual a um múltiplo inteiro da constante de Planck. (Bohr, 1922).

Apesar de reconhecer o trabalho de Nicholson, Bohr levantou algumas objeções relacionadas à homogeneidade da radiação emitida. Nos cálculos de Nicholson, a frequência das linhas no espectro, ν , é identificada com a frequência de vibração, ω , de um sistema mecânico. No entanto, utilizando a teoria de Planck, a radiação deveria ser emitida em quanta; mas sistemas como os considerados, nos quais a frequência é uma função da energia, não podem emitir uma quantidade finita de radiação homogênea, uma vez que, iniciada a emissão de radiação, a energia e a frequência do sistema são alteradas. Além disso, como a teoria de Nicholson é apresentada, ela não parece ser capaz de explicar as leis de Balmer e Rydberg (Bohr, 1922).

Ainda mais surpreendente é a aplicação da equação (3.4) para o espectro do hidrogênio. Assumindo dois estados estacionários, a quantidade de energia irradiada, W_r , pelo sistema na transição do estado estacionário $n = n_1$ para o estado estacionário $n = n_2$, é:

$$W_{r2} - W_{r1} = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \quad (3.5)$$

Como a energia irradiada é homogênea e discreta em quantidades $h \nu$, então pode ser equalizado: $W_{n2} - W_{n1} = h \nu$, portanto, a frequência da emissão, ν , é:

$$\nu = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \quad (3.6)$$

Neste ponto, Bohr destaca que:

Observamos que essa expressão explica a lei que conecta as linhas no espectro do hidrogênio. Se definirmos $n_2 = 2$ e deixarmos n_1 variar, obtemos a série de Balmer comum. Se definirmos $n_2 = 3$, obtemos a série no ultra vermelho observada por Paschen e anteriormente suspeitada por Ritz. Se definirmos $n_2 = 1$ e $n_1 = 4, 5, \dots$, obtemos séries, respectivamente, no ultravioleta extremo e no ultra vermelho extremo, que não são observadas, mas cuja existência pode ser esperada (Bohr, 1913, p. 9, tradução própria).

O fator constante que acompanha a expressão no lado direito da equação 3.6 faz parte da constante de Rydberg e esse foi outro aspecto que deu muito apoio à teoria de Bohr. Ele então substituiu os valores da massa, da carga do elétron, e da constante de Planck, e obteve que: $2\pi^2me^4/h^3 = 3.1 \times 10^{15}$, cujo valor observado era 3.29×10^{15} . A concordância foi tanto quantitativa quanto qualitativa, contribuindo para o prestígio de Bohr. No entanto, foi transmitida a mensagem de que bastava combinar a mecânica clássica com a fórmula de radiação de Planck, uma abordagem que gozava de popularidade na comunidade da física, mas que se mostrou contraproducente (Weinberger, 2014). Apesar da popularidade dessa abordagem, as discrepâncias com os resultados experimentais abriram caminho para a concepção de uma nova teoria, que ficou conhecida como a segunda teoria quântica.

Com o prestígio de ter descrito teoricamente o espectro de linhas do hidrogênio, Bohr tentou explicar o espectro do átomo e das moléculas de hélio. Para o átomo, ele usou a mesma equação, definindo $E = 2e$, com um único elétron. Ele obteve a seguinte frequência de radiação:

$$\nu = \frac{8\pi^2me^4}{h^3} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) = \frac{2\pi^2me^4}{h^3} \left(\frac{1}{(n_2/2)^2} - \frac{1}{(n_1/2)^2} \right)$$

Para as moléculas, a situação era muito mais complicada, e inicialmente Bohr só pôde sugerir uma equação baseada na teoria de Rydberg:

$$\nu = F_r(n_1) - F_s(n_2), \text{ onde } F_1, F_2, F_3, \text{ são funções de } n.$$

O fato de a frequência aparecer como a diferença entre duas funções inteiras sugere uma origem para as linhas espectrais semelhante à assumida para o hidrogênio; ou seja, que as linhas correspondem à radiação emitida durante a transição do sistema entre dois estados estacionários diferentes. Para sistemas que contêm mais de um elétron, a situação é muito mais difícil, uma vez que haverá muitas configurações diferentes do elétron que podem ser consideradas estados estacionários (Bohr, 1913b).

Bohr também demonstrou que sua própria abordagem era matematicamente equivalente a assumir que o momento angular do elétron no estado fundamental era $h / 2\pi$, embora fosse cauteloso em sua linguagem e reticente quanto a qualquer interpretação mecânica de sua teoria usando conceitos macroscópicos. Embora valorizasse a atenção de Nicholson à conexão entre o momento angular e a constante de Planck, já estava claro para ele que a mecânica ordinária não poderia ser universalmente válida, uma vez que um conjunto fixo de frequências espectrais exigiria que os elétrons orbitassem a velocidades constantes por períodos finitos; o que era impossível (Baily, 2013).

Experimentos subsequentes desafiaram seu modelo mais seriamente do que as evidências experimentais disponíveis quando ele o desenvolveu. Seu modelo foi estendido por Arnold Sommerfeld (1868-1951) para estados estacionários elípticos para interpretar a estrutura fina vista quando espectrômetros de melhor resolução se tornaram disponíveis¹⁸. Isso levou à identificação de um novo número quântico orbital, l , além do principal, n , proposto por Bohr. No processo, ele também substituiu a condição de quantização do momento angular por uma condição de quantização de fase integral, seguindo o trabalho anterior de Charles T Wilson. O mesmo aconteceu com o efeito Zeeman, que consiste na divisão das linhas espectrais na presença de campos magnéticos externos, o que não poderia ser explicado pela teoria de Bohr.

Para explicar isso, Sommerfeld introduziu um terceiro número quântico magnético, m_l , para indicar a orientação espacial do plano em que os elétrons orbitam em relação a um único eixo -a direção do campo magnético. A descoberta do número atômico e do princípio de Aufbau ajudou a justificar a tabela periódica. A hipótese da dualidade de Louis de Broglie (1892-1987) justificou a quantização do momento angular. No entanto, as características espectrais de átomos multieletrônicos não tinham nenhuma resposta possível no modelo de Bohr. Da mesma forma, as intensidades espectrais de várias transições, onde algumas linhas são brilhantes e outras são tênues, não podem ser explicadas pelo modelo. Nessas condições, ficou claro que o modelo não poderia ir além. A mecânica quântica, que surgiu uma década depois, forneceu as respostas, bem como a interpretação correta dos números quânticos que Bohr e Sommerfeld definiram (Prasad, 2013).

Em qualquer caso, pode-se dizer que Bohr reescreveu as leis da física ao decretar que os elétrons orbitam com energia constante e que, portanto, as frequências espectrais e orbitais não poderiam ser as mesmas, e que uma transição entre estados de energia estacionários era

¹⁸ Este é mais um exemplo da importância do desenvolvimento instrumental para o avanço da ciência, o que é altamente valorizado na perspectiva da história estratificada.

necessária, por meio da emissão ou absorção de quanta de luz, contrastando claramente com as ideias convencionais da eletrodinâmica. Mesmo assim, Bohr continuou a recorrer às expectativas clássicas para fundamentar e interpretar sua teoria, o que é compreensível considerando a enorme dificuldade epistemológica de expressar novos conceitos dentro dos limites de ideias antigas, o que, aliás, de certa forma, implicava uma mudança ontológica crucial e sua correspondente crise.

As preocupações de Bohr com a linguagem evocam alguns aspectos do pensamento de Wittgenstein, levantados em sua segunda obra, *Philosophical Investigations*, já que “cada um teve que substituir a aparente ordem e certeza por uma compreensão baseada em conceitos limitados e em constante transformação” (Stenholm, 2011, p. 4, tradução própria), embora não houvesse uma relação direta entre eles. Mas

Tanto Bohr quanto Wittgenstein enfatizaram muito o papel da linguagem em nossa abordagem da realidade. Eles sentiam uma forte responsabilidade quando os pensamentos se transformavam em textos. Ambos perceberam que as percepções intuitivas sobre o mundo não eram facilmente expressas em palavras; na verdade, ambos duvidavam da possibilidade de expressar algo essencial em palavras, “Sobre aquilo que não se pode falar, deve-se calar”. Consequentemente, ambos preferiam trabalhar por meio da comunicação oral (Stenholm, 2011, p 24., tradução própria).

Em particular, a ideia de que os limites da linguagem significam os limites do mundo, visto que Bohr estava particularmente preocupado com os limites da linguagem científica na explicação da realidade e com a ambiguidade que a linguagem representa em seu uso, entendendo que o significado e as regras da linguagem são sociais e não podem ser limitados a sensações ou experiências individuais (Stenholm, 2011). Assim, ele estabeleceu uma analogia com funções multivaloradas: se uma palavra tem múltiplos significados, é necessário determinar o "plano de objetividade" ao qual a palavra se refere. Desta forma, a linguagem clássica era para ele a linguagem para referir, sem ambiguidade, a física quântica. Essa analogia foi uma forma de entender como interpretações conflitantes poderiam existir simultaneamente, e ser complementarias para a descrição completa da realidade (Strathern, 1999).

Bohr argumenta que

A teoria quântica é caracterizada pelo reconhecimento de uma limitação fundamental nas ideias físicas clássicas quando aplicadas a fenômenos atômicos. A situação assim criada é de natureza peculiar, visto que nossa interpretação do material experimental se baseia essencialmente em conceitos clássicos (Bohr, 1961, p. 53, tradução própria).

Bohr apresentou a complementaridade pela primeira vez no Congresso de Como em 1927, com a conferência intitulada *The Quantum postulate and the recente development of Atomic theory*, onde apresentou os princípios da descrição de fenômenos atômicos e os problemas para a mecânica clássica. De fato, a Complementaridade pode ser considerada um esforço ao longo da sua vida para compreender o significado do postulado quântico, concebido como um elemento fundamental para a compreensão da constituição última da natureza (Plotnitsky, 2007).

De acordo com Navarro (2010), a complementaridade é baseada em três aspectos empíricos: 1) o quantum de ação: que é universal e dá um caráter de indivisibilidade e totalidade aos fenômenos, relacionado por Bohr ao postulado quântico. 2) Implicações do postulado quântico: descontinuidade nos fenômenos da natureza, caráter indivisível e incontrolável da interação entre o sistema físico e o aparelho de medição, renúncia ao uso simultâneo de descrições espaço-temporais e causais, então uma nova estrutura conceitual deve ser desenvolvida que acomode fenômenos atômicos e estabeleça a maneira como os conceitos devem ser usados. 3) Dualidade onda-partícula: manifesta-se na existência de dois formalismos consistentes para descrever fenômenos que são mutuamente exclusivos, mas necessários para descrever todo o fenômeno.

O argumento parte de uma afirmação ontológica: a existência do quantum de ação. A partir dessa afirmação, Bohr apresenta as consequências epistemológicas e metodológicas para a ciência. O quantum de ação exige uma revisão das ideias epistemológicas e ontológicas do marco clássico (Navarro, 2010). Com o quantum de ação, Bohr propõe o postulado quântico, "que atribui a todo processo atômico uma descontinuidade essencial, ou melhor, uma individualidade completamente alheia às teorias clássicas" (Bohr, 1961, p. 53, tradução própria). Apesar das dificuldades envolvidas na formulação da teoria quântica, Bohr sugere que sua essência pode ser expressa no chamado postulado quântico, que atribui a todo processo atômico uma descontinuidade essencial, ou melhor, uma individualidade, completamente alheia às teorias clássicas e simbolizada pelo quantum de ação de Planck (Navarro, 2010). Essa ruptura com a continuidade impõe uma revisão epistemológica dos conceitos de observação, causalidade e do ideal descritivo clássico (Cadenas, 2003).

Segundo Bohr (1961), o quantum da ação, portanto, implica que a própria natureza limita nossa capacidade de falar de fenômenos como objetivamente existentes. Mas isso não deve ser considerado um obstáculo à compreensão da natureza; devemos simplesmente nos preparar para a necessidade de uma abstração cada vez maior de nossas demandas habituais pelas descrições pictóricas e causais da mecânica clássica. Isso é especialmente verdadeiro na

área em que a teoria quântica encontra a teoria da relatividade. No entanto, precisamos ser capazes de comunicar os resultados da ciência, e é por isso que Bohr diz:

Como o objetivo da ciência é ampliar e ordenar nossa experiência, qualquer análise das condições do conhecimento humano deve se basear em considerações sobre a natureza e o escopo de nossos meios de comunicação. Nossa base é, naturalmente, a linguagem desenvolvida para orientação em nosso ambiente e para a organização de comunidades humanas. No entanto, o aumento da experiência tem repetidamente levantado dúvidas sobre a suficiência dos conceitos e ideias incorporados à linguagem cotidiana. Devido à relativa simplicidade dos problemas físicos, eles são especialmente adequados para investigar o uso de nossos meios de comunicação. De fato, o desenvolvimento da física atômica nos ensinou como, sem abandonar a linguagem comum, é possível criar uma estrutura suficientemente ampla para uma descrição abrangente de novas experiências (Bohr, 1958, p. 88, tradução própria).

Como a informação dos átomos é expressa em conceitos clássicos, e estes são definidos por meio de imagens espaço-temporais, eles não podem ser descartados. Entre outras coisas, isso se deve ao fato de que são precisamente os conceitos clássicos que se referem às manifestações fenomenais dos sistemas quânticos. Por exemplo, os conceitos de onda e partícula, intimamente ligados à visualização espaço-temporal, tornam-se ambíguos quando a continuidade desaparece nos fenômenos quânticos. Portanto, os fenômenos atômicos estendem a experiência à ordem das coisas que não podem ser observadas, mas cuja existência permite testar teorias e dar-lhes conteúdo, embora não nos termos do ideal clássico de objetividade, pois:

Agora, o postulado quântico implica que qualquer observação de fenômenos atômicos envolverá uma interação com o instrumento de observação, o que não deve ser negligenciado. Consequentemente, uma realidade independente, no sentido físico comum, não pode ser atribuída nem aos fenômenos nem aos instrumentos de observação. Afinal, o conceito de observação é arbitrário, pois depende de quais objetos estão incluídos no sistema a ser observado. [...] o fato de que noções teóricas devem sempre ser utilizadas na interpretação de observações implica que, para cada caso particular, é uma questão de conveniência quando introduzir o conceito de observação implícito no postulado quântico, com sua inerente "irracionalidade" (Bohr, 1961, p.54, tradução própria).

Aqui, então, há uma ruptura epistemológica, uma vez que os ideais clássicos de objetividade e continuidade, que justificam a observação como um processo independente do observador ou, pelo menos, permitem o controle de qualquer interferência, não são mais possíveis como consequência da existência do quantum de ação. Isso necessita de uma nova

perspectiva epistemológica, que Bohr postula como complementaridade. Além disso, ele abriu uma nova linha no debate realismo-antirrealismo, defendendo uma ou outra posição em relação ao pensamento de Bohr. Assim, deve-se considerar que a tese central de Bohr é que o quantum de ação é estranho à teoria clássica, tornando, assim, as descrições de fenômenos atômicos irracionais dentro da estrutura espaço-temporal clássica (Navarro, 2010).

As afirmações de Bohr de que ocorre uma interação entre o objeto e o instrumento de medição implicam a existência de uma realidade externa com a qual o instrumento interage. Por outro lado, o fenômeno quântico não pode receber o status de uma realidade independente, pois ele próprio é um produto da interação. De acordo com essas abordagens, é preciso considerar que Bohr tem um ar de realismo (Cadenas, 2004).

A complementaridade não está presente apenas na dualidade onda-partícula, mas também se manifesta na descrição espaço-temporal e na causalidade, cuja união é sustentada nas teorias clássicas, mas mutuamente exclusiva na teoria quântica, sendo necessária para uma representação exaustiva da realidade. Bohr apresenta a complementaridade como o marco conceitual que explica as relações de incerteza, entendendo que estas são a expressão matemática do fato de que, na mecânica quântica, é impossível manter o ideal clássico de descrição além dos limites da aplicação dos conceitos clássicos (Cadenas, 2004).

A apresentação de Bohr da observação como interação gerou confusão, pois se poderia pensar que ele estaria propondo uma perturbação da observação no estado do sistema. No entanto, nesse caso, as relações de incerteza seriam o resultado de tal perturbação e, conseqüentemente, o sistema seria incognoscível, o que contraria a proposta de Bohr. Na realidade, o que ele propõe é que a observação do objeto real implica interação com o aparelho de medição, de modo que os fenômenos observados não são exatamente os do objeto real, mas sim o produto da interação. Portanto, não se pode atribuir uma realidade, no sentido clássico, a os fenômenos observados, os sistemas físicos não existem em estados clássicos e os objetos não podem ser definidos por estados mecânicos clássicos, uma vez que a observação não pode ser descrita como se o objeto e o aparelho de medição tivessem uma realidade independente (Navarro, 2010).

O próximo evento no desenvolvimento da filosofia de Bohr foi o confronto com Einstein, Podolsky y Rosen, EPR, começando pelo artigo publicado por eles em 1935, *Can Quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?* Nesse artigo, eles pretendiam demonstrar a incompletude da mecânica quântica. Embora não tenha recebido muita atenção na época, foi objeto de intenso debate após os artigos publicados por John Bell (1928-1990) em 1960. Além disso, é muito importante no desenvolvimento do pensamento de

Bohr e nos permite ver suas ideias em contraste com uma perspectiva diferente da sua (Navarro, 2010).

O ponto de partida do argumento da EPR é que os conceitos devem corresponder à realidade objetiva, seja de realidade da física clássica e quântica. Ambas as suposições são mantidas por Einstein durante as discussões que se seguirão à publicação do artigo. Com base na incomutabilidade de duas variáveis, EPR deduz que: 1) a descrição da realidade dada pela mecânica quântica é incompleta ou 2) quando os operadores correspondentes a duas grandezas físicas não comutam, as duas grandezas não podem ter realidade simultânea (Landsman, 2006).

A partir deste ponto, eles propõem uma redução ao absurdo: partem de negar a proposição 1), ou seja, que o estado quântico de um sistema contém todas as informações possíveis sobre ele. O argumento chegou ao ponto de demonstrar que, se 1) for válido, então podemos associar autofunções de momento e posição ao mesmo sistema. Aplicando o critério de realidade, cada uma delas corresponderia a uma realidade diferente, visto que estar em uma autofunção implica que o único valor possível do operador correspondente é o autovalor associado.

Isso equivalia a negar a opção 2), a única alternativa restante. A partir disso, conclui-se que a descrição da realidade dada por funções de onda não é completa, pois chegou ao absurdo de descartar as duas únicas opções. No entanto, para EPR, a teoria quântica está correta porque permite que previsões sejam feitas com certeza sobre certas variáveis. Consequentemente, juntamente com o critério de realidade, eles acreditam que ela permite afirmar a existência dessas variáveis como elementos da realidade (Landsman, 2006).

A falha é que ela não consegue prever o valor de todos os elementos da realidade simultaneamente, por isso consideram a teoria incompleta. Para Bohr, o argumento da EPR é admirável e aparentemente incontestável, mas, mesmo assim, o argumento não faz justiça à nova situação em que a física se encontra ao lidar com o domínio atômico. Embora a nova teoria não atenda às expectativas de oferecer uma descrição completa no estilo clássico, ela se enquadraria em seu escopo como uma descrição completamente racional dos fenômenos físicos. A caracterização desse novo escopo é o que marca o argumento da resposta, baseado na complementaridade e na epistemologia de 1929 (Landsman, 2006).

À medida que a ciência se desenvolveu, tornou-se claro que imagens físicas e modelos do que acontece em escalas além do alcance dos nossos sentidos são meramente auxiliares da nossa imaginação. Mas também era ilegítimo criticar a teoria por isso, porque, como Kant demonstrou inicialmente, a teoria é mais do que um catálogo de sensações. Teorizar não é rotina, mas uma atividade carregada de criatividade que busca compreender a natureza formal

das conexões entre diferentes entidades físicas. A teoria de Bohr surgiu em um momento de crise na mecânica clássica; novos experimentos exigiam novos conceitos e sua expressão formal. Planck e Einstein tiveram sucesso em desenvolver uma descrição fenomenológica dos sistemas físicos; Bohr fez o mesmo ao postular a existência de estados estacionários no átomo, que tem sido, talvez, a característica mais duradoura de sua obra. Bohr abriu caminho para o desenvolvimento subsequente da nova mecânica quântica (Prasad, 2013).

5 ALGUMAS IMPLICACIONES DIDÁCTICAS DEL MODELO ATÓMICO DE BOHR

Do ponto de vista do ensino de ciências naturais, a transposição de modelos científicos para modelos didáticos tem sido questionada. Pesquisas educacionais demonstram que a conversão realizada não tem sido a mais adequada e, ao contrário, tem contribuído para as chamadas distorções da atividade científica e para a simplificação indevida de modelos científicos, exacerbando as atitudes negativas dos alunos em relação à ciência e o fracasso acadêmico (Moreno; Gallego; Pérez, 2010). Nesse contexto, cabem algumas perguntas: Por que ensinar o modelo atômico de Bohr? Qual a correspondência histórica e epistemológica entre o modelo ensinado e as atividades científicas realizadas? Quais são as possíveis distorções do modelo de Bohr quando ensinado em sala de aula? Que implicações didáticas surgem do modelo de Bohr?

O estudo de modelos atômicos é um excelente tema para o ensino de habilidades científicas no ensino médio, como construção de modelos e inferência a partir de observações, formulação de hipóteses e teste de dados, bem como para a compreensão da natureza da ciência a partir de seus contextos históricos. No entanto, existem controvérsias em relação ao foco de seu ensino: se deve começar diretamente com a compreensão do modelo atual ou se deve partir de uma abordagem histórica, e se deve-se enfatizar as semelhanças ou diferenças entre a física clássica e a quântica, se deve ensinar o modelo de Bohr e como fazê-lo. Os defensores do ensino do modelo de Bohr no ensino médio argumentam que é uma etapa necessária no processo de aprendizagem; para outros, é só uma ferramenta útil para testar a mecânica quântica.

No outro extremo estão aqueles que veem o modelo de Bohr como um obstáculo à compreensão da mecânica quântica. Para eles, o único objetivo é que os alunos compreendam o modelo de Schrödinger. Mas isso não seria um objetivo válido no ensino médio, pois exclui a possibilidade de usar o contexto histórico para construir modelos, impede a compreensão da natureza da ciência e não contribui para o confronto de visões distorcidas da ciência. Além disso, não leva em consideração que os próprios cientistas frequentemente usam o modelo de Bohr quando aplicável, porque os modelos não são descartados, mas sim usados com reconhecimento de seus pontos fortes e limitações; não haveria razão para privar os alunos desse modelo.

A importância do ensino do modelo de Bohr pode ser compreendida a partir de uma perspectiva epistemológica e de seu impacto no ensino médio. Nesse sentido, podem ser identificados diferentes níveis conceituais, que o aluno deveria avaliar e desenvolver para uma

compreensão mais ampla: desde o nível empírico, em que o aluno adota o modelo como uma teoria que deve ser aplicada com precisão. Num nível seguinte, o aluno oferece uma descrição mais detalhada do modelo, apoiada por relações analógicas. Num terceiro nível, mais racional, o aluno estabelece relações entre as representações gráficas do modelo e as características específicas dos elétrons atômicos, podendo ir ainda mais longe, estabelecendo conexões entre o modelo e suas implicações sociais e ambientais.

Os estudos de Bohr lançaram as bases para a nova mecânica quântica, que representou uma ruptura epistemológica com as teorias clássicas e envolveu muitos cientistas no desenvolvimento dessa teoria nascente. Muitos teóricos se referem ao modelo de Bohr como semi-quântico porque parte de seu formalismo se baseia na mecânica clássica, mas também porque ainda está limitado à representação pictórica por meio da analogia do sistema planetário. Este é um aspecto a ser considerado ao introduzir a mecânica quântica no ensino médio, visto que os alunos geralmente preferem a linguagem visual.

Utilizando recursos visuais, seria possível ilustrar a instabilidade que Bohr buscava resolver no modelo de Rutherford, bem como as limitações e dificuldades inerentes ao seu próprio modelo, que contradizia a física estabelecida e dificultava sua compreensão, como refletido no famoso debate com Einstein sobre a interpretação da mecânica quântica. O conhecimento desses contextos históricos por parte do professor seria um recurso valioso para o ensino em sala de aula.

Por outro lado, considerando que os livros didáticos desempenham um papel central no ensino de ciências, atuando como guias tanto para o planejamento quanto para a implementação em sala de aula (Gericke; Hagberg, 2010), presume-se que a forma como os fatos são apresentados tenha efeitos tanto conceituais quanto conceituais na imagem da ciência, que é um aspecto fundamental do desenvolvimento acadêmico. Sem dúvida, uma forma de apresentação apela à visão histórica da ciência, que, no caso da química, se manifesta principalmente na apresentação de modelos atômicos. A perspectiva histórica baseia-se na crença de que os alunos podem compreender melhor as ciências escolares se conhecerem a história da ciência. No entanto, isso dependerá do tipo de história utilizada e da forma como a transposição didática é realizada, garantindo que não distorça a atividade científica ou a simplifique indevidamente, nesse sentido, Moreno; Gallego e Pérez (2010). questionam se o modelo de Bohr apresentado nos livros didáticos corresponde histórica e epistemologicamente às atividades científicas e quais são as possíveis distorções.

As conclusões de Moreno; Gallego e Pérez (2010) sobre a apresentação do modelo de Bohr nos livros didáticos foram: 1) não mostram os problemas que deram origem ao modelo,

as dificuldades que ele enfrentou ou as limitações que geraram controvérsia e levaram ao seu abandono. 2) Não consideram aspectos como a criatividade e a dúvida inerentes a toda pesquisa, a menção aos cientistas que contribuíram para o modelo carece de inter-relação, não são apresentadas tentativas de tornar o modelo um corpo coerente a partir de conceitos e experiência, embora os aspectos experimentais sejam enfatizados. 3) Não está estabelecido qual foi a consistência do modelo que despertou o interesse dos membros da comunidade de especialistas em sua corroboração, o papel das novas formulações e hipóteses que orientaram a pesquisa é ignorado. 4) O modelo foi simplificado e alguns aspectos desenvolvidos por Bohr e seus colaboradores foram omitidos.

Assim, posicionando-se a favor do ensino do modelo de Bohr no ensino médio, considerando que é urgente o ensino de conceitos científicos atuais, e considerando a importância da história da ciência para o ensino de ciências como elemento que permite identificar as ideias que estão em jogo no contexto do desenvolvimento das ideias de um autor, Bohr, neste caso, algumas implicações didáticas decorrem do estudo realizado:

Primeiramente, o estudo por meio de práticas que permitam o desenvolvimento histórico e epistemológico do modelo de Bohr permitiria aos alunos uma introdução intuitiva ao mundo da mecânica quântica, graças ao uso de analogias e da linguagem da mecânica clássica, fornecendo-lhes ferramentas para estudos futuros nos quais poderiam aprofundar seus conhecimentos. Nesse sentido, é importante ressaltar que esse modelo representa um momento de crise na ciência, o que implicou uma ruptura com os fundamentos epistêmicos da ciência clássica. Discutir esse aspecto com os alunos é fundamental para proporcionar uma introdução adequada ao mundo da mecânica quântica, com base no postulado quântico, do qual decorre uma série de consequências, inclusive para além do modelo atômico, como a proposta interpretativa da complementaridade, cujo valor pedagógico na sala de aula do ensino médio reside na sua contribuição para a compreensão da natureza da ciência, do processo científico e das suas relações com o conhecimento filosófico.

Fazer com que os alunos do ensino médio compreendam as propostas desenvolvidas por Thomson e Rutherford, com seus escopos e limitações, é um pré-requisito para a compreensão das propostas de Bohr, que podem ser avaliadas em termos das condições de possibilidade, abrindo um leque de questões hipotéticas que podem ser orientadas para o desenvolvimento de pensamento criativo e crítico. Isso requer a realização de um estudo histórico em sala de aula, levantando as questões formuladas na época, utilizando uma linguagem adequada ao nível dos alunos: considerando as evidências experimentais, qual hipótese alternativa pode ser proposta? qual era o propósito do modelo em questão proposto? O que ele pretendia resolver? O que ele

alcançou? Quais eram as suas limitações? Entendendo que cada modelo forneceu respostas específicas e que, como modelos, podem ser aplicados para propósitos específicos, o que você poderia explicar com o modelo?

Da mesma forma, no contexto da compreensão da estrutura da matéria, e considerando sua importância como conceito estruturante, a partir do qual se pode compreender muitos outros conceitos e modelos da química, a compreensão do modelo de Bohr facilita a compreensão da estrutura atômica, pois permite o uso de conceitos clássicos e a representação pictórica baseada na analogia com o sistema planetário, no qual os elétrons ocupam níveis de energia definidos. Com uma compreensão adequada do modelo de Bohr, o aluno pode compreender modelos mais avançados.

Torna-se necessário discutir com os alunos a estabilidade dos modelos atômicos, o que inclui o decaimento radioativo, mas também a estabilidade eletrônica da estrutura atômica, tanto mecânica quanto eletrodinâmica, e a partir daí, estudar espectros de emissão, quantização de energia e saltos de elétrons, que são conceitos que estabelecem a base para a mecânica quântica na estrutura atômica.

Em relação ao modelo de Bohr, sua capacidade explicativa dos espectros de emissão permite práticas contextualizadas em relação aos diferentes tipos de radiação do espectro eletromagnético, de modo que pode motivar os alunos não apenas a aprender conceitualmente, mas também a compreender que a ciência faz parte do conhecimento da sociedade e que mantém uma relação dinâmica em que os diferentes produtos da ciência produzem efeitos na sociedade.

É claro que é importante insistir que as limitações do modelo sejam claramente compreendidas. Por exemplo, no caso do modelo de Bohr, as órbitas definidas contradizem os princípios da mecânica quântica. Isso é especialmente verdadeiro no caso de ele não explicar fenômenos bem conhecidos como o efeito Stark ou o efeito Zeeman, ou sua incapacidade de explicar os espectros de átomos mais complexos. Ou seja, se não for ensinado adequadamente, pode fomentar visões erroneamente simplistas da mecânica quântica e não refletir a natureza da pesquisa atual.

Como expressei aqui, a proposta parte necessariamente do contexto histórico, em que o modelo é apresentado em sala de aula como uma etapa crucial no desenvolvimento da física e da ciência, apelando às ideias que foram discutidas e aos efeitos das propostas científicas e filosóficas apresentadas por Bohr.

6 CONCLUSÕES

Em diversos países das Américas, Europa e Ásia, há uma preocupação com o ensino e aprendizagem de química, refletida em diferentes propostas de intervenções didáticas, nas que há uma visão crítica dos métodos utilizados no ensino de química, assim como das posturas em relação aos seus fundamentos epistemológicos até pela ausência de propostas didáticas alinhadas às tendências atuais. Na América do Sul, o Brasil é o país que mais apoia a pesquisa sobre o ensino e a aprendizagem da química.

O processo de ensino de química envolve a transformação do conhecimento químico em conhecimento escolar, no entanto, pesquisadores na área de educação científica identificaram cinco problemas no ensino de química que precisam ser corrigidos por meio de abordagens didáticas adequadas aos contextos do aluno e dos problemas abordados, que envolvam ativamente os alunos na construção de modelos explicativos, tendo em mente que cada aluno é um ser humano que se desenvolve socialmente, influenciado, além disso, por motivações socioafetivas.

O contexto do ensino de química pode ser compreendido em três níveis, dependendo de seu escopo: 1) contexto técnico-instrumental, que se limita à aplicação de conceitos e procedimentos químicos na esfera social; 2) contexto sociocultural, que vai além e investiga a natureza do conhecimento químico, os problemas que levaram às suas diferentes formulações e busca atribuir-lhe significado no contexto social do aluno; 3) abordagem crítico-filosófica, que investiga os problemas e as responsabilidades que dizem respeito à relação entre química e sociedade, tornando-a a mais adequada para fins de alfabetização científica cidadã.

Em relação à natureza da química, dois problemas se destacam em seu ensino: 1) a alternância entre cenários concretos e abstratos sem distinção suficiente, com abuso da linguagem utilizada para interpretar diferentes fenômenos químicos, e 2) a abordagem inadequada da teoria atômica, que pode ser compreendida tanto em termos epistêmicos quanto ontológicos. Isso pode reforçar um obstáculo epistemológico para os alunos, ao equiparar o comportamento das partículas ao de objetos comuns e atribuir-lhes propriedades macroscópicas das substâncias.

Dada a sua origem, ligada aos desenvolvimentos tecnológicos, e a sua própria natureza, a química não constrói modelos de caráter universal, como acontece com a física, mas sim modelos que funcionam segundo regras de ação, numa perspectiva pragmática. Contudo, a modelagem na educação oferece diversas vantagens que poderia motivar os alunos a participarem ativamente na construção de sua própria aprendizagem, tornando-a significativa.

Ligada aos processos de contextualização e modelagem, o uso da História e Filosofia da Ciência, podem contribuir de diversas maneiras: 1) na humanização da ciência, 2) na promoção do pensamento crítico, 3) na significação de conceitos científicos, 4) na promoção da aprendizagem, 5) na formação de professores, 6) no fornecimento de argumentos para o debate educacional, 7) na prevenção de visões distorcidas da ciência.

É certamente importante que o professor reconheça as características epistêmicas e ontológicas nas diferentes leituras dos mesmos fenômenos, bem como a distinção entre um fenômeno físico e sua interpretação teórica, deixando claro para os alunos que objetos, variáveis e relações estão sujeitos a restrições e idealizações, de modo que se comportam de acordo com o modelo teórico e não com o fenômeno real. Trata-se de uma mudança de abordagem que não ignora a lógica interna das teorias químicas, nem a natureza abstrata de seus conceitos, mas estimula a curiosidade intelectual dos alunos sem sobrecarregar o conteúdo.

Por outro lado, existem diferentes abordagens para a história da ciência, assim como existem diferentes perspectivas filosóficas, e nem todas são adequadas às exigências do contexto escolar ou justificam ser apresentadas explicitamente como formas alternativas de interpretação. Neste trabalho compartilha-se uma visão da história da ciência integrada aos processos históricos-sociais relacionados aos desenvolvimentos políticos, económicos e culturais, de modo que se compreenda que as ideias científicas debatidas fazem parte de um contexto histórico mais ou menos amplo.

As propostas de Bohr situam-se no contexto sócio-histórico da Europa Ocidental dos séculos XIX e XX, sendo o século XIX percebido como o tempo da era mundial. Uma nova divisão internacional do comércio marcou a evolução da economia mundial, baseada na produção de matérias-primas e no trabalho escravo na periferia colonial, o que sustentou o desenvolvimento tecnológico e científico na Europa. Ao mesmo tempo, seus resultados criaram um clima de otimismo quanto ao domínio da natureza, o que levou os fundamentos das ciências naturais a servirem de suporte ideológico ao nascente sistema económico capitalista.

Essas condições exigiam o desenvolvimento de novos métodos de produção e a compreensão de seus fundamentos, abrindo caminho para a nova era do século XX na Europa, marcada por ventos de mudança em todas as áreas e em todos os sentidos. Especificamente, no campo científico, significou a ruptura da concepção científica clássica, que havia sido concebida como o ápice da ciência, dando lugar ao nascimento de uma nova concepção de ciência e suas diversas teorias, para cujo desenvolvimento Niels Bohr foi um dos seus arquitetos, com a mecânica quântica.

Embora o pensamento de N. Bohr fosse inovador em suas propostas científicas, em suas reflexões filosóficas sobre a natureza do conhecimento e da realidade, e até mesmo em suas ideias sobre o problema da coexistência pacífica das nações, ele não deixa de manter uma relação de dependência com seu contexto sócio-histórico, refletido no fato de que suas ideias filosóficas e científicas se baseiam em premissas que já estavam sendo debatidas por predecessores e contemporâneos.

A mecânica quântica rompeu com os ideais da ciência clássica, em relação ao realismo e determinismo das teorias, à objetividade clássica do observador e a descrição pictórica dos fenômenos, e definitivamente renovou antigas discussões epistemológicas e ontológicas. Nesse contexto, Bohr foi um dos físicos mais filosóficos do século XX, o que pode ser observado em sua postura crítica em relação à construção do conhecimento, muito semelhante à epistemologia kantiana e em suas preocupações com o uso da linguagem, em que o significado não depende da referência, mas de como ela é usada de forma inequívoca, em contexto, o que o aproximam do Wittgenstein tardio.

Com o ressurgimento do atomismo químico por Gassendi no século XVII, a escola de pensamento atomista começou a ganhar força, mantendo sua contraparte na escola energista. Nesse confronto, emergiu o modelo atômico de Dalton no século XIX, que se tornou a estrutura teórica para explicar as combinações químicas e, juntamente com a teoria cinética dos gases, desenvolvida entre os séculos XVIII e XIX, serviu para explicar muitos fenômenos.

As variações periódicas nas propriedades dos elementos químicos (século XVIII) levaram à suspeita de uma possível estrutura atômica, que foi corroborada por pesquisas sobre eletricidade, eletroquímica e radiação em tubos de descarga. Essas pesquisas conduziram à conclusão da natureza corpuscular das cargas elétricas e sua pertença ao átomo, o que permitiu o surgimento dos primeiros modelos de estrutura atômica.

Com a certeza da existência de partículas carregadas negativamente, mais tarde chamadas de elétrons, foram criados modelos para representar a condutividade elétrica em metais, que serviram nos estudos de doutorado de Bohr, que acabou percebendo que os modelos propostos estavam equivocados ao adotar a hipótese dos elétrons livres.

Por outro lado, Kirchhoff estudou a radiação de corpo negro, e obteve uma formulação que foi melhorada ao longo do caminho por, Stefan, Boltzmann, Wien e Planck. Suas contribuições ajudaram a entender que havia algo errado com a física clássica. Isso era conhecido como o problema da radiação do corpo negro, até que Planck encontrou a solução, mas ninguém sabia das implicações da constante h na fórmula de Planck. Einstein a utilizou

para resolver o problema do efeito fotoelétrico, consolidando a descontinuidade do princípio quântico, que Bohr introduziu na trilogia.

Assim, o modelo de Thomson foi o primeiro com enorme respaldo matemático e experimental no desenvolvimento da teoria atômica, o que permitiria o surgimento subsequente da nova teoria física. O modelo forneceu uma explicação para a emissão de partículas em radiatividade, as propriedades periódicas dos elementos e o espalhamento de partículas α e β através de lâminas metálicas muito finas.

As pesquisas sobre radioatividade e o espalhamento de partículas α e β levaram ao surgimento do modelo atômico de Rutherford, que marcou a descoberta do núcleo atômico, um conceito crucial para os desenvolvimentos subsequentes nas ciências físicas. No entanto, ao contrário do modelo de Thomson, era um modelo que apresentava instabilidade mecânica e eletrodinâmica, o que era motivo de preocupação para Bohr, que, com base em estudos de espectros atômicos, no quantum de ação de Planck e na teoria do efeito fotoelétrico de Einstein, propôs um novo modelo de estrutura atômica em 1913.

Seu modelo atômico pode ser resumido em duas hipóteses. A primeira que os elétrons atômicos se movem em órbitas estacionárias ao redor do núcleo atômico, o que poderia ser calculado usando "mecânica comum", A segunda que o sistema atômico pode irradiar frequências homogêneas discretas quando o elétron salta de um estado de energia mais alto para um mais baixo. Embora Nicholson tivesse proposto um modelo baseado na quantização do momento angular, considerando a chegada ou a partida dos elétrons, Bohr relutou em aceitar esse tipo de explicação porque o quantum de ação é um fato da natureza que impede qualquer interpretação mecânica da quantização.

Bohr demonstrou que a mecânica clássica não conseguia explicar a estabilidade da estrutura atômica, sendo necessário recorrer a um novo fundamento, que incorporasse a natureza quântica da radiação à estrutura atômica, por meio da constante h . Isso, além disso, possibilitou a construção de uma grandeza com dimensão de comprimento e ordem de grandeza apropriada, hoje conhecida como raio de Bohr.

O postulado quântico de Bohr pode ser considerado revolucionário, pois vai muito além da mera introdução de h , como fizera Nicholson. De fato, na teoria de Planck, um oscilador harmônico não altera sua frequência de oscilação ao irradiar; entretanto, Bohr diferencia a frequência de oscilação da frequência de radiação, que é determinada pela diferença de energia entre os estados final e inicial do átomo.

Como a conservação de energia é um princípio fundamental da física, Bohr a considerou um postulado óbvio, pois, até a apresentação de seu modelo atômico, ela não havia sido

demonstrada para eventos atômicos. Posteriormente, Bohr passou a considerar a conservação de energia apenas estatisticamente, e não para eventos atômicos individuais.

Para facilitar os cálculos e a explicação do comportamento de átomos com múltiplos elétrons, Bohr propôs órbitas circulares, em vez de órbitas elípticas, com base no fato de que a energia do elétron (em termos clássicos) depende apenas do semieixo maior da elipse, e não de sua excentricidade.

Pode-se dizer que Bohr, assim como Einstein, reescreveu as leis da física ao declarar que os elétrons orbitam com energia constante e que, portanto, as frequências espectral e orbital não poderiam ser as mesmas, e que era necessária uma transição entre estados de energia estacionários através da emissão ou absorção de quanta de luz, o que contrasta claramente com as ideias convencionais da eletrodinâmica. Bohr continuou a recorrer às expectativas clássicas para sustentar e interpretar a sua teoria, o que é compreensível tendo em conta a enorme dificuldade epistemológica de expressar novos conceitos dentro dos limites das ideias antigas, o que, de facto, implicou uma mudança ontológica e a sua correspondente crise.

Na tentativa de justificar os conceitos clássicos para a explicação, ele propôs o princípio da correspondência: para estados adjacentes altamente excitados, onde a diferença de energia se torna muito pequena, o sistema se comporta, na prática, de maneira clássica. Ou seja, a frequência irradiada e a frequência orbital são quase iguais. O ponto essencial do princípio é que fornece uma maneira de relacionar a frequência orbital e a frequência da radiação, que são classicamente iguais, mas não quanticamente, exceto no limite de correspondência.

Considerando os resultados obtidos na nova física, Bohr propôs a filosofia da Complementariedade, a fim de tentar dar uma interpretação à mecânica quântica, cujo argumento parte de uma afirmação ontológica: a existência do quantum de ação. A partir dessa afirmação, Bohr apresenta as consequências epistemológicas e metodológicas para a ciência, pois exige uma revisão de princípios do marco clássico e propõe o postulado quântico, "que atribui a todo processo atômico uma descontinuidade essencial, ou melhor, uma individualidade completamente alheia às teorias clássicas" (Bohr, 1961, p. 53).

A apresentação de Bohr da observação como interação gerou confusão, pois se poderia pensar que ele estaria propondo uma perturbação da observação no estado do sistema. No entanto, nesse caso, as relações de incerteza seriam o resultado de tal perturbação e, consequentemente, o sistema seria incognoscível, o que contraria a proposta de Bohr.

Na realidade, o que ele propõe é que a observação do objeto real implica interação com o aparelho de medição, de modo que os fenômenos observados não são exatamente os do objeto real, mas sim o produto da interação. Portanto, não se pode atribuir uma realidade, no sentido

clássico, a os fenômenos observados, os sistemas físicos não existem em estados clássicos e os objetos não podem ser definidos por estados mecânicos clássicos, uma vez que a observação não pode ser descrita como se o objeto e o aparelho de medição tivessem uma realidade independente.

Da mesma forma, a complementaridade é a expansão necessária do marco clássico para uma compreensão harmoniosa de fenômenos aparentemente contraditórios, consequência da introdução do quantum de ação no marco da mecânica clássica. É este último elemento que torna a complementaridade um novo marco conceitual, pois implica uma ruptura com elementos fundamentais do marco clássico e uma redefinição do uso e do escopo das imagens descritivas na mecânica clássica.

O modelo atômico de Bohr fornece uma introdução simples, porém rigorosa, à mecânica quântica e à quantização de energia, um conceito fundamental na mecânica quântica. De fato, o conceito de estado estacionário é a característica que ainda sobrevive, embora por meio de outra definição que nos permite falar sobre o número quântico principal. Ele também permite que os alunos visualizem certos conceitos abstratos por meio de analogias como o modelo planetário. Da mesma forma, permite a compreensão dos diferentes espectros de linhas, a estabilidade eletrodinâmica do átomo e a absorção e emissão de energia pelo sistema eletrônico.

É claro que é importante insistir que as limitações do modelo sejam claramente compreendidas. Por exemplo, o que apresenta dificuldades na explicação dos espectros de átomos polieletrônicos, que suas órbitas definidas parecem contradizer os princípios da mecânica quântica, sua incapacidade para explicar fenômenos como o efeito Stark e o efeito Zeeman. Se não for ensinado adequadamente, pode fomentar visões erroneamente simplistas da mecânica quântica e não refletir a natureza da pesquisa atual, o que seria contraproducente para a formação de futuros cientistas ou para o propósito da alfabetização científica cidadã.

Finalmente, insistir que uma reconstrução histórica dos experimentos realizados na formulação dos modelos atômicos, inevitavelmente deve incluir o contexto em que foram conduzidos, o marco teórico que orientou os cientistas, as interpretações alternativas dos dados e os conflitos e controvérsias. De fato, a reconstrução histórica de modelos atômicos mostra que envolveu controvérsias e a explicação dos dados por teorias rivais. Enfatizar esses aspectos motiva o interesse dos alunos, o que pode facilitar a compreensão conceitual.

REFERÊNCIAS

AASERUD, F.; HEILBRON, J. L. **Love, Literature, and the Quantum Atom**. Oxford: Oxford University Press, 2013. E-book.

ANDICA, L. **La enseñanza-aprendizaje de la química a través de las plantas medicinales**. 2015. Disertación (Maestría en Enseñanza de las Ciencias Exactas y Naturales) - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2015.

AMAYA, U. El símbolo como limitación y tránsito en el sistema kantiano. **Teoría y Praxis**, n. 29, p. 115-127, 2016.

AMIN, S. Reflexiones sobre la Teoría del Imperialismo. **Nueva Sociedad**, n. 50, p. 5-24, 1980.

ARRIASSECQ, I.; GRECA, I. Algunas consideraciones históricas, epistemológicas y didácticas para el abordaje de la teoría de la Relatividad Especial en el nivel medio polimodal. **Ciência & Educação**, v. 8, n. 1, p. 55-69, 2002.

ATKINSON, P.; COFFEY A. Analysing documentary realities. *In*: SILVERMAN, D. (Edit). **Research Qualitative: Theory, Method and Practice**. 2. ed. London: Sage Publications Ltd, 2004, p. 56-75.

BACARLETT, M; FUENTES, R. Descartes desde Canguilhem: el mecanicismo y el concepto de reflejo. **Ciencia Ergo Sum**, v. 14, n. 2, p. 161-171, 2007.

BARBOSA, C., 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.

BAILY, C. Early atomic models: from mechanical to quantum (1904-1913). **The European Physical Journal H**, v 38, p. 1-38, 2013.

BIZZO, N. Historia de la Ciencia y Enseñanza de la Ciencia: ¿Qué paralelismos cabe establecer? **Comunicación, Lenguaje y Educación**, v. 5, n. 18, p. 5-14, 1993.

BLAEDEL, N. **Harmony and unity: The life of Niels Bohr**. Madison: Science Tech Publishers, 1988.

BOHR, N. On the theory of the decrease of velocity of moving electrified particles on passing through matter. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 25, n. 145, p. 10-31, 1913a.

BOHR, N. On the constitution of atoms and molecules. **Philosophical Magazine**, s.6, v. 26, n. 151, p. 1-25, 1913b.

BOHR, N. **The theory of spectra and atomic constitution**. Cambridge: Cambridge University Press, 1922.

BOHR, N. **Atomic theory and the description of nature**. Cambridge: Cambridge University Press, 1934 (reprinted) 1961.

BOHR, N. **Atomic physics and human knowledge**. New York. John Wiley & sons, 1958.

BOLIO, A. Husserl y la fenomenología trascendental: perspectivas del sujeto en las ciencias del siglo XX. **Reencuentro: Sujeto, Subjetividad y Educación Superior**, n. 65, p. 20-29, 2012.

BONDER, Y; OKON, E. Los principios de la relatividad: una introducción pedagógica. **Revista Mexicana de Física**, v. 64, p. 87-91, 2018.

BRAVO, N. Introducción. Número 4. **Estudios Kierkegaardianos. Revista de filosofía**, n. 4, p. 11-14, 2018.

BRITANNICA. **The 19th century. The Napoleonic wars and their aftermath**. Disponible en: <https://www.britannica.com/topic/history-of-Denmark/Reformation-and-war>

CABALLERO, C.; RECIO, M. Las tendencias de la Didáctica de las Ciencias Naturales en el siglo XXI. **VARONA**, n. 44, p. 34-41, 2007.

CADENAS, Y. **Epistemología, ontología y complementariedad en Niels Bohr**. 2004. Tesis (Doctor en Filosofía) -Facultad de Filosofía, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 2004.

CALVO, A. **Bohr y su filosofía de la física: epistemología y complementariedad**. Trabajo de grado (Grado en Física) -Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco, Leioa, 2017.

CAMPANARIO, J. The parallelism between scientists' and students' resistance to new scientific ideas. **International Journal of Science Education**, v. 24, n. 10, p. 1095-1110, 2002.

CAMPANARIO, J.; MOYA, A. ¿Cómo enseñar ciencias? Principales tendencias y propuestas. **Enseñanza de las ciencias**, v. 17, n. 2, p. 179-192, 1999.

CAMACHO, J; GALLEGO, R; PÉREZ, R. La ley periódica. Un análisis histórico epistemológico y didáctico de algunos textos de enseñanza. **Educación Química**, v. 18, n. 4, p. 278-288, 2007.

CAÑAL, P. La alfabetización científica: ¿necesidad o utopía? **Cultura y Educación**, v. 16, n. 3, p. 245-257, 2004.

CARDOSO, P.; JUSTI, R. Contributions of the model of modelling diagram to the learning of ionic bonding: analysis of a case study. **Research in Science Education**, v. 41, n. 4, p. 479-503, 2011.

CHAMIZO, J. About continuity and rupture in the history of chemistry: the fourth chemical revolution (1945-1966). **Foundations of chemistry**, v. 21, n. 1, p. 11-29, 2019a.

CHAMIZO, J. Las sustancias químicas, antes y después de la construcción de la tabla periódica. **Educación Química**, v. 30, n. 4, p. 98-107, 2019b.

CHAMIZO, J. Las prácticas químicas a través de sus transformaciones. **CRÍTICA**, v. 54, n. 162, p. 57-82, 2022.

CHAMIZO, J.; PÉREZ, Y. Sobre la enseñanza de las ciencias naturales. **Revista Iberoamericana de Educación**, v. 74, n. 1, p. 23-40, 2017.

CELLARD, A. A Análise documental. In: POUPART, J. *et al.* **A pesquisa qualitativa. Enfoques epistemológicos e metodológicos**. 3. Ed. Petropolis: Editora Vozes, 2012.

COCKCROFT, J. Niels Henrik David Bohr. 1885-1962. **Biographical memories of Fellows of the Royal Society**, v. 9, p. 36-53, 1963.

DÁVILA-ACEVEDO, M. A. *et al.* Emotional performance on physics and chemistry learning: the case of Spanish K-9 and K-10 students. **International Journal of Science Education**, v. 43, n. 6, p. 823-843, 2021.

DAVINI, C. Charles S. Pierce's pragmatic maxim. Some epistemological issues. **Scienza & Filosofia**. n. 24, p. 269-283, 2020.

DE BERG, K. C. The concepts of heat and temperature: the problem of determining the content for the construction of an historical case study which is sensitive to nature of science issues and teaching-learning issues. **Science & Education**, v. 17, n. 1, p. 75-114, 2008.

DÍAZ-BARRIGA, A. Competencias en educación. Corrientes de pensamiento e implicaciones para el currículo y el trabajo en el aula. **Revista Iberoamericana de Educación Superior**, v. 2, n. 5, p. 3-24, 2011.

DÍEZ, J.; MOULINES, U. **Fundamentos de filosofía de la ciencia**. 2. ed. Barcelona: Editorial Ariel, S.A., 1999.

DUNLOP, L.; HODGSON, A.; STUBBS, J. Building capabilities in chemistry education: happiness and discomfort through philosophical dialogue in chemistry. **Chemistry Education Research and Practice**, v. 21, n. 1, p. 438-451, 2020.

EISENSTAEDT, J. **Antes de Einstein: Relatividad, Luz y Gravitación**. Traducido por: MANSOUR. México, D. F.: Fondo de Cultura Económica, 2015.

EFIMOV, A.; GALKINE, I.; ZOUBOK, L. y otros. **Historia Moderna**. 17. ed. México: Editorial Grijalbo, S.A., 1964.

ELWICK, J. Layered history: styles of reasoning as stratified conditions of possibility. **Studies in History and Philosophy of Science**, v. 43, n. 4, p. 619-627, 2012.

ERDURAN, S. Philosophy of chemistry: an emerging field with implications for chemical education. **Science & Education**, v. 10, n. 6, p. 581-593, 2001.

EYRIES, M. J. B. **Panorama Universal Historia de Dinamarca**. Barcelona. Imprenta del Imparcial, 1845, 399 p. Digitalizado por Google.

<https://play.google.com/books/reader?id=hnDkwtsnv8MC&pg=GBS.PA300>

FARIAS, D.; MOLINA, M.; CASTELLÓ, J. Análisis del enfoque de historia y filosofía de la ciencia en libros de texto de química: el caso de la estructura atómica. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 31, n. 1, p. 115-133, 2013.

FELLOWES, S. **In defense of psychiatric diagnoses**. (e.book). Lancaster, UK: Palgrave Macmillan, 2025. 251 p. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-74478-5>

FLORES, J. Niels Bohr: puente entre la física clásica y la moderna. In: GARCÍA-COLÍN, L.; MAZARI, M.; MOSHINKY, M. **Niels Bohr: científico, filósofo, humanista**. 2. Ed. México, D. F.: Fondo de Cultura Económica, S. A., 1997. p. 15-28.

FONTANA, J. **Capitalismo y democracia 1756-1848: Cómo empezó este engaño**. Traducido por: FURIÓ, S. Barcelona: Editorial Planeta S. A., 2019.

FORATO, T.; MARTINS, R.; PIETROCOLA, M. Historiografia e natureza da Ciência na sala de aula. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 27-59, 2011.

GAGLIARDI, R. Los conceptos estructurales en el aprendizaje por investigación. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 4, n. 3, p. 30-35, 1986.

GALBRAITH, J. **El dinero**. Traducido por: ALEU, F. Barcelona: Ediciones Orbis, S. A. 1983-

GALLEGO-BADILLO, R. **Discurso constructivista sobre las tecnologías**. Bogotá, D. C.: Cooperativa editorial Magisterio, 2001.

GERICKE, N. M.; HAGBERG, M. Conceptual incoherence as a result of the use of multiple historical models in school textbooks. **Research in Science Education**, v. 40, n. 4, p. 605-623, 2010.

GIERE, R. **Explaining Science A cognitive approach**. Chicago: The University of Chicago Press, 1988.

GIL, D.; FERNÁNDEZ, I.; CARRASCOSA, J.; CACHAPUZ, A.; PRAIA, J. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.

GILBERT, J. On the nature of "Context" in Chemical Education. **International Journal of Science Education**, v. 28, n. 9, p. 957-976, 2006.

GONZÁLEZ-GALLI, L.; PÉREZ, G.; CUPO, B.; ALEGRE, C. Revisión y revalorización del concepto de obstáculo epistemológico para la enseñanza de las Ciencias Naturales, **Ciência & Educação**. v. 28, n. 1, p. 1-17, 2022.

GRIBBIN, J. **Historia de la Ciencia, 1543-2001**. 2. Ed. Traducido por: Mercedes García. Barcelona: Crítica, 2006, 553 p.

GUAMANGA, M. **Husserl y la filosofía de la matemática**: Frege y Gödel, una aproximación a sus límites y alcances. 2016. Tesis (Maestría en Filosofía) – Facultad de Humanidades, Universidad del Valle, Cali, 2016.

GUTIÉRREZ, F. **Teorías del desarrollo cognitivo**. Madrid: McGraw-Hill, 2005.

HARRIS, M. Chemical reductionism revisited: Lewis, Pauling and the physico-chemical nature of the chemical bond. **Studies in History and Philosophy of Science**, v. 39, n. 1, p. 78-90, 2008.

HENDERSON, B.; MACPHERSON, A.; OSBORNE, J.; WILD, A. Beyond construction: five arguments for the role and value of critique in learning science. **International Journal of Science Education**, v. 37, n. 10, p. 1668-1697, 2015.

HERRERA, M. El hombre como ser histórico. Del “modo de ser histórico” al “ser histórico” en el pensamiento de Mario Sambarino. **LÓGOI Revista de Filosofía**, n. 9, p. 131-137, 2006.

HIRSCHBERGER, J. **Breve historia de la filosofía**. Traducido por: ROS, A. Edición electrónica, Barcelona: Herder Editorial, S. L., 2012.

HOLTON, G. What historians of science and science educators can do for one another. **Science & Education**, v.12, n. 7, p. 603-616, 2003.

HOWARD, D. Who invented the “Copenhagen interpretation”? A study in mythology. **Philosophy of Science**, v. 71, n. 5, p. 669-682, 2004.

INFANTE-AMARANTE, J; GÓNZALEZ DE MOLINA, M.; TOLEDO, V. El metabolismo social. Historia, métodos y principales aportaciones. **Revista Iberoamericana de Economía Ecológica**, v. 27, p. 130-152, 2017.

IZQUIERDO, M. Un nuevo enfoque de la enseñanza de la química: contextualizar y modelizar. **The journal of the Argentine Chemical Society**, v. 92, n. 4-6, p. 115-136, 2004.

IZQUIERDO, M.; ADÚRIZ-BRAVO, A. Contribuciones de Giere a la reflexión sobre la educación científica. **ArtefaCToS. Revista de estudios de la ciencia y la tecnología**, v. 10, n. 1, p. 75-87, 2021.

JOHNSTONE, A. H. The development of chemistry teaching. A changing response to changing demand. **Journal of Chemical Education**, v. 70, n. 8, p. 701-705, 1993.

JUSTI, R.; VAN DRIEL, J. A case study of the development of a beginning chemistry teacher’s knowledge about models and modelling. **Research in Science Education**, v. 35, n. 2-3, p. 197-219, 2005.

KAISER, D. More roots of complementarity: kantian aspects and influences. **Studies in History and Philosophy of Science**, v. 23, n. 2, p. 213-239, 1992.

KANT, I. **Crítica de la razón pura**. Traducido por: RIBAS P. Madrid: Editorial Taurus, 2005.

KUHN, T. **La estructura de las revoluciones científicas**. Traducido por: SOLÍS C. Primera edición electrónica, México D. F.: Fondo de Cultura Económica, 2010.

LABARCA, M. La Filosofía de la Química en la ciencia contemporánea. **Redes**, v. 11, n. 21, p. 15Johnstones5-171, 2005.

LABARCA, M.; BEJARANO, N.; EICHLER, M. Química e filosofia: rumo a uma frutífera colaboração. **Química Nova**, v. 36, n. 8, p. 1256-1266, 2013.

LAÍN, P. Sobre el apoyo del hombre en la historia. **Revista de estudios políticos**, n. 17, p. 45-73, 1944.

LAKATOS, I. **Historia de la Ciencia y sus reconstrucciones racionales**. Traducido por: RIBES, D. 2. ed. Madrid: Editorial Tecnos, 1987.

LARMOR, J. **Aether and matter**. Cambridge: University Press, 1900, 410 p. Disponible en: <https://archive.org/details/aethermatterdeve00larmuoft/mode/2up>

LIN, H. The effectiveness of teaching chemistry through the history of science. **Journal of Chemical Education**, v. 75, n. 10, p. 1326-1330, 1998.

LLANO, A. Naturalismo y trascendentalismo en la teoría kantiana del conocimiento. **Anuario filosófico**, v. 37, n. 3, p. 543-562, 2004.

LOMBARDI, O. I. La pertinencia de la historia en la enseñanza de ciencias: argumentos y contraargumentos. **Enseñanza de las Ciencias**. Barcelona, v. 15, n. 3, p. 343-349, 1997.

LÓPEZ, S.; FLORES, M. Las reformas educativas neoliberales en Latinoamérica. **Revista Electrónica de Investigación Educativa**, v. 8, n. 1, p. 1-15, 2006.

LOSEE, J. **Introducción histórica a la filosofía de la ciencia**. 3. ed. Madrid: Alianza Editorial, S. A., 1981.

LUPON, N. El problema de la emisión y absorción atómicas en la mecánica cuántica antigua. **LLULL**, v. 10, p. 75-96, 1987.

MACHADO, A., LOURENÇO, O.; SILVA, F. J. Facts, concepts, theories: the shape of psychology's epistemic triangle. **Behavior and Philosophy**, v. 28, p. 1-40, 2000.

MAGDOFF, H. **La era del imperialismo, política económica internacional de Estados Unidos**. Traducido por: ARRIGORRIAGA, R. México D. F.: Editorial Nuestro Tiempo, S. A., 1969.

MAHAFFY, P. The future shape of chemistry education. **Chemistry Education: Research and Practice**, v. 5, n. 3, p. 229-245, 2004.

MARQUES, D. M. **As investigações de Ernest Rutherford sobre a estrutura da matéria: contribuições para o ensino de química**. 2006. Dissertação (Mestrado em Educação para a Ciência) -Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2006.

MARTINS, M. Analysis of high school students' argumentative dialogues in different modelling situations. **Science & Education**, v. 33, n. 1, p. 175-212, 2024.

MATTHEWS, M. **La enseñanza de la ciencia. Un enfoque desde la historia y la filosofía de la ciencia**. Traducido por: MIRET, M. 2. ed. México: Fondo de Cultura Económica, 2015.

MEDINA, M; SANMARTÍN, J. (Orgs.). **Ciencia, tecnología y sociedad: estudios interdisciplinarios en la universidad, en la educación y en la gestión política y social**. Barcelona: Anthropos, 1990.

MEJÍA, M. **Educaciones y pedagogías críticas desde el sur**. La Paz. Ministerio de Educación (Bolivia), 2011.

MENÉNDEZ, M. **Transformaciones productivas, institucionales y tecnológicas en el sector agrario de Dinamarca, Nueva Zelanda y Uruguay (1870-1930)**. 2021. 208 f. Tesis (Maestría en Historia Económica) -Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de la República Oriental de Uruguay, Montevideo, 2021.

MERONI, G., COPELLO, M. y PAREDES, J. Enseñar química en contexto. Una dimensión de la innovación didáctica en educación secundaria. **Educación química**, México, v. 26, p. 275-280, 2015.

MOLEDO, L.; OLSZEVICKI, N. **Historia de las ideas científicas: de Tales de Mileto a la máquina de Dios**. Buenos Aires: Planeta, 2014.

MONEREO, J. La ideología del "darwinismo social": la política social de Herbert Spencer (I). **Documentación laboral**, v. 3, n. 87, p. 11-80, 2009.

MONK, M.; OSBORNE, J. Placing the history and philosophy of science on the curriculum: a model for development of pedagogy. **Science Education**, v.81, p. 405-424, 1997.

MORA, M. La teoría de las representaciones sociales de Serge Moscovici. **Athenea Digital**, n. 2, p. 1-25, 2002.

MOREIRA, M.; GRECA, I. Cambio Conceptual: análisis crítico y propuestas a la luz de la Teoría del Aprendizaje Significativo. **Ciência & Educação**, v. 9, n. 2, p. 301-315, 2003.

MORENO, A. Atomismo versus energetismo: controversia científica a finales del siglo XIX. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 24, n. 3, p. 411-428, 2006.

MORENO, J.; GALLEGOS, R.; PÉREZ, R. El modelo semicuántico de Bohr en los libros de texto. **Ciência & Educação**, v. 16, n. 3, p. 611-629, 2010.

MORTIMER, E. Conceptual Change or Conceptual Profile Change? **Science & Education**, v. 4, p. 267-285, 1995.

MOSTERÍN, J. **Conceptos y teorías en la ciencia**. 2. ed. Madrid: Alianza Editorial, S.A., 2000.

NAVARRO, O. El surgimiento de la complementariedad: Niels Bohr y la conferencia de Como. **Revista de Filosofía de la Universidad de Costa Rica**, v. 48, n. 123-124, p. 65-76.

PAIS, A. **Niels Bohr's Times, in Physics, Philosophy, and Polity**. New York: Oxford University Press Inc., 1991.

PARCHMANN, I.; GRÄSEL, C.; BAER, A.; NENTWIG, P.; DEMUTH, R.; RALLE, B. "Chemie im Kontext": A symbiotic implementation of a context-based teaching and learning approach. **International Journal of Science Education**, v. 28, n. 9, p. 1041-1062, 2006.

PARGA, D; PIÑEROS, G. La enseñanza de la química desde contenidos contextualizados. **Educación química**, México, v. 29, n. 1, p. 55-64, 2018.

PELÁEZ-BLANDÓN, M. Dinamarca en el siglo XX: construcción de una sociedad de bienestar. **Revista Internacional de Cooperación y Desarrollo**, v. 1, n. 1, p. 63-93, 2014.

PETRUCCIOLI, S. **Atoms, metaphors and paradoxes: Niels Bohr and the construction of a new physics**. New York: Cambridge University Press, 1993.

PIÑA, J. M.; CUEVAS, Y. La teoría de las representaciones sociales: su uso en la investigación educativa en México. **Perfiles educativos**, v. 26, n. 105-106, p. 102-124, 2004.

PLOTNITSKY, A. **Como to Copenhagen: the beginnings and ends of complementarity**. In: ADENIER, A.; KHRENNIKOV, A.; LAHTI, P.; MANKO, V.; NIEUWENHUIZEN, Th. (Ed). Quantum theory, reconsideration of foundations. American Institute of Physics, 2007. p. 185-194.

PRASAD, M. D. Niels Bohr and the atomic structure. **Resonance**, v. 18, n. 10, p. 897-904, 2013.

PRINGE, H. El concepto kantiano de analogía y el desarrollo histórico del pensamiento de Bohr. **Revista Latinoamericana de Filosofía**, v. 40, n. 1, p. 29-45, 2014.

QUÍLEZ, J. From chemical forces to chemical rates: a historical/philosophical foundation for the teaching of chemical equilibrium. **Science & education**, v. 18, n. 9, p. 1203-1251, 2009.

QUIROGA, R. M. Las concepciones centrales del liberalismo y del socialismo sobre la nación en Europa: 1850-1914. **Revista Derecho del Estado**, n. 34, p. 255-287, 2015.

RAICIK, A.; PEDUZZI, L. A estrutura conceitual e epistemológica de uma descoberta científica: reflexões para o ensino de ciências. **ALEXANDRIA Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, v. 9, n. 2, p. 149-176, 2016.

REIHER, M. A systems theory for chemistry. **Foundations of Chemistry**, n. 5, p. 23-41, 2003.

RODRÍGUEZ, M.; NIAZ, M. El experimento de Rutherford en el contexto de la historia y filosofía de la ciencia y sus implicaciones para los textos de física. **Revista de Enseñanza de la Física**, v. 15, n. 1, p. 5-12, 2002.

ROLDAN, J.; BEN-DOV, Y.; GUERRERO, G. **La complementariedad: una filosofía para el siglo XXI**. Cali. Imprenta Universidad del Valle. 2004.

RUTHERFORD, E. The electrical structure of matter. **Supplement to Nature**, n. 2811, p. 409-419, 1923.

RUTHERFORD, E. The Structure of the Atom. **Philosophical Magazine**, s. 6, v. 27, n. 159, p. 488-498, 1914.

SÁNCHEZ, J. M. J. J. Thomson y la génesis del descubrimiento del electrón. **Arbor**, v. 158, n. 622, p. 137-171, 1997.

SÁNCHEZ, J. M. Planck, Einstein y los orígenes de la física cuántica. **Arbor**, v 167, n. 659-660, p. 423-436, 2000.

SANTOS, A.; SILVA, R.; ANDRADE D.; LIMA J. Dificuldades e motivações de aprendizagem em Química de alunos do ensino médio investigadas em ações do (PIBID/UFS/Química). **Scientia plena**. Aracajú, v. 9, n. 7, p. 1-6, 2013.

SCHEIFLER, X. **Historia del pensamiento económico**. 5. ed. México: Editorial Trillas, S. A., 1990.

SCERRI, E. The new philosophy of chemistry and its relevance to chemical education. **Chemistry Education: Research and Practice in Europe**, v. 2, n. 2, p. 165-170, 2001.

SCHNETZLER, R. A pesquisa em ensino de química no Brasil: Conquistas e perspectivas. **Química nova**, v. 25, Supl. 1, pp. 14-24, 2002.

SCHUNK, D. **Teorías del aprendizaje. Una perspectiva educativa**. 6. Ed. Traducido por: PINEDA, L.; CASTAÑEDA, S. México: Pearson S.A., 2012.

SEVERO, I; KASSEBOEHMER, A. Estudo do perfil motivacional de estudantes de educação básica na disciplina de química. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 16, n. 1, p. 94-116, 2017.

SILVEIRA, C.; SOUZA, A; KUNDLATSCH, A. Análise dos trabalhos apresentados nas sessões coordenadas da área de ensino nas reuniões anuais da sociedade brasileira de química. **Química Nova**, São Paulo, v. 43, n. 8, p. 1145-1153, 2020.

SIMON, F.; NOGUEIRA, R.; VICENTIN, F. Avaliação de livros de divulgação científica acerca da Mecânica Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência & Tecnologia**, v. 7, n. 2, p. 40-53, 2014.

SJÖSTRÖM, J. Towards *Bilding*-oriented chemistry education. **Science & Education**, v. 22, n. 7, p. 1873-1890, 2013.

SLOTTVED, E.; TAMM, D. **The University of Copenhagen A Danish centre of learning since 1479**. Translated by: Tam McTurk. Copenhagen: Hendriksens Eftf., 2009. 231 p. Disponible en: <https://www.e-pages.dk/ku/196/>

SOLBES, J.; TRAVER, M. Against a negative image of science: history of science and the teaching of physics and chemistry. **Science & Education**, v. 12, n. 7, p. 703-717, 2003.

SOLÉ, J. **Kant El giro copernicano en la filosofía**. Bonal letra Alcompas, 2015.

SPANGENBURG, R.; MOSER, D. **Niels Bohr: Atomic theorist**. Revised edition. New York: Chelsea House., 2008.

STENHOLM, S. **Bohr and Wittgenstein: two complementary views**. New York: Oxford University Press Inc., 2011.

STONE, N. **La Europa transformada, 1878-1919**. Traducción: Siglo XXI Editores. Madrid: Siglo XXI editores, S. A., 2019.

STRATHERN, P. **Bohr y la teoría cuántica**. Traducido por: Antón Corriente. Madrid. Siglo XXI editores, 1999.

STRAUSS, A.; CORBIN, J. **Bases de la investigación cualitativa. Técnicas y procedimientos para desarrollar la teoría fundamentada**. Traducido por: Eva ZIMMERMAN. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2002.

THOMSON J. J. On the structure of the atom: an investigation of the stability and periods of oscillation of a number of corpuscles arranged at equal intervals around the circumference of a circle; with application of the results to the theory of atomic structure. **Philosophical Magazine**, s. 6, v. 7, n. 39, p. 237-265, 1904.

THOMSON, J. J. Cathode rays. **Philosophical Magazine**, s. 1, v. 90, p. 25-29, 2010.

TOBIN, E. Chemical laws, idealization and approximation. **Science & Education**, v. 22, n. 7, p. 1581-1592, 2013.

VENAYRE, S. La vuelta por el siglo XIX. Una historia del mundo a través de los objetos. **Secuencia**, n. 104, p. 1-21, 2019.

VIANA, H. E. B; PORTO, P. A. The development of Dalton's atomic theory as a case study in the history of science: reflections for educators in chemistry. **Science & Education**, v. 19, n. 1, p. 75-90, 2010.

VIHALEMM, R. The autonomy of chemistry: old and new problems. **Foundations of chemistry**, v.13, n. 2, p. 90-107, 2011.

VILLARROEL, G. Las representaciones sociales: una nueva relación entre el individuo y la sociedad. **Fermentum**, n. 49, 434-454, 2007.

WANG, L.; YANG. J. Process and impact of Niels Bohr's visit to Japan and China in 1937: a comparative perspective. **Endeavour**, v. 41, n. 1, p. 12-22, 2016.

WARTHA, J.; FALJONI-ALÁRIO, A. El concepto de contextualización en los libros de texto de química brasileños. **Educación Química**, México, v. 16, p. 151-158, 2005.

WEINBERGER, P. Niels Bohr and the dawn of quantum theory. **Philosophical Magazine**, v. 94, n. 27, p. 3072-3087, 2014.

WHITAKER, M. A. B. The EPR paper and Bohr's response: a re-assessment. **Foundations of physics**. v. 34, n. 9, p. 1305-1340, 2004.

WIECHOWSKI, S. **Historia del átomo**. 4. ed. Traducido por: BOIX, I. Barcelona: Labor, S. A., 1972.

WILKES C.; GAMBLE, M.; ROCABADO, G. Is general chemistry too costly? How different groups of students perceive the task effort and emotional costs of taking a chemistry course and the relationship to achievement and retention. **Chemistry Education Research and Practice**, v. 25, n. 4, p. 1090-1104, 2024.

WILKIS, A.; BERGER, M. La relación individuo-sociedad: una aproximación desde la sociología de Georg Simmel. **Athenea digital**, n. 7, p. 77-86, 2005.

ZABALA O. El hombre, el ser histórico. **Ludus Vitalis**, v. 17, n. 31, 143-167, 2009.