



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO, FILOSOFIA E
HISTÓRIA DAS CIÊNCIAS



SAIRON SANTOS RESSURREIÇÃO

CONTRIBUIÇÕES DE JOHN WILLIAM NICHOLSON PARA O ÁTOMO DE
BOHR: O PAPEL EPISTÊMICO DO ERRO CIENTÍFICO E SUAS IMPLICAÇÕES
PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Salvador – Ba

Abril/2020

SAIRON SANTOS RESSURREIÇÃO

**CONTRIBUIÇÕES DE JOHN WILLIAM NICHOLSON PARA O ÁTOMO DE
BOHR: O PAPEL EPISTÊMICO DO ERRO CIENTÍFICO E SUAS IMPLICAÇÕES
PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências, Universidade Federal da Bahia e Universidade Estadual de Feira de Santana, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ensino, Filosofia e História das Ciências.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Moura Rocha

Coorientador: Prof. Dr. Olival Freire Júnior

Salvador - Ba
Abril/2020

Ressurreição, Sairon Santos.

Contribuições de John William Nicholson para o átomo de Bohr : o papel epistêmico do erro científico e suas implicações para o ensino de ciências / Sairon Santos Ressurreição. - 2020.

241 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Moura Rocha.

Coorientador: Prof. Dr. Olival Freire Júnior.

Dissertação (Mestrado em Ensino, Filosofia e História das Ciências) - Universidade Federal da Bahia. Faculdade de Educação, Salvador, 2020.

Programa de Pós-Graduação em convênio com a Universidade Estadual de Feira de Santana.

1. Teoria atômica. 2. Nicholson, John William - 1881-1955. 3. Ciência - Filosofia. 4. Erros científicos. 5. Ciência - Estudo e ensino. 6. Teoria quântica. I. Rocha, José Fernando Moura. II. Freire Júnior, Olival. III. Universidade Federal da Bahia. Faculdade de Educação. Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências. IV. Universidade Estadual de Feira de Santana. V. Título.

CDD 539.7 – 23. ed.

SAIRON SANTOS RESSURREIÇÃO

**CONTRIBUIÇÕES DE JOHN WILLIAM NICHOLSON PARA O ÁTOMO DE
BOHR: O PAPEL EPISTÊMICO DO ERRO CIENTÍFICO E SUAS IMPLICAÇÕES
PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências como requisito para a obtenção do título de Mestre.

COMISSÃO EXAMINADORA

Dr. Climério Paulo da Silva Neto

Universidade Federal do Oeste da Bahia

Dr. Elder Sales Teixeira

Universidade Estadual de Feira de Santana

Dr. José Fernando Moura Rocha

Universidade Federal da Bahia

Aprovado em 14/10/20

Dedicado a Gael, Vívian e Davi.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso enorme gratidão aos professores José Fernando Moura Rocha e Olival Freire Júnior pela confiança que depositaram neste trabalho quando ainda era um projeto incipiente.

A orientação cuidadosa do professor José Fernando, responsável por qualquer acerto que esta dissertação eventualmente logre, será uma qualidade que, daqui pra frente, perseguirei com afinco em mim mesmo durante minha atuação profissional.

A conclusão deste trabalho não seria possível sem as enormes contribuições dadas tanto na qualificação quanto na defesa da dissertação pelos professores Climério Paulo da Silva Neto, Elder Sales Teixeira e Osvaldo Pessoa Júnior, a quem sou enormemente grato.

O professor Esdras Santana dos Santos gentilmente disponibilizou a sua disciplina para a aplicação da sequência didática construída, pelo que serei sempre grato.

Queria agradecer ainda a todo o corpo docente do PPGEFHC – UFBA.

Finalmente, agradeço enormemente aos alunos que participaram deste trabalho, respondendo a entrevistas, discutindo, debatendo, questionando, apresentando seminários, respondendo a questionários, enfim, tornando este trabalho possível. Muito obrigado!

RESUMO

Nesta pesquisa, investigamos quais contribuições para a compreensão de aspectos da Natureza da Ciência associados ao erro científico podem emergir de uma sequência didática que discuta - a partir de dois referenciais epistemológicos, o evolucionário e o revolucionário - o papel de figuras históricas secundárias para o desenvolvimento científico. Argumentamos que o progresso da ciência pode ser coerentemente explicado tanto por uma perspectiva seletivista ou evolucionária, que identificamos com o racionalismo crítico de Karl Popper; quanto por uma epistemologia de ruptura ou revolucionária, que associamos aos trabalhos de Thomas Kuhn. Julgamos que a compreensão de aspectos epistemológicos da Natureza da Ciência pode ser beneficiada pela discussão da controvérsia entre as teorias do conhecimento dos dois autores, uma vez que esta dissonância reflete tensões tanto na filosofia da ciência (relativismo *versus* racionalismo) quanto na historiografia da ciência (continuismo *versus* descontinuismo). O papel epistêmico do erro científico pode ser revelado através da análise histórica das contribuições que teorias equivocadas deram para o progresso. Nesse sentido, o astrofísico inglês John William Nicholson (1881-1955) emerge como um personagem histórico que deu sólidas contribuições para a edificação do que hoje conhecemos como Antiga Teoria Quântica, particularmente para a formulação do modelo atômico de Bohr, de 1913. Ao se destacar que mesmo ideias equivocadas, como a teoria dos proto-elementos de Nicholson, podem contribuir para o desenvolvimento científico, extrai-se do erro sua vocação pedagógica, a de ilustrar uma ciência tentativa, plural e confiável. A partir dos estudos realizados, apresentados nos capítulos iniciais deste trabalho, criamos uma sequência didática centrada no estudo das contribuições dadas pelos trabalhos do astrofísico para o modelo atômico de Bohr, tendo como pano de fundo tensões conceituais entre as epistemologias evolutiva e revolucionária. Os dados desta pesquisa qualitativa foram obtidos a partir de entrevistas, gravações em áudio e vídeo das aulas, além de questionário escrito. O texto é estruturado em quatro partes principais: na primeira, são apresentadas as bases conceituais tanto para uma epistemologia revolucionária, quanto para uma perspectiva epistemológica evolutiva; na segunda, são discutidas a visão de ciência adotada neste trabalho e a relação do erro com o ensino de ciências; na terceira parte, é desenvolvida uma narrativa da ascensão da Antiga Teoria Quântica com enfoque nas contribuições dadas pela teoria atômica de Nicholson à escrita de *Sobre a Constituição de Átomos e Moléculas*, de Niels Bohr; e finalmente, na quarta e última parte, é apresentado o processo de construção e implementação da sequência didática, além de serem discutidos os resultados da proposta. A abordagem adotada apresentou considerável potencial para melhorar concepções dos discentes

sobre os temas 'confiabilidade da ciência' e 'pluralismo teórico'. A compreensão do tema 'pluralismo metodológico', por outro lado, se deu de maneira parcial e menos evidente.

Palavras-chave: John Willian Nicholson; modelo atômico de Bohr; filosofia da ciência; erros científicos; ensino de ciências.

ABSTRACT

In this research, we investigate which contributions to the understanding of aspects of the Nature of Science associated with scientific error can emerge from a didactic sequence that discusses - from two epistemological points of view, the evolutionary and the revolutionary - the role of secondary historical figures for the development of science. We argue that the progress of science can be consistently explained either from a selectionist or evolutionary perspective, which we identify with Karl Popper's critical rationalism; as for a rupture or revolutionary epistemology, which we associate with the works of Thomas Kuhn. We believe that the understanding of epistemological aspects of the Nature of Science can benefit from the discussion of the controversy between the theories of knowledge of these authors, since this dissonance reflects tensions both in the philosophy of science (relativism *versus* rationalism) and in the historiography of science (continuism *versus* discontinuism). The epistemic role of scientific error can be revealed through historical analysis of the contributions that wrong theories have made to progress. In this sense, the English astrophysicist John William Nicholson (1881-1955) emerges as a historical character who made solid contributions to the construction of what we now know as the Old Quantum Theory, particularly for the formulation of Bohr's atomic model, of 1913. When it is highlighted that even mistaken ideas, such as Nicholson's theory of proto-elements, can contribute to scientific development, it is extracted from error its pedagogical vocation, that of illustrating a tentative, plural and reliable science. From the studies carried out, presented in the initial chapters of this work, we created a didactic sequence centered on the study of the contributions made by the astrophysicist's works to Bohr's atomic model, against the background of conceptual tensions between the evolutionary and revolutionary epistemologies. The data of this qualitative research were obtained from interviews, audio and video recordings of the classes, in addition to a written questionnaire. The text was structured in four main parts: in the first one, the conceptual basis are presented for both a revolutionary and an evolutionary epistemological perspective; in the second one, it is discussed the view of science adopted in this work and the relationship between error and science teaching; in the third part, it is developed a narrative of the rise of the Old Quantum Theory, focusing on the contributions given by Nicholson's atomic theory to the writing of Niels Bohr's *On the Constitution of Atoms and Molecules*; and finally, in the fourth and last part, it is presented the process of construction and implementation of the didactic sequence, in addition to discussing the results of the proposal. The approach adopted showed considerable potential to improve students' conceptions on topics such as the reliability of science and theoretical

pluralism. However, no evolution was observed for conceptions on the scientific method considered by the science teaching literature to be inadequate.

Key-words: John William Nicholson; Bohr's atomic model; philosophy of science; scientific errors; science teaching.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico da taxa de mutação em função do tamanho do genoma para um viroide e outros microorganismos.	38
Figura 2 - Joseph John Thomson (1856-1940).....	67
Figura 3 - Esquema do experimento de Mayer com agulhas magnéticas e configurações encontradas.	68
Figura 4 - John William Nicholson (1881-1955)	76
Figura 5 – Hantaro Nagaoka (1865-1950) e seu modelo atômico.....	78
Figura 6 - Representação do "colapso" do átomo previsto por Joseph Larmor em 1900.	80
Figura 7 - Representação dos três primeiros elementos da teoria de Nicholson: coronium, hidrogênio e nebulium.....	82
Figura 8 – Niels Bohr (1885 – 1962).....	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Níveis de compreensão do papel epistêmico do erro científico e habilidades associadas	62
Quadro 2 - Os proto-elementos de Nicholson e seus pesos relativos hipotéticos.....	82
Quadro 3 - Interpretação dada por Nicholson aos doze primeiros elementos da tabela periódica em função dos seus proto-elementos.....	83
Quadro 4 - Síntese da sequência didática.....	113
Quadro 5 - Divisão de temas por participantes da pesquisa.....	128
Quadro 6 - Mapa de episódio I: caracterizando a Natureza da Ciência.....	132
Quadro 7 - Relação entre erro e método científico na História da Ciências.....	134
Quadro 8 - Mapa de episódio II: relação do erro com o método científico.....	137
Quadro 9 - Mapa de episódio III: Perspectiva epistemológica	142
Quadro 10 – Mapa de episódio IV: Contribuições de Nicholson.....	148
Quadro 11 - Mapa de episódio V: acomodação de dados por mais de uma teoria/predição de hipóteses equivocadas.....	152
Quadro 12 - Mapa de episódio VI: confiabilidade científica.....	155
Quadro 13 - Evolução das concepções de NdC dos participantes da pesquisa.....	163

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
CAPÍTULO 1 – AS EPISTEMOLOGIAS EVOLUCIONÁRIA E REVOLUCIONÁRIA	20
1.1 – A epistemologia revolucionária de Thomas Kuhn.	21
1.2 – A epistemologia evolucionária de Karl Popper.....	28
CAPÍTULO 2 – ERRO CIENTÍFICO E NATUREZA DA CIÊNCIA	44
2.1 – Duas rotas epistêmicas para compreensão da NdC.	44
2.2 – O papel epistêmico do erro científico.....	56
CAPÍTULO 3 – CONTRIBUIÇÕES DE JOHN WILLIAM NICHOLSON PARA O ÁTOMO DE BOHR	64
3.1 – A Escola de Cambridge	65
3.2 – A teoria atômica de Nicholson.	75
3.3 – O modelo de Bohr	89
3.4 – Recepção e legado	97
CAPÍTULO 4 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS - A SEQUÊNCIA DIDÁTICA	101
4.1 – Parâmetros norteadores da construção da sequência.....	102
4.2 – O material de apoio.....	106
4.3 – A coleta de dados.....	108
4.4 – A sequência didática.....	111
4.5 – Parâmetros para análise de dados	115
4.6– Resultados e discussões	116
4.6.1 – Estágio inicial.....	117
4.6.2 – Estágio intermediário	128
4.6.3 – Estágio final.....	157
4.6.4 – Avaliação da proposta	162

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	169
REFERÊNCIAS	171
APÊNDICES	178
Apêndice A – Roteiro da entrevista.....	179
Apêndice B – Questionário final	180
Apêndice C – Textos de apoio.....	182
Texto I – O progresso da ciência: revolução ou evolução?.....	182
Texto II: Evolução da espectroscopia	193
Texto III: A teoria atômica de Nicholson.....	203
Apêndice D - Sub-representação de Nicholson no ensino de ciência	220
ANEXOS	230
Anexo A – Termo de consentimento livre e esclarecido.....	231
Anexo B - Programa da disciplina <i>Conceitos de Física D</i>	233

INTRODUÇÃO

Um dos mais importantes trabalhos científicos do século XX, *Sobre a Constituição de Átomos e Moléculas*, de Niels Bohr, foi publicado em 1913, num período de intenso debate intelectual sobre a constituição da matéria. Dividida em três partes, *A Trilogia de Bohr*, como também é conhecida, apresenta uma teoria atômica que, apesar de limitada, foi por mais de uma década o sustentáculo do desenvolvimento dos estudos sobre a estrutura da matéria que encontraram, em meados de 1920, uma formalização matemática que deu origem à moderna Mecânica Quântica. O átomo de Bohr guarda hoje, para além de sua inquestionável relevância histórica, a posição de porta de entrada para estudos em Física Moderna, tanto em nível secundário quanto superior. A maneira como este capítulo da história da Física é retratado em grande parte da literatura, entretanto, tende a ignorar aspectos centrais do desenvolvimento do conhecimento científico.

Distintamente do que sugere grande parte de livros-didáticos, a adesão ao modelo de Bohr não foi imediata. A forma como o cientista dinamarquês inseriu o vocabulário quântico na descrição da estrutura do átomo, a partir de uma série de postulados, não foi bem vista por alguns dos mais notáveis cientistas da época, como Joseph John Thomson, Joseph Larmor e John William Strutt (o 4º Lorde Rayleigh). Nos anos que seguiram à publicação de sua obra, há uma proliferação de modelos alternativos, a maioria deles se opondo à introdução de considerações quânticas para explicar a estabilidade do átomo e recorrendo a uma explicação eletrodinâmica clássica. A postura de Bohr diante da maioria destas críticas e modelos alternativos foi de relativa comodidade, ciente que estava da consistência de seu trabalho e da impossibilidade de se descrever em termos estritamente clássicos os fenômenos atômicos. Entretanto, com o modelo do astrofísico inglês John William Nicholson, Bohr precisou, ao menos durante algum tempo, defender o seu trabalho com mais cautela. Nicholson tanto foi um crítico rigoroso da teoria atômica de Bohr como é considerado por diversos historiadores da ciência como uma forte fonte de inspiração para o modelo atômico do físico dinamarquês. O estudo das contribuições de Nicholson para o átomo de Bohr pode lançar luz ao papel que figuras menores dão ao progresso científico e ilustrar aspectos da Natureza da Ciência como a pluralidade de métodos, o pluralismo teórico e a confiabilidade científica.

Apesar de ser o cientista mais citado por Bohr em sua trilogia, a despeito de suas contribuições para aquela obra serem reconhecidas por grandes historiadores da ciência (MCCORMARCH, 1966; PAIS, 1991; LOPES, 2009; KRAGH, 2011a; KRAGH, 2012), e

conquanto tenha desenvolvido um modelo atômico que lhe rendeu feitos surpreendentes, gozando, por algum tempo, de grande prestígio científico, Nicholson é uma figura geralmente excluída da narrativa tradicional da ascensão da Antiga Teoria Quântica. E o é assim, em parte, porque todo o desenvolvimento científico que produziu estava sustentado numa teoria equivocada, a hipótese dos “proto-elementos”, uma ideia bastante comum no início do século passado, a de que todos constituintes químicos da Terra seriam derivados de alguns poucos elementos fundamentais, que poderiam ser observados apenas em outros corpos celestes. Como julgava que tais elementos só existiriam na superfície de nebulosas e da coroa solar, os trabalhos de Nicholson foram desenvolvidos a partir de sua interpretação de dados observacionais da espectroscopia celeste ou astroquímica. Além de ter sido considerada uma hipótese experimentalmente bem-sucedida durante algum tempo, a teoria dos proto-elementos de Nicholson antecedeu uma ideia física essencial ao modelo de Bohr, a quantização do momento angular do elétron. Se considerarmos que o físico dinamarquês tomou nota dos trabalhos de Nicholson apenas alguns meses antes da publicação de sua trilogia, a análise do grau de influência da obra do astrofísico sobre a teoria de Bohr se torna objeto de inegável interesse historiográfico.

Os trabalhos realizados pelo astrofísico geralmente são retratados como um pano de fundo de estudos históricos do átomo de Bohr, como uma contextualização do cenário científico em que o físico dinamarquês estava inserido. Enquanto muitos destes trabalhos reconhecem a importância de Nicholson para o desenvolvimento inicial da Teoria Quântica, alguns se limitam a uma apresentação sintética do modelo, apontando suas limitações e não o relacionando diretamente com a teoria de Bohr. Apesar de ainda tímida, é possível identificar uma crescente tendência nas abordagens contextuais¹ de ensino de ciências em incorporar narrativas históricas que valorizem personagens inexploradas. A seguir apresentaremos um pequeno levantamento² de estudos feitos sobre o átomo de Bohr nas áreas de Ensino de Ciências e de História das Ciências (HC), com o objetivo tanto de argumentar a originalidade de nossa proposta quanto o de reconhecer que ela faz parte de uma crescente disposição na área de ensino em dar destaque aos trabalhos de personagens secundárias da História da Ciência.

Curiosamente, são poucos os registros de estudos puramente históricos sobre a teoria atômica de Bohr até o ano de 1962, quando algo de relevante deve ter acontecido, já que há, nos anos seguintes, uma indiscutível proliferação de abordagens históricas do período

¹ Nas abordagens contextuais, propõe-se que a aprendizagem de ciências deve ser acompanhada por uma aprendizagem sobre as ciências (ou sobre a natureza da ciência).

² Uma versão detalhada desse levantamento pode ser encontrada pelo leitor no Apêndice D.

(ROSENFELD, 1963; ROSENFELD e RUDINGER, 1968; HEILBRON, 1964; HEILBRON e KUHN, 1969; HIROSIGE e NISIO, 1964; HERMANN, 1969; FORMAN, 1971; HOYER, 1973). Se foi a morte do físico dinamarquês ou a publicação de *A Estrutura das Revoluções Científicas* (e é provável que tenham sido ambos!) o evento responsável por essa tendência em se debruçar sobre o contexto dos primórdios da Física Quântica, fato é que naquela década se sedimentaram narrativas que influenciariam os inúmeros trabalhos que seriam publicados sobre o tema nos anos seguintes.

O primeiro e talvez até hoje mais importante trabalho publicado que abordou de maneira central a teoria atômica de John William Nicholson, reconhecendo sua relevância histórica e sugerindo contribuições de suas ideias para o átomo de Bohr, foi o artigo *The Atomic Theory of John William Nicholson* (MCCORMARCH, 1966), do historiador da Ciência norte americano Russel McCormarch. Em um texto rico de informações biográficas, McCormarch não apenas refaz a trajetória intelectual de Nicholson em seus anos gloriosos, discutindo a recepção de seu trabalho pela comunidade científica, como também investiga cartas escritas por Bohr na época, revelando que o físico dinamarquês não só conhecia a obra de Nicholson como acreditou que em muitos pontos era equivalente à sua. O historiador encerra seu texto descrevendo a gradativa perda de relevância do astrofísico inglês nos estudos sobre estrutura da matéria. O artigo de McCormarch é um dos poucos trabalhos existentes que têm como objeto central o modelo de Nicholson e é, sem dúvidas, o mais completo texto sobre a sua hipótese atômica.

O renomado historiador da ciência dinamarquês Helge Kragh, por sua vez, tem publicado, nos últimos anos, trabalhos que conferem uma visão mais ampla da gênese, desenvolvimento e recepção da Antiga Teoria Quântica. Nesses trabalhos, Kragh tem dado atenção especial à recepção da teoria e às críticas por ela sofridas nos anos iniciais (KRAGH, 2011a e KRAGH, 2012). Tanto no artigo de 2011 quanto no livro de 2012, Kragh discute alguns modelos alternativos ao átomo de Bohr, entre eles o de John William Nicholson. Referindo-se ao desenvolvimento e recepção do átomo de Bohr, Kragh (2011a), afirma que, para se compreender profundamente uma teoria científica em seu contexto histórico, demanda-se uma perspectiva histórica mais simétrica que aquelas frequentemente direcionadas ao período, uma que cubra tanto opositores quanto partidários da hipótese. Segundo o estudioso, ao negligenciar a presença dessas vozes dissonantes, estaríamos sob o risco de produzir uma narrativa incompleta e distorcida.

Neste mesmo ímpeto, destaco ainda a tese de doutorado de Lopes (2009) como um substantivo trabalho nacional que aborda a obra de Nicholson. Em seu texto sobre os modelos atômicos do início do século XX, além de dedicar um capítulo inteiro à discussão da proposta

do astrofísico, antecedida por uma interessantíssima biografia do mesmo, o historiador se debruça nas críticas feitas por Nicholson ao modelo de Bohr.

Uma grande inspiração para essa dissertação é o livro do historiador da ciência Eric Scerri. Em seu *A Tale of Seven Scientists* (2016), Scerri nos apresenta uma narrativa a partir dos feitos de cientistas desconhecidos, a quem ele chama de “figuras menores” (além de Nicholson, Anton Van den Broek, Richard Abegg, Charles Bury, John D. Main Smith, Edmund Stoner e Charles Jenet) cujos trabalhos foram essenciais para o desenvolvimento da Química Moderna. Em todos os casos relatados, as contribuições desses cientistas consistiram no aprimoramento ou correção de suas ideias equivocadas por sucessores mais afortunados. A conclusão de Scerri é a de que categorizar aquelas teorias como simplesmente erradas em nada contribui para uma imagem coerente do progresso científico: a ciência se desenvolve por causa dos erros, e não apesar deles.

Destacando o que seria uma insuficiência da epistemologia empirista em compreender de maneira fidedigna alguns momentos históricos da ciência, Silveira e Peduzzi (2006) abordam três episódios de descoberta científica, um deles a formulação do modelo atômico de Bohr, advogando que, do ponto de vista didático, a Filosofia da Ciência contemporânea pode contribuir para novas formas, ainda pouco exploradas, de se compreender o funcionamento do empreendimento científico. Essa abordagem, argumentam, pode contribuir para uma História da Ciência muito “mais rica, dinâmica e complexa” (SILVEIRA e PEDUZZI, 2006, p. 26). Em outro artigo (PEDUZZI e BASSO, 2003), a ideia de se explorar a história do átomo de Bohr a partir de uma epistemologia alternativa à empirista é explorada sob a ótica lakatosiana dos programas de pesquisa. Segundo os autores, uma concepção historiográfica empirista mitigaria o papel do erro científico e da tentatividade, aspectos reconhecidos pelos mais notáveis filósofos da Ciência - tais como Thomas Kuhn, Karl Popper e Gaston Bachelard - como constitutivos do conhecimento científico.

Moura (2014), por sua vez, apresenta-nos uma proposta didática aplicada no ensino médio, de ensino de modelos atômicos paralela a uma discussão explícita de elementos da NdC a partir de uma narrativa que introduza personagens históricos “tradicionalmente inexplorados” do final do século XIX e início do XX. Em seu relato histórico, além dos modelos “canônicos”, o pesquisador apresenta sinteticamente as hipóteses atômicas de Jean Perrin, Hantaro Nagaoka e de John William Nicholson.

Vasconcelos e Forato (2018) também apresentam uma abordagem contextual do modelo atômico de Bohr que seja uma alternativa à visão tradicional “de uma história linear, elitista, ingênua, neutra, e produtora de provas irrefutáveis, mediante um único método universal.”

(VASCONCELOS e FORATO, 2018, p. 851). As autoras chamam a atenção para a tendência de se ensinar o átomo de Bohr fazendo referência apenas para algumas ideias (estudo de espectros luminosos, hipótese quântica de Planck, além dos modelos de Dalton, Thomson e Rutherford) como se fossem suficientes para conduzir Bohr a sua teoria do átomo quântico. Nesse sentido, propõem a discussão de modelos pouco conhecidos, como o de Nagaoka e o de Nicholson, cujos aspectos físicos essenciais discutem na narrativa a ser utilizada como material de apoio de sua proposta didática.

Em relação à maneira como o modelo de Bohr é retratado em livros didáticos, Ramírez et al. (2010) analisaram dezessete livros-didáticos que abordam o tema (dez para o ensino universitário e sete para o ensino médio) e concluíram que os modelos são, na maioria das vezes, apresentados já elaborados, sem referências aos problemas que lhes originaram. Alertam, ainda, para o fato de que as controvérsias e dificuldades enfrentadas pela pesquisa em estrutura da matéria na época são ignoradas. As abordagens da maioria dos livros, portanto, não são suficientes para superar visões de senso comum sobre as ciências. Os autores categorizaram quatro blocos de “visões inadequadas” encontradas nos livros didáticos, a saber, uma imagem aproblemática e ahistórica, uma imagem rígida da ciência, uma visão positivista e uma visão simplista (RAMÍREZ et al, 2010, p. 622-3).

Basso e Peduzzi (2003), por sua vez, avaliaram que, em livros didáticos de Física do ensino médio, há uma ênfase numa perspectiva empírico-indutivista do conhecimento, como se o modelo de Bohr fosse uma resposta a uma situação experimental específica, a explicação da equação de Balmer-Rydberg. Em sua análise, perceberam que, dos cinco livros avaliados, apenas dois apresentaram adequadas contextualização histórica e orientação epistemológica.

A sub-representação de Nicholson pôde ser constatada tanto na área de Ensino de Ciências, quanto na de História da Ciência. Em alguns trabalhos da área, a compreensão de que, a fim de se afastar de visões sobre a ciência consideradas simplistas, é imperativa a necessidade de se reconstruir historicamente episódios cruciais da HC, seja sob referenciais da filosofia contemporânea (BASSO, 2004), seja a partir de narrativas que considerem o papel de “figuras tradicionalmente excluídas” (VASCONCELOS e FORATO, 2018 e MOURA, 2014). Foi possível concluir que, dentre os aspectos considerados como problemáticos na abordagem do período - seja em livros de química ou física, tanto no nível médio quanto universitário – dois aspectos ignorados nos relatos oficiais foram recorrentemente mencionados: o primeiro aspecto se refere à crítica, a controvérsia e os limites da teoria, assim como a menção a modelos alternativos; o segundo diz respeito à cooperação e inter-relação entre os membros da comunidade científica da época. Como dissemos, apesar de ainda

tímidas, foram identificadas na área de Ensino de Ciências tanto uma tendência em apresentar episódios da HC a partir de uma perspectiva que considere as contribuições científicas de personagens tradicionalmente inexplorados, quanto tentativas de fazer uso da Filosofia da Ciência para compreender aspectos da Natureza da Ciência através de estudos historicamente estruturados. Nesse sentido, este trabalho pode ajudar a fortalecer esta tendência por duas vias, tanto por fazer uso de referenciais da Filosofia da Ciência contemporânea para lançar luz à HC, quanto por destacar o papel de figuras secundárias para o desenvolvimento da ciência. Outra contribuição desta pesquisa está enraizada no fato de que pesquisadores (TEIXEIRA et. al, 2012a; 2012b) vêm alertando que ainda são poucos os estudos que se dedicam a uma intervenção prática com o uso de História e Filosofia da Ciência (HFC), o que indica a necessidade de maiores esforços empreendidos neste sentido.

Diante disso, argumentamos que o contato com a Filosofia da Ciência contemporânea pode auxiliar nossos objetivos de aprendizagem na medida em que tanto afasta os discentes de visões consideradas “senso-comum” como lhes fornece ferramentas conceituais para analisar a HC. Desse modo, o objetivo deste trabalho é investigar como uma sequência didática, que discute as contribuições de figuras históricas secundárias para o desenvolvimento científico a partir de dois referenciais epistemológicos – o evolucionário e o revolucionário -, contribui para a compreensão dos alunos sobre aspectos da Natureza da Ciência associados ao erro científico.

No Capítulo 1, apresentaremos as bases conceituais tanto para uma epistemologia de ruptura ou revolucionária, quanto para uma perspectiva epistemológica selecionista ou evolutiva. No Capítulo 2, analisaremos como a visão de ciência adotada neste trabalho pode convergir para um frutífero debate sobre o papel do erro no progresso científico. No terceiro capítulo, é apresentada uma narrativa da ascensão da Antiga Teoria Quântica com enfoque nas contribuições dadas pela teoria atômica de Nicholson à escrita de *Sobre a Constituição de Átomos e Moléculas*, de Niels Bohr; o texto construído subsidiou parte do material de apoio usado na sequência didática. Finalmente, no Capítulo 4, apresentaremos o processo de construção e implementação da sequência didática aplicada a uma disciplina de física de uma universidade baiana.

CAPÍTULO 1 – AS EPISTEMOLOGIAS EVOLUCIONÁRIA E REVOLUCIONÁRIA

Destacar o papel de teorias equivocadas na engrenagem da empresa científica é uma oportunidade de debater aspectos importantes da produção do conhecimento científico, todos em algum nível associados ao erro, entre os quais podemos destacar o caráter tentativo e mutável de teorias, o caráter coletivo da descoberta científica, a inexistência de um método científico rígido e imutável, a natureza dos processos de seleção entre hipóteses rivais, a pluralidade de explicações possíveis para um mesmo conjunto de dados experimentais e a confiabilidade da ciência. Como essas características poderiam ser amplificadas em uma abordagem historiográfica da Ascensão da Antiga Teoria Quântica? Em outras palavras, qual modelo epistemológico melhor destaca aspectos da NdC associados ao erro científico? Ao longo do século XX, algumas teorias epistemológicas foram desenvolvidas por filósofos da ciência a fim de construir um modelo que descrevesse de maneira fiel a forma como a ciência se desenvolve. Optamos por concentrar nosso estudo nas implicações historiográficas dos modelos evolutivo e revolucionário que ecoam as filosofias de, respectivamente, Karl Popper e Thomas Kuhn, dois dos mais importantes filósofos da ciência do século passado. Como tanto a obra de Popper quanto a de Kuhn são fiadoras da reaproximação da História e Filosofia da Ciência com o Ensino de ciências, é possível valorizar uma ciência mutável, tentativa, plural e coletiva, onde erros e tropeços contribuem para o progresso, tanto pela via evolucionária quanto pela revolucionária. Do ponto de vista evolutivo, hipóteses não advêm unicamente do experimento, mas nascem de um “horizonte de expectativa” herdado do passado pela educação científica; conjecturas sobre como o mundo é, variantes, concorrem pela aceitação de uma comunidade científica, instituição social condutora do processo de seleção natural. As que melhor respondem a um processo de escrutínio em que testes severos são conduzidos são as aptas ao meio ambiente seletor; as que falham nesses testes, entram em obsolescência. Em uma visão kuhniana, por outro lado, um paradigma vigente constitui a “visão de mundo” de uma comunidade científica, o que inclui a determinação de problemas de interesse e soluções possíveis. Ciência-normal ocorre durante a vigência de um paradigma, quando o progresso se dá de maneira cumulativa e erros e acertos são caracterizados em função do olhar paradigmático vigente. Com a aparição de anomalias e incapacidade da “visão de mundo” em dar respostas adequadas, é iniciado um período de crise em que pode ocorrer uma ruptura, uma mudança de paradigma via revolução. Há, então, a “obsolescência” de uma visão de mundo em detrimento

de outra. Neste capítulo, apresentaremos as bases conceituais destas duas epistemologias.

1.1 – A epistemologia revolucionária de Thomas Kuhn.

Podemos dizer que *A Estrutura das Revoluções Científicas*, de Thomas Kuhn, é a consequência de um intenso debate que ocorreu nas décadas anteriores, onde a voz do filósofo francês Alexandre Koyré foi proeminente; um debate que pode ser, grosso modo, traduzido na tensão entre internalismo e externalismo³. A controvérsia não era de natureza epistêmica, mas metodológica. Entre as décadas de 1930 e 1940 do século passado, as epistemologias históricas estavam assentes: “*Felizmente, não é mais necessário insistir sobre o interesse do estudo histórico em ciência*” (KOYRÉ, 1966, p. 11 apud OLIVEIRA, 2012 p. 1). Junto ao crescimento impressionante da ciência e de suas aplicações tecnológicas, observou-se o desenvolvimento das análises teóricas *sobre* a ciência. Esse processo produziu a ideia de que a ciência tem uma história, não apenas no sentido cronológico, mas, antes, uma história imbuída de uma concepção epistemológica: a história da ciência tem fortes implicações no próprio desenvolvimento do conhecimento científico. O reconhecimento da atividade científica como uma atividade histórica conduziu a própria epistemologia a tornar-se uma epistemologia histórica, em oposição às epistemologias fundacionistas, i.e, empirista e racionalista (CONDÉ, 2017).

Esse movimento de transformação na historiografia da ciência atravessou décadas e encontrou sua expressão mais complexa em 1962, na obra de Kuhn. A mudança a que nos referimos diz respeito a um rompimento com a tradição antecessora, aquela cujo método historiográfico consistia na busca por contribuições do passado para o conhecimento atual. Nessa busca, o conhecimento histórico era lido com as lentes do presente. A “nova historiografia”, por outro lado, procura compreender as ideias científicas dentro de seu contexto histórico particular, conferindo uma coerência interna à narrativa.

O fato é que Kuhn foi não só influenciado pelo historicismo de Koyré, mas também pela circunstância notável de que o modelo historiográfico do filósofo francês estava fundamentado na matemática e na física clássica. Para Koyré, a mecânica newtoniana foi uma revolução do

³ A controvérsia dizia respeito a quais seriam as causas do advento da ciência moderna. Sobre este debate, ver Condé (2017).

pensamento humano em relação à “física” de senso-comum, intuitiva, de Aristóteles. Essa drástica transformação no sistema de referência não pode ser explicada em termos outros que não revolucionários, dado que o caráter completamente contra-intuitivo da física clássica afasta a possibilidade de se sugerir uma influência entre os sistemas de conhecimento. Segundo Condé (2018, pp. 175-176), juntamente com Hall e Cohen, Kuhn se filia a uma tradição de “historiadores revolucionários”, influenciados pela obra de Koyré e para quem o progresso do conhecimento se estabelece via revolução.

A leitura histórica de Koyré se opõe a do físico e filósofo francês Pierre Duhem, para quem a ciência moderna só foi possível devido à tradição de pensamento medieval, de onde já se podia observar os elementos que iriam ser constitutivos do que se chamou Revolução Científica. Na perspectiva duheniana da HC, rupturas intelectuais súbitas são eventos muito raros e, via de regra, a ciência progride lenta e gradualmente:

O estudo das origens da estática nos levou, assim, a uma conclusão; à medida que desenvolvemos nossas pesquisas históricas mais adiante e em direções mais variadas, esta conclusão se impôs a nosso espírito com uma força crescente. Assim, ousaremos formulá-la em sua plena generalidade: a ciência mecânica e a física, de que se orgulham com razão os tempos modernos, decorrem, por uma série ininterrupta de aperfeiçoamentos pouco sensíveis, das doutrinas professadas no seio das escolas na Idade Média; as pretensas revoluções intelectuais foram, na maioria das vezes, somente evoluções lentas e longamente preparadas; as supostas renascenças, apenas reações frequentemente injustas e estéreis; o respeito pela tradição é uma condição essencial do progresso científico (DUHEM, 1905, pp. 3-4 apud OLIVEIRA, 2012, p. 19).

Kuhn reconhecia na obra de Duhem uma lição essencial à edificação das novas historiografias, a afirmação da necessidade de se compreender a “física” da Idade Média nos seus próprios termos. É preciso pontuar, portanto, que nunca houve rejeição de Kuhn a uma continuidade no conhecimento científico, nem mesmo no conhecimento por acumulação, que era como ele caracterizava o progresso durante os períodos de ciência normal:

A ciência normal, atividade que consiste em solucionar quebra-cabeças, é um empreendimento altamente cumulativo, extremamente bem-sucedido no que toca seu objetivo, a ampliação contínua do alcance e da precisão do conhecimento científico. Em todos esses aspectos, ela se adequa com grande precisão à imagem habitual do trabalho científico (KUHN, 1982, p. 77).

Pelo contrário, Kuhn chegou a esboçar, no final de sua vida, uma epistemologia de bases evolucionárias, infelizmente jamais concluída. A oposição kuhniana era a um modelo

que considerasse a ciência como função de um processo histórico exclusivamente cumulativo, o que era uma infeliz “consequência da tentativa de se reescrever sempre a história da ciência a partir de um ponto de vista, de um aparato conceitual do presente” (OLIVEIRA, 2012, p. 12-13).

É frequente nos argumentos descontinuístas a alusão a uma eventual injustiça histórica que vitimaria os grandes gênios da HC se adotássemos uma visão continuísta, pois, como elucidada Koyré numa famosa crítica ao trabalho de Duhem, apartada a ideia de revolução, Leonardo Da Vinci deixa de ser reconhecido por seu intelecto genial e aparece como um mero elo histórico entre a Idade Média e a Modernidade. Também Bernard Cohen, cientista e historiador norte-americano, critica a busca por elos entre os grandes feitos científicos, afirmando que, ao procurar insistentemente predecessores históricos de ideias científicas, o historiador parece alguém “que sente o maior prazer em reduzir os gigantes criativos da ciência ao status de pigmeu” (COHEN 1977, p. 317 *apud* OLIVEIRA 2012, p. 7). Talvez não seja o caso, entretanto, de que o brilhantismo das grandes mentes da HC seria ofuscado ao considerarmos que as mais espetaculares ideias de que tomamos notícia não emergiram única e exclusivamente devido à genialidade de seus “donos”, mas também devido a um processo de cooperação com seus pares.

Na tese kuhniana, a descontinuidade se explica pela incomensurabilidade entre paradigmas contíguos. Durante um certo período, uma dada comunidade científica opera segundo um conjunto de regras, valores, crenças, em suma, um sistema de referência que guia as investigações científicas. Como se sabe, para Kuhn, a ciência cresce também cumulativamente durante os períodos de ciência normal que eram, efetivamente, os períodos em que os cientistas mais empregavam seu tempo, procurando ampliar o domínio da teoria vigente, fortalecendo o poder explicativo dentro do paradigma. Durante os períodos de ciência normal, um paradigma fornece aos cientistas uma tradição de pesquisa que não somente determina as soluções aceitáveis para um problema, mas que também estabelece quais são os problemas relevantes para aquela área de investigação. Um período de crise, entretanto, se inicia quando o paradigma não consegue explicar novos fenômenos, mobilizando cientistas insatisfeitos com os modelos vigentes a buscarem novas explicações, totalmente apartadas do sistema de referência que conhecem. Cedo ou tarde, uma dessas explicações, i.e, um dos paradigmas concorrentes, se mostrará mais atrativa aos olhos da comunidade científica por motivos nada racionais; a escolha se daria por razões estéticas, emocionais e até políticas e religiosas (SAITO, 2013, p. 189). Quando um paradigma ocupa o lugar de outro, diz-se ter havido uma revolução científica e o critério utilizado por Kuhn para encontrar revoluções na

história das ciências é o de incomensurabilidade: quando dois sistemas de referência contíguos no tempo têm uma linguagem incompatível, aí está o limite entre um paradigma e o seu sucessor.

Um dos problemas com esse critério é o de que se torna impossível localizar temporalmente o momento preciso em que conceitos, termos, métodos científicos se tornaram obsoletos em detrimento de outros: e a possibilidade de situar precisamente esse momento de inflexão intelectual, cremos, é um requisito para tipificar o processo como uma ruptura. A não ser, é claro, que estejamos dispostos a flexibilizar o sentido do termo “revolução”, considerando uma espécie de “ruptura estendida no tempo”. Um dos críticos da epistemologia kuhniana é o filósofo argentino Mário Bunge, para quem as revoluções científicas não seriam tão dramáticas quanto queria o pensador norte-americano; cientistas sempre são capazes de reconhecer os erros empíricos de suas teorias e, conquanto mudanças conceituais possam, de fato, ser dirigidas por aspectos externos à ciência, isso não implica que critérios internos, objetivos, não as provoquem com frequência. “Só os charlatões rechaçam a totalidade do conhecimento existente” (BUNGE 1985, p. 51 apud ARIZA e HARRES 2002, p. 74).

Toulmin, por sua vez, aponta que, ao longo dos anos, a ideia de revolução científica foi sendo moderada pelo seu autor: antes encarado como um evento raro e dramático, Kuhn passa a reconhecer a ocorrência frequente de revoluções, o que certamente reduz o impacto da mudança conceitual. Assim, para Toulmin, não seria o caso de revoluções contundentes interrompendo os períodos de continuísmo da ciência normal, mas, antes, o caso de se considerar microrevoluções identificadas como unidades de variação, de modo que “as teorias comumente aceitas em cada fase servem de ponto de partida para um grande número de variantes sugeridas” (TOULMIN 1970, p. 57 apud ARIZA e HARRES, 2002, p. 74).

Ao menos no senso comum, entretanto, a palavra “revolução” tem um sentido muito forte, o de um rompimento radical, súbito, violento e inesperado com um sistema precedente. Aplicado à ciência, essa acepção do termo implica necessariamente em uma descontinuidade, em um distanciamento das teorias científicas da tradição que as precedeu, um distanciamento tão radical que interdita a possibilidade de comunicação entre dois sistemas de referência, já que, no limite, sequer compartilham uma linguagem comum. Portanto, o novo paradigma não explica nem mais nem melhor os fenômenos antes explicados pelo anterior; os conceitos, as teorias, os métodos, enfim, a linguagem (taxonomia lexical, em termos kuhnianos) usada por paradigmas distintos é incomensurável, o que (ao menos essa foi a conclusão de parte significativa dos leitores de Kuhn) inviabiliza a comparação entre eles: paradigmas apresentam visões de mundo diferentes, incluindo critérios de racionalidade distintos. Uma

conclusão sensata da incomensurabilidade, portanto, seria a de que não dispomos de critérios racionais para decidir entre teorias concorrentes.

Não demoraria, assim, para que algum programa relativista “cooptasse” as ideias de Kuhn. De fato, o Programa Forte da Escola de Edimburgo⁴, liderado por David Bloor e Barry Barnes ascendeu na década de 1960 com uma proposta de sociologia do conhecimento científico que, ao fim e ao cabo, concluía que a aceitação de teorias científicas era explicada preponderantemente por negociações de origem social. Afinal, se cada paradigma possui um corpo isolado de regras institucionais que definem o seu critério de verdade, o que é verdadeiro depende sempre de um ponto de vista: “*verdadeiro a partir de qual paradigma?*”, poderíamos sempre perguntar.

Kuhn passou os 30 anos que seguiram a publicação de sua obra seminal se defendendo das imputações relativistas, muitas delas partidas de Karl Popper. Mais tarde, o próprio Kuhn tecerá críticas ao que considerou excessos do socioconstrutivismo. Para o filósofo norte-americano, ao se concentrarem exclusivamente na tese da “construção social da ciência” a partir de práticas de negociação, os estudiosos do Programa Forte relegavam as experiências, as análises conceituais e a lógica dos argumentos a uma posição marginalizada, o que definitivamente nunca foi seu ponto⁵. Pelo contrário, Kuhn julgava que a atividade científica se diferenciava das demais práticas sociais justamente devido ao seu “diálogo” com a natureza, característica que condenava ao erro qualquer epistemologia que ignorasse o papel essencial dos fenômenos naturais para edificação do conhecimento científico. O “segundo Kuhn”, aquele que assume uma posição crítica em relação ao seu trabalho de 1962, esclarece que a incomensurabilidade a que se referia era “mais modesta do que supuseram muitos de (seus) críticos” (KUHNS, 2006, p. 51). Ela deveria ser entendida como um tipo de intraduzibilidade relativa a duas taxonomias lexicais distintas:

A maior parte dos leitores do meu texto supusera que, quando eu falei de teorias incomensuráveis, queria dizer que elas não podiam ser comparadas. Mas ‘incomensurabilidade’ é um termo retirado da matemática onde não implica tal coisa [...] O que falta não é a comparabilidade, mas uma medida de

⁴ Idealizado por sociólogos da Universidade de Edimburgo, esse movimento pode ser lido como uma radicalização da sociologia da ciência de Robert Merton (tese de Merton). Se para este as análises sociológicas da ciência deveriam limitar-se ao nível institucional, para David Bloor e seus pares mesmo a gênese do conhecimento físico-matemático era passível de análise sociológica.

⁵ De fato, como nos lembra CONDÉ (2017, p. 88), apesar da grande influência que exerceu nas abordagens sociais da ciência, *A estrutura* agradou muito aos cientistas, filósofos e historiadores da ciência de orientação internalista e mesmo a filósofos neopositivistas como Carnap. Koyré elogiou o livro de Kuhn, enviando-lhe uma carta onde afirmava que ele havia conseguido aproximar as abordagens internalista e externalista

comprimento em termos da qual ambos possam ser medidos direta e exatamente (KUHN, 1976, p.190-1).

Os membros de uma comunidade discursiva podem produzir enunciados que, apesar de dotados de sentido em seu próprio campo lexical, não podem ser em princípio articulados pelos membros da outra. Isso protege a incomensurabilidade da crítica de que ela impediria mesmo a realização de historiografia porque teríamos sempre um historiador analisando o conhecimento científico através das lentes de seu próprio paradigma. Segundo Kuhn, conquanto a incomensurabilidade implicasse intraduzibilidade, não implicava incompreensão, e era isso o que historiadores da ciência faziam: aprendiam o sentido dos conceitos dentro da lógica interna do período em que ele foi germinado (como quem aprende uma segunda língua) sem remetê-los, portanto, a um quadro comparativo do presente. Como na linguagem é possível que haja sobreposições parciais entre os diferentes léxicos, o mesmo se dá na relação entre teorias científicas de épocas diferentes. Historiadores da ciência seriam, assim, bilíngues, e não tradutores. Conquanto haja diferenças lexicais significativas entre duas linguagens, algo sempre se conserva; os elementos que se sobrepõe de uma teoria a outra, invariáveis, são a evidência da relação que a linguagem científica tece com o natural, ele mesmo constante. Com esse ajuste, Kuhn vacinava contra o relativismo um conceito essencial de sua obra, sob o preço do abandono do descontínuísmo radical a que sua teoria original parecia conduzir. (KUHN, 2006)

Importou-nos fazer essa referência aos ajustes que Kuhn fez à ideia de incomensurabilidade ao longo dos anos porque são sintomas de sua insatisfação com algumas das implicações de sua epistemologia original e, mais do que isso, da sua vontade de redefinir seus conceitos centrais de maneira que não pudessem mais servir de instrumento a interpretações relativistas. Esse compromisso intelectual do “segundo Kuhn” o levou a esboçar uma teoria da ciência que seria apresentada no livro *A pluralidade dos mundos: uma teoria evolucionária da descoberta científica*. Como sugere o subtítulo do seu projeto, em sua última fase Kuhn havia chegado à conclusão de que um modelo evolucionário era o mais apropriado para descrever a ciência. Apesar de jamais publicado, Kuhn nos deixou pistas da roupagem que sua nova teoria do conhecimento assumiria em alguns artigos, reunidos em 2000 no livro *O caminho desde a estrutura*. Mais precisamente, Kuhn havia começado a usar uma referência darwiniana para descrever o conhecimento científico já no final de *A estrutura*, de maneira ainda bastante incipiente.

Eu tentei fortalecer e ampliar o paralelo entre o desenvolvimento científico e biológico sugerido no final da primeira edição de *A estrutura: o desenvolvimento científico deve ser visto como um processo impulsionado de trás, não empurrado à frente – como evolução vinda de, em vez de evolução indo para* (KUHN, 2000, p. 96 apud CONDÉ, 2018, p. 165).

Além das alterações à ideia de incomensurabilidade, Kuhn substitui os paradigmas pela concepção de comunidades linguísticas e a mudança de paradigma por um processo de especiação; esse último seria conduzido por uma mudança lexical, e não por revoluções. Entretanto, apesar de moderar significativamente a força delas em sua obra, Kuhn jamais abandona completamente a ideia de revolução (CONDÉ, 2017), adaptando-a a sua compreensão de paradigmas como comunidades linguísticas

O conceito de revolução científica originou-se na descoberta de que, para compreender qualquer porção da ciência do passado, o historiador precisa, em primeiro lugar, aprender a linguagem em que tal passado estava escrito. Tentativas de tradução para uma linguagem posterior seguramente falham, e o processo de aprendizagem de linguagem é, portanto, interpretativo e hermenêutico. Uma vez que o sucesso na interpretação é em geral alcançado em grandes parcelas [...], a descoberta que o historiador faz do passado repetidamente envolve o reconhecimento súbito de novos padrões ou *gestalts*. Segue-se que, pelo menos o historiador experiente, com efeito, revoluções. Essas teses encontravam-se no cerne de minha posição original, e ainda insisto nelas (KUHN, 2006, p. 75).

Nesta incipiente teoria do conhecimento do “segundo Kuhn” se revelará uma atenuação de seu descontínuismo, evidenciada pela moderação da força revolucionária atuante na historiografia da ciência, enquanto assume um modelo de evolução do conhecimento de matriz biológica e não mais física. As revoluções, agora subjetivas, dependendo de uma impressão do historiador, perdem sua força, mas se mantêm vivas na visão do filósofo norte-americano, inclusive para explicar a ramificação a que áreas do conhecimento estão sujeitas após um período de crise, processo que encontra paralelo na especiação biológica. Especiação e incomensurabilidade seriam, assim, aspectos essenciais para uma boa historiografia da ciência, ambos intimamente relacionados à ocorrência de revoluções.

Diante de tamanhas modificações na sua compreensão original, poderíamos perguntar, como faz Scerri (2016, p. 199), se é possível a coexistência, como pretende Kuhn, de evolução com revoluções. Cremos que a pergunta é uma armadilha e que uma resposta demandaria que “revolução” fosse um termo imune à equivocidade, o que, definitivamente, não parece ser o caso. Diante da pungência da análise histórica de Duhem acerca da influência

que o pensamento do medievo exerceu na ciência moderna, Koyré observa que “uma revolução bem preparada não deixa de ser uma revolução” (KOYRÉ, 1991, p. 156 apud OLIVEIRA, 2012, p. 7). Claramente, os dois pensadores entendem de maneira distinta o termo “revolução”. E a aceção que conferem ao termo está associada à precisão das lentes que usam para enxergar a HC. Nosso ponto é que um descontinuista pode sempre - diante dos inúmeros episódios de significativa mudança conceitual que nos apresenta a HdC e contra alguém que lhe apresente evidências de um gradual processo histórico que conduziu àquela mudança - ajustar a revolução, diluindo-a cronologicamente e observando que a existência de predecessores de uma ideia científica inovadora não altera sua natureza revolucionária. Mesmo Kuhn, em *A revolução copernicana*, nos mostra como “esta revolução precisou de cento e cinquenta anos para ser completada e de como os antecessores e sucessores de Copérnico influíram para o desdobramento dela”, o que revela uma notável similaridade com o método de análise de Duhem: se este via na figura de Leonardo da Vinci um elo histórico entre Idade Média e Modernidade, também Kuhn via Copérnico como uma conexão entre a tradição aristotélica e a newtoniana (OLIVEIRA, 2012). Ajustando-se convenientemente o termo “revolução”, não só a segunda epistemologia de Kuhn é compatível com uma roupagem evolutiva como mesmo aquela presente em *A estrutura* o é.

Nesta secção, objetivamos discutir a controvérsia epistemológica revolução *versus* evolução, enfatizando as bases conceituais de uma epistemologia de ruptura. Na secção seguinte apresentaremos teorias do conhecimento de matriz darwinista ou, mais precisamente, selecionista. Abordaremos as ideias de alguns epistemólogos evolutivos do século XX, dando maior destaque à teoria do conhecimento de Karl R. Popper.

1.2 – A epistemologia evolucionária de Karl Popper

O impacto da publicação de *A Origem das Espécies* no século XIX não foi sentido apenas nas ciências duras; antes, seus efeitos ecoaram também na Filosofia da Ciência, estabelecendo conceitos que seriam a base de novas concepções epistemológicas. Darwin naturalizara o homem, instituindo-o como o produto de um processo evolutivo de desenvolvimento. Ora, a obviedade de que o conhecimento é uma atividade humana conduz à conclusão de que conhecer é, ao fim e ao cabo, uma atividade natural; e, por conseguinte, não seriam precisamente os métodos das ciências naturais os mais seguros para investigar os fundamentos desta atividade?

Uma concepção evolutiva do conhecimento se opõe tanto às epistemologias

empiristas, que consideram serem as teorias científicas tuteladas pela observação, quanto às idealistas, segundo as quais as teorias seriam fundamentadas por categorias racionais a priori. O método hipotético-dedutivo, que pode ser considerado um apêndice das epistemologias evolucionárias, é caracterizado por um processo inicial onde há uma grande liberdade criativa para criação de hipóteses, que contrasta com uma segunda etapa, mais restritiva, onde as consequências observacionais das hipóteses são confrontadas com a experiência; a hipótese “sobrevivente”, melhor testada, é retida enquanto as outras são descartadas. O procedimento, descrito sinteticamente, é análogo ao mecanismo darwinista de variação-seleção-retenção.

Segundo Vollmer (2004), o próprio Darwin estava consciente de que sua teoria possuía implicações epistemológicas, o que seria evidenciado com sua passagem “Platão disse, em sua *Paidéia*, que nossas ‘ideias necessárias’ advêm da preexistência da alma, não da experiência – leiam preexistência como macacos” (VOLLMER, 2004, p. 197)⁶. A passagem é bastante elucidativa da essência filosófica das epistemologias evolucionárias, bem expressa no pensamento de um dos seus maiores representantes, o filósofo austríaco Karl Popper. Popper se notabilizou por sua crítica tanto a um idealismo kantiano que considerava a existência de categorias de nosso entendimento que eram válidas a priori, inatas ao espírito e portanto independentes da experiência, como rejeitou os modelos epistemológicos empiristas, por ele chamados como “teorias do balde mental” justamente por considerarem nosso entendimento como um balde vazio passivamente preenchido por experiências sensoriais. Como veremos, sob uma perspectiva evolutiva, o desenvolvimento do conhecimento é explicado tanto em função de elementos inatos (a origem metafísica do entendimento é substituída por um mecanismo com função análoga à hereditariedade biológica) como de elementos observacionais.

Em um modelo evolucionário, a criação de hipóteses não está condicionada nem à experiência nem a categorias do pensamento válidas a priori. A resposta evolucionária para a constituição da matéria-prima de nossas teorias não é nada trivial, mas podemos antecipar alguns aspectos gerais: assim como nas espécies biológicas, esse organismo a que chamamos ciência deve possuir um mecanismo de reprodutibilidade que garante a retenção das hipóteses mais aptas ao longo do tempo. As teorias aceitas numa área de pesquisa em um dado momento, os valores, crenças, problemas relevantes e soluções possíveis constituem-se num “horizonte de expectativas” que limita as variantes (hipóteses) possíveis de serem produzidas

⁶ Vollmer (2004) diz dever a nota a M.T. Ghiselin (1973, p. 965).

naquela área de pesquisa, naquele momento histórico. Tais variantes geralmente surgem diante da necessidade de solução de um problema, digamos, a descrição correta de um fenômeno e, por não “conhecerem” a constituição exata da natureza, constroem, em sua cegueira⁷ e a partir de seu horizonte de expectativas, conjecturas, hipóteses de como o mundo é. Essa tentativa de “tatear” os fenômenos depende de uma extrapolação das conjecturas em relação ao que foi previamente dado, isto é, a construção de hipóteses assemelha-se a um expediente indutivo⁸.

Segundo Aguiar (2011, p. 12), três condições são necessárias para um modelo indutivo de solução de problemas: *um mecanismo para introduzir variações*, que poderíamos atribuir ao casamento entre o horizonte de expectativas, criatividade e imaginação da mente humana em desenvolver hipóteses científicas; *um processo consistente de seleção*, que encontra paralelo com o severo escrutínio da comunidade científica e *um mecanismo para preservar e reproduzir as variações selecionadas*, que pode ser equacionado com as diversas atividades sociais responsáveis por transmitir a cultura científica, entre as quais a mais complexa certamente é a educação.

Segundo Videira (2005, p. 227), antes que a Teoria da Relatividade e Mecânica Quântica aparecessem, a Física Clássica passou por um período de crise que a conduziu para uma intensa análise conceitual levada a cabo não apenas pelos filósofos da ciência, mas também pelos próprios cientistas. No final do século XVIII, esse movimento foi acentuado, na física, com as dificuldades de se unificar a teoria eletromagnética de Maxwell à Mecânica Clássica, dificuldade que mobilizou diversos físicos experimentais a conduzirem reflexões filosóficas. De fato, o séc XIX viu nascer - particularmente na Alemanha, onde o progresso

⁷ Segundo Aguiar (2011), a “cegueira” imputada às variações pode ter três conotações diferentes: “1) as variações emitidas são independentes das condições do ambiente na ocasião de sua ocorrência; 2) nenhuma tentativa da série, bem-sucedida ou não, tem maior probabilidade de ocorrer, em qualquer ponto da série, que outra; 3) nenhuma variação subsequente a uma tentativa incorreta é uma “correção” da tentativa prévia, nem faz uso da direção de erro da tentativa prévia” (AGUIAR, 2011, p. 12). Como resta claro, a conotação 3 enfraquece a analogia darwinista com o conhecimento científico, já que a implicação é a de que cientistas não podem aprender com os erros do passado, o que é um absurdo.

⁸ Pode parecer estranho que Popper proporia uma teoria do conhecimento que reconhecesse a ocorrência de quaisquer processos indutivos. A indução aqui aludida, entretanto, refere-se exclusivamente à circunstância de que as variantes produzidas (i.e, as hipóteses) precisam ser mais informativas do que os dados que lhes alimenta (i.e, o “horizonte de expectativas” ou as teorias vigentes no período). Precisam, além disso, produzir predições que não estarão sustentadas nem empiricamente nem numa concepção metafísica de racionalidade. Esse salto indutivo, portanto, é completamente cego, no sentido de que não há garantias de que a conjectura criada efetivamente dirá algo sobre a natureza, tampouco que será a mais apta entre as demais. Além disso, em Popper as teorias jamais são validadas em termos absolutos: a passagem por testes severos apenas assegura sua maior adaptabilidade relativa em relação a suas concorrentes.

das ciências naturais foi mais evidente no período - uma verdadeira geração de *cientistas-filósofos*, dentre os quais cabe destacar Heinrich Hertz, Wilhelm Ostwald, Gustav Kirschhoff, James C. Maxwell, Hermann von Helmholtz, Ernst Mach etc. (VIDEIRA, 2005). Nesse movimento de reflexão, sem dúvidas, a voz de Ludwig Boltzmann (1844-1906), um físico teórico austríaco conhecido por suas contribuições para Teoria Cinética dos Gases e Mecânica Estatística, foi uma das mais eloquentes neste debate. Suas reflexões filosóficas foram organizadas num conjunto de textos de origens variadas (artigos, palestras, aulas etc.), reunido no livro *Populäre Schriften* (Ensaio Populares).

A pungência com que a teoria de Darwin influenciou as considerações epistemológicas de Boltzmann pode ser evidenciada ao constatarmos o parentesco que os dois princípios fundamentais da filosofia do físico austríaco, o pluralismo teórico e o anti-dogmatismo, mantém com as ideias darwinianas de competição entre espécies e coexistência. Tanto Boltzmann quanto Maxwell estavam cientes de que as dificuldades que o eletromagnetismo apresentava quando sobreposto à mecânica newtoniana eram de natureza teórica e, à luz do *paradigma evolutivo* do século XIX, era imperativa a necessidade de compreender a história da física mais profundamente. Em outras palavras, era necessário compreender como as teorias – que, para Boltzmann são *representações herdadas* da realidade, e não a realidade em si - são escolhidas em detrimento de outras, concorrentes.

A implicação mais radical do pluralismo teórico defendido por Boltzmann é não apenas a de que um mesmo fenômeno pode ser explicado por teorias distintas, mas mesmo por teorias entre si contraditórias. Tal perspectiva é notoriamente incompatível com uma epistemologia que condicione a validação de teorias à existência de leis de pensamento imutáveis capazes de verificá-las. De fato, Boltzmann se opõe à concepção kantiana⁹ segundo a qual as categorias *a priori* relativas às leis do pensamento que fundamentam nossas representações ou imagens do mundo são necessariamente verdadeiras. Apesar de concordar com a anterioridade destas leis em relação à experiência, o físico negava que elas poderiam ser utilizadas como critério inquestionável para conduzir à verdade, visto que, apesar de constituídas aprioristicamente, tais leis do pensamento estão sujeitas à ação do processo

⁹ A rejeição de Boltzmann e demais cientistas-filósofos de seu século à filosofia pode ser melhor compreendida se a identificarmos com a metafísica e, mais especificamente, com as obras de Kant, Schopenhauer ou Descartes e suas leis de pensamento imutáveis que tutelariam todo nosso conhecimento. Boltzmann compreendia que, ao premiar essas leis como juízes inquestionáveis da validação do conhecimento humano, a filosofia tradicional se via diante de dificuldades insuperáveis, o que certamente não era desejado para as ciências naturais, razão pela qual, durante algum tempo de sua vida, o físico austríaco refletia sobre a necessidade de apartar qualquer reflexão filosófica das atividades científicas (VIDEIRA, 2005).

evolutivo e, portanto, são passíveis de erro, de se mostrarem inaptas. Essa adaptabilidade a que nosso pensamento e, no limite, nossas teorias e conceitos estão submetidos, depende das nossas necessidades de sobrevivência enquanto espécie. Para Boltzmann:

Não apenas o ser humano é um “produto” da evolução biológica, um resultado da luta incessante pela vida, mas todas suas realizações também o são. Boltzmann recusava a concepção tradicional que percebia o ser humano dividido em duas partes: o corpo, pertencendo à natureza da esfera física, e a alma, nada tendo a ver com ela. Também a alma – ou cérebro, como dizia Boltzmann – está submetida às regras biológicas da evolução. É a necessidade de superar as dificuldades colocadas pelo seu ambiente que obrigaria o homem a criar tudo aquilo que o distingue dos outros animais (VIDEIRA, 2005, p. 231-232).

Como dissemos, para Boltzmann as leis do pensamento são *a priori* porque são representações herdadas. Em sua concepção evolutiva do conhecimento, afirma que essas leis foram desenvolvidas desde os primeiros homens e encontram-se na mente humana sempre em sua forma mais refinada até que novas dificuldades oriundas da experiência apareçam e o processo de refino se reinicie. Em linhas gerais, projetamos na nossa mente, na forma de imagens, a associação entre objetos que, em algum grau, reflete a associação destes objetos na natureza. Associações internas mais adaptadas a seu correspondente no “mundo real” são mantidas enquanto que as regras de associação que conduzem a contradições com a experiência são rejeitadas.

Seguindo com uma metáfora jurídica, poder-se-ia dizer que Boltzmann, em oposição aos filósofos puros, despe nossa razão da toga e a coloca no banco dos réus¹⁰. Por não serem necessárias, mas contingentes, nossas leis podem sempre estar erradas e, quando isso ocorre, são rejeitadas e substituídas por novas representações, construídas cuidadosamente para não nos conduzir ao mesmo erro da anterior. A longevidade de uma lei de pensamento ou representação no sistema cognitivo humano depende unicamente de sua adaptabilidade às condições do instante; por óbvio, dizer que uma lei de pensamento está errada equivale a chamá-la de inapta. Além da falibilidade de nossas representações (que podemos equacionar com as teorias científicas) pelos motivos acima expostos, Boltzmann distingue

¹⁰ A concepção evolutiva epistêmica de Boltzmann era bastante singular. Para que fique claro por contraste, note que outro cientista-filósofo alemão, Heinrich Hertz, afirmava que a razão tinha a capacidade de impor à experiência certas condições que a tornavam inteligível. Portanto, em algum grau, podemos considerar Hertz um kantiano. Por outro lado, Hertz, como Boltzmann, admitia que mais de uma explicação poderia ser adequada a um conjunto de fenômenos.

cuidadosamente os termos “objeto” e “imagem”, usando o segundo para se referir à representação mental que fazemos dos entes físicos, estes, em sua essência, inacessíveis ao intelecto humano. Tal distinção deixa claro que, apesar da filosofia de Boltzmann não se comprometer, em absoluto, com explicações sobre a validade da correspondência entre signo e objeto, há um explícito reconhecimento de que a imagem é de uma natureza distinta do objeto que pretende representar (VIDEIRA, 2005, p. 236).

Todas as nossas representações são puramente subjetivas. (...) Eu denominei a teoria de uma imagem puramente intelectual interna, e nós vimos como ela pode ser enormemente aperfeiçoada. Como, então, seria possível evitar que, continuamente mergulhado nas profundezas da teoria, tomasse a imagem como sendo o próprio existente? (BOLTZMANN 2004, p. 55).

Assim, Boltzmann nos alerta para a armadilha que seria considerar nossas teorias científicas como explicativas da natureza ontológica dos fenômenos. Se tal fosse possível, nosso conhecimento não seria constituído de meras representações, mas de explicações que refletiriam fidedignamente os fenômenos naturais e, por conseguinte, apenas uma teoria explicativa seria adaptada para um dado conjunto de fenômenos. Na segunda metade do século XIX, o cenário científico não poderia ser mais distinto deste, com a proposição de várias teorias eletromagnéticas.

Apresentamos, de maneira bastante sucinta, as principais ideias relativas à epistemologia de Ludwig Boltzmann por duas razões: primeiramente, com o intuito de ilustrar a existência de epistemologias que incorporavam a teoria de Darwin já no século XIX, alguns décadas após a publicação de *A origem das espécies* (1859). A segunda razão é que Boltzmann parece ter antecipado muitas das ideias centrais de Popper que, como já adiantamos, constituirão uma das bases de sustentação epistêmica de nossa narrativa. Além de Popper, diversos outros filósofos da ciência se ocuparam de investir na analogia da ciência com o darwinismo. Não é de interesse deste trabalho, nem seria possível nos limites de tempo e espaço implicados no formato, exaurir todas essas abordagens, mas, antes, interessa-nos um objetivo mais modesto: a apresentação de uma visão geral dos fundamentos centrais deste tipo de concepção do conhecimento científico, dando ênfase à teoria do conhecimento de Karl Popper, a quem consideramos o maior expoente das epistemologias evolutivas.

Como já adiantamos, não é nova a ideia de que o entendimento humano - e por conseguinte o progresso científico – se desenvolve segundo regras de seleção natural análogas às da Teoria da Evolução de Charles Darwin. A extensão dos conceitos, dos modelos, princípios e da nomenclatura da biologia evolutiva para à epistemologia tem suas raízes no

século XIX com John Dewey, o primeiro filósofo a se apropriar do darwinismo para atacar questões filosóficas. Ao longo da história da Filosofia da Ciência, diversos autores se ocuparam do tema (Ludwig Fleck, Ludwig Boltzmann, Thomas Kuhn, Karl Popper, Donald Campbell, Willard Quine, Richard Dawkins, Konrad Lorenz, Rupert Riedl, Daniel Dennet etc.¹¹), chamando atenção para aspectos distintos da questão. Cunhadas como *epistemologias evolucionárias* pela primeira vez por Donald Campbell em 1974, estas perspectivas podem ser compreendidas como uma ramificação das abordagens epistemológicas naturalistas. A investida naturalista significa o abandono daquela tradição ortodoxa segundo a qual, no passado, as filosofias, por exemplo, de Kant e Descartes, tutelaram a ciência, estabelecendo a priori as pressuposições, os limites e a extensão do conhecimento científico nas abordagens conhecidas como transcendentais (DE CARO e MACCARTHUR, 2004).

Em um artigo de 1982, Lorenz apresenta um convincente argumento para a naturalização das categorias *a priori* que, segundo Kant, seriam responsáveis pelo sentido primeiro conferido às impressões sensíveis. Tais estruturas seriam, na verdade, o produto evolutivo *a posteriori* do desenvolvimento filogenético¹²:

Alguém familiar com os modos inatos de reação de organismos sub-humanos pode prontamente conjecturar que o que há de *a priori* é devido a diferenciações hereditárias do sistema nervoso central que se tornou característico da espécie, produzindo disposições hereditárias para se pensar de certa forma (LORENZ, 1982, p. 122 apud BRADIE, 1986, p. 404).

Duas teses apresentadas por Darwin em 1959 em *A Origem das Espécies*, ocupam o núcleo da questão: primeiro, a tese da descendência por modificação, segundo a qual todas as espécies derivam de um ancestral comum a partir de uma série de alterações; segundo, a tese da evolução por seleção natural, i.e, as alterações aludidas são alcançadas por meio de seleção natural, um mecanismo descrito pelo próprio Darwin nos seguintes termos:

Devido a essa luta pela vida, qualquer variação, por menor e por qualquer causa que seja, se for de alguma forma vantajosa para um indivíduo de qualquer espécie, em suas relações infinitamente complexas com outros seres orgânicos e com a natureza externa, tenderá à preservação desse indivíduo, e,

¹¹ “A ideia básica da epistemologia evolutiva foi simultaneamente elaborada, e de modo aparentemente independente, por Karl Popper, Donald Campbell, Rupert Riedl e por mim mesmo. Chegamos por caminhos inteiramente diversos aos seus resultados. Popper partiu da lógica, Riedl da morfologia comparativa, Campbell da psicologia, e eu do estudo do comportamento animal.” (LORENZ, 1986, p. 210)

¹² O adjetivo refere-se à história genealógica de um grupo de organismos.

em geral, será herdada por sua prole. Seus descendentes também terão uma chance maior de sobreviver, pois, entre os muitos indivíduos de quaisquer espécies que nascem periodicamente, apenas um pequeno número pode sobreviver. Chamei esse princípio, pelo qual cada pequena variação, caso útil, é preservada, pelo termo “seleção natural” (DARWIN, 1964, P. 61).

Para Lewontin (1970), o mecanismo de seleção natural é caracterizado como um esquema constituído por três princípios. O de variação; a seleção natural requer que haja variação fenotípica entre os membros de uma população. O de hereditariedade; requer que a variação seja transmitida hereditariamente. E o de aptidão; requer que a seleção esteja relacionada aos potenciais de reprodutibilidade dos membros de uma população. Apesar de a seleção natural não ser o único processo da teoria evolutiva – e a despeito da circunstância de que este processo, por si só, não é capaz de explicar fenômenos como o da especiação -, ele assumirá, como veremos, um papel central nas teorias evolutivas.

Como nota Bradie (1986, p. 405), os termos “evoluído biologicamente” e “evoluído biologicamente através de seleção natural” não são equivalentes, o que implica que um modelo explicativo para o crescimento do conhecimento não pode depender exclusivamente do processo de seleção natural. Assim, parece que as epistemologias evolutivas estão fadadas a importar, junto com o arsenal teórico de Darwin, parte de seus problemas. Afinal, considerando o fato de que a seleção natural é apenas um de diversos processos capazes de produzir mudanças evolutivas, não há razões para supor que o impasse sobre quais traços do design natural devem ou não ser atribuídos à seleção natural não assuma uma equivalente no mundo epistêmico.

A ênfase no mecanismo de seleção natural por teóricos das epistemologias evolutivas pode ser explicada pelo fato de que alguns *traços de design* biológicos possuem um nível de complexidade e de dependência com outros traços tão grande que seria altamente improvável atribuir sua existência a processos randômicos como a deriva genética¹³. Afinal, se a primeira etapa da seleção natural - a produção de variantes genéticas em uma população – pode ser dita aleatória, certamente o mesmo não pode ser dito sobre a segunda etapa – a da preservação/eliminação das variantes em função de seus níveis de adaptabilidade ambiental. Tanto seleção natural quanto deriva genética são capazes de arranjar uma compatibilidade entre organismo e meio ambiente, mas enquanto na primeira essa compatibilidade é

¹³ A deriva genética é um processo estocástico, não é possível prever a direção da mudança na frequência de uma variante causada pela deriva. Esse mecanismo resulta em perda de variação genética e na fixação de variantes em diferentes locais. Os alelos fixados pela deriva podem ser neutros, deletérios ou vantajosos. Nesses dois últimos casos, a trajetória da frequência alélica ao longo do tempo será determinada pela interação entre a deriva e a seleção natural.

direcionada regularmente pelo mecanismo de seleção, na segunda a adaptação é uma consequência fortuita.

Em nada é randômica, portanto, a observação de que o mecanismo de seleção natural possui uma disposição regular em preservar organismos com maior valor adaptativo em detrimento daqueles com menor. Um organismo é mais apto para o meio quando seu *traço de design* lhe confere maior propensão à sobrevivência e reprodução do que as mutações dos demais indivíduos da população. Essa maior adaptabilidade característica do *traço de design* do organismo em questão será responsável por elevar sua frequência genética na população enquanto a frequência das demais variantes flutua para baixo até atingir níveis mínimos ou mesmo a extinção. Uma vez que a seleção natural é um processo contínuo, o nível de adaptabilidade entre o meio e o organismo já adaptado aumentaria progressivamente, com sucessivas mutações sobrepondo a anterior, o que caracterizaria traços com um nível de complexidade biológica não explicável por processos randômicos.

Um ponto de merecido destaque na história do desenvolvimento das ideias da biologia é a descoberta no início do século XX dos trabalhos sobre mutação genética do biólogo britânico Gregor Mendel. Os trabalhos de Mendel representaram um verdadeiro ponto de viragem na teoria darwinista, lançando luz em questões que o próprio Darwin não conseguira responder, como o fornecimento de um modelo explicativo para produção e transmissão das variações¹⁴. Essa “releitura” das ideias de Darwin culminou em diversas modificações na teoria e na ascensão, na década de 1930, do que hoje é conhecido como neodarwinismo. Um dos aspectos centrais da teoria de Darwin é a negação de que as mutações gênicas sejam orientadas a partir de uma instrução (instrucionismo) do meio ambiente para com o indivíduo. Esta era a tese de Jean-Baptiste Lamarck. Pelo contrário, neodarwinistas como Popper, Lorenz, Campbell e Dawkins advogam por uma aleatoriedade nos processos de mutação genética, seguida de uma posterior seleção (selecionismo) pelo meio.

As alusões de Popper à teoria evolutiva aparecem já em *A Lógica da Pesquisa*

¹⁴ Livio (2017) apresenta um divertido relato de como a teoria da evolução esteve perto de ser desacreditada por conta de um descuido potencialmente devastador de Darwin. Se a adesão à tese da “hereditariedade por mistura” é compreensível dado o contexto científico antes de Mendel, de poucas informações sobre os mecanismos de hereditariedade genética, o mesmo não pode ser dito sobre o erro de Darwin ao não reconhecer (ao menos num primeiro momento) o potencial que essa tese tinha para implodir sua teoria. De maneira geral, a hereditariedade por mistura consistia na crença de que a contribuição hereditária de cada ancestral era predita como 50% por cada ancestral. O próprio Darwin estimou que, após 12 gerações, a “proporção de sangue” de um ancestral em sua prole é de apenas 1 em 2.048. Surpreendentemente, Darwin foi incapaz de antever como essa lei de hereditariedade invalidava sua teoria evolutiva, uma vez que após algumas gerações, qualquer variação, benéfica ou não, seria “diluída” entre a população da espécie.

Científica, quando o filósofo sugere uma analogia entre o processo de testagem e seleção de teorias com o processo natural pelo qual seres vivos competem pela sobrevivência da espécie. A dimensão meramente metafórica dessas alusões é modificada a partir da década de 1960, quando Popper de fato avança rumo a uma epistemologia evolucionária. O próprio processo de evolução dos seres vivos é encarado como um processo de ganho de conhecimento regulado pelas mesmas regras que operam a construção do conhecimento científico:

Com este modo de apresentar a situação, pretendo descrever como o conhecimento realmente cresce. Isso não deve ser entendido metaforicamente, embora faça uso, obviamente, de metáforas. A teoria do conhecimento que eu desejo propor é em grande medida uma teoria darwinista do crescimento do conhecimento. Da ameba até Einstein, o crescimento do conhecimento é sempre o mesmo: nós tentamos resolver os nossos problemas e obter, por um processo de eliminação, algo tendendo à adequação em nossas soluções tentativas (POPPER, 1972, p. 261)

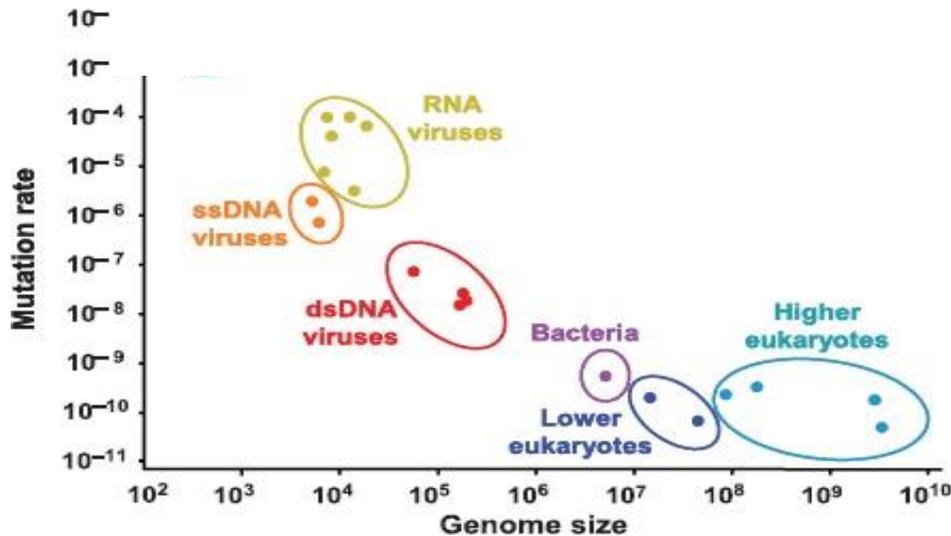
Em *A Lógica*, Sir Karl Popper nos apresenta uma teoria do crescimento do saber a partir da tentativa e da eliminação do erro. A tese popperiana para crescimento do conhecimento, a que ele chamou de racionalismo crítico, era, então, baseada em conjecturas e refutações: hipóteses e teorias são formuladas sem uma instrução anterior do meio em que se originam, concorrem entre si num processo que seleciona as mais aptas, que sobrevivem aos processos de refutação. O aprendizado humano e evolução das espécies estariam conectados pela circunstância de que ambos dependem de ciclos de tentativa e erro para adquirir conhecimento. A quantidade de ciclos de tentativa e erro nas ciências pode ser associada à taxa de mutação de uma espécie. A analogia entre o método hipotético-dedutivo, nas ciências, e o método do genoma, fora apontada também por Lorenz:

O método do genoma - perpetuamente fazendo experimentos, opondo seus resultados à realidade e preservando o que é apto - difere daquele adotado pelo homem em suas buscas científicas por conhecimento em apenas um aspecto, e nem sequer um vital, a saber, o de que genomas aprendem unicamente de seus sucessos, enquanto o homem aprende também de seu fracasso. (LORENZ, 1977, p. 24).

Um estudo de 2009 (figura I) confirmou que a taxa de mutação de um organismo é inversamente proporcional ao tamanho do genoma, à totalidade da informação genética. Isso significa que quanto maior a complexidade genética (mais informação inscrita no genoma devido aos ciclos de tentativa e erro de seu passado filogenético), menor a taxa de mutação. Maiores ciclos de tentativa no passado significam mais informação e maior complexidade

genética que, por sua vez, demandam menores ciclos no futuro. Para Popper, ‘tentativas’ podem ser “novas reações, novas formas, novos órgãos, novos modelos de comportamento, novas hipóteses” (POPPER 1972, p. 242 apud ABRANTES 2004, p. 28).

Figura 1 - Gráfico da taxa de mutação em função do tamanho do genoma para um viroide e outros microorganismos.



Fonte: Gago e colaboradores (2009).

No estudo aludido na figura acima, Gago e colaboradores (2009) estimaram a taxa de mutação de um viróide - os menores e mais geneticamente simples sistemas replicadores em nível intracelular – e concluíram a relação inversa existente entre complexidade genética e taxa de mutação. Curiosamente, Popper (1994, p. 81) afirmava que o método das tentativas, o processo de conjecturas e refutações, é empregado não só por Einstein mas também pela ameba. Entidades mais complexas assim o são porque possuem mais informação¹⁵, mais conhecimento acumulado do ambiente externo inscrito no código genético após sucessivas mutações. A sobrevivência de um organismo depende do nível de conhecimento que tem do

¹⁵ A identificação de “informação” com “conhecimento” requer uma explicação, particularmente quando imputamos conhecimento a microrganismos. A esse respeito, BRADIE (1986) chama atenção a seguinte passagem de Campbell: “Apesar de que os processos de conhecimento conscientes do homem sejam reconhecidos como mais complexos e sutis que aqueles dos organismos inferiores, eles não são reconhecidos como mais fundamentais ou primitivos. Assim, qualquer processo que forneça um programa armazenado para a adaptação dos organismos em ambientes externos é incluído como um processo de conhecimento, e qualquer ganho na adequação de tal programa é considerado um ganho de conhecimento. Se o leitor preferir, ele pode compreender esse artigo adequadamente tomando o termo ‘conhecimento’ como metafórico quando aplicado aos níveis inferiores da hierarquia de desenvolvimento.” (CAMPBELL, 1960, p. 380 apud BRADIE, 1986, p. 430).

meio ambiente que o circunda¹⁶. A tese de Popper é marcada por críticas substanciais a modelos de aprendizagem baseados na experiência, os modelos indutivistas por ele descritos como a *teoria do balde mental*¹⁷. Além de apontar a ausência de justificativa lógica das generalizações indutivistas¹⁸, Popper chamava atenção para o fato de que os modelos empíricos de conhecimento pressupunham uma neutralidade dos órgãos do sentido, que em tese seriam capazes de acessar puramente a realidade externa. Pelo contrário, Popper afirmava que mesmo as observações mais elementares carregavam uma dose de “teoria”¹⁹. Por exemplo, só sou capaz de identificar um padrão de repetição entre fenômenos sucessivos cronologicamente se, numa reflexão anterior, reconhecer semelhanças e ignorar dissidências entre eles. Essa “habilidade”, ainda que inconsciente, só pode ser anterior à experiência: “em vez de esperar passivamente que as repetições nos imponham suas regularidades, procuramos de modo ativo impor regularidades ao mundo” (POPPER 1994, p. 75-6). Nos procedimentos científicos, as observações são sempre conduzidas a partir de um ponto de vista: os interesses teóricos do cientista, o objeto de investigação, suas conjecturas e antecipações, as teorias assumidas etc:

A observação é sempre seletiva: exige um objeto, uma tarefa definida, um ponto de vista, um interesse especial, um problema. Para descrevê-la, é preciso empregar uma linguagem apropriada, implicando similaridade e classificação – que, por sua vez, implicam interesses, pontos de vista e problemas (POPPER 1994, p. 76).

Claramente, a negação de um conhecimento tutelado pela experiência em detrimento de *observações à luz de teorias* confere à epistemologia popperiana uma similaridade com a tradição kantiana citada anteriormente. Assim como no pensamento de Boltzmann, o que distingue o racionalismo crítico de Popper das epistemologias transcendentais é a consideração de que essa *teoria da observação*, conquanto constitua modos inatos de

¹⁶ Thagard (1998) sugere que, na analogia com as ciências, meio ambiente deve significar não o mundo físico, mas um conjunto de problemas próprios do mundo científico.

¹⁷ Nossos sistemas cognitivos seriam num primeiro momento vazios como um balde e, com o sucessivo contato com o mundo externo, “encheríamos” o balde com conhecimento sobre como o mundo é. A implicação dessa tese é a atribuição de um alto nível de confiabilidade aos nossos instrumentos de observação (sentidos), visão que de modo algum era compartilhada por Popper.

¹⁸ Mais de 200 anos antes, David Hume formulara o problema da indução notando que, não importa quantas vezes tenhamos presenciado o sol nascer, não temos garantias racionais (ou mais precisamente, lógicas) para afirmar que nascerá amanhã.

¹⁹ Ao se referir a experimentos em mecânica quântica, Niels Bohr falava de uma sempre presente “teoria do instrumento de medida”, se referindo à impossibilidade de experiências observacionais “diretas” ou “imediatas”, i.e, de um acesso não intermediado por uma linguagem que, por si, engendra os modos como podemos conhecer o fenômeno quântico.

conhecimento, não se revela válida aprioristicamente, pois as expectativas acerca do modo como o mundo se comporta podem sempre estar erradas. Ao não assumir essa possibilidade de erro de nossa teoria observacional, Kant “condenava” ao êxito todo nosso conhecimento. A respeito disso, observamos que a epistemologia de Popper é identificada com um racionalismo crítico e a racionalidade aludida diz respeito exatamente a um princípio empírico (o da confrontação experimental) abandonado por Kant.

Como dissemos, diferentemente da “evolução lamarckista”, na darwiniana o meio ambiente não é a causa direta das mutações. Para Lamarck, as adaptações evolutivas ocorriam porque os organismos eram “comunicados” pelo meio ambiente das alterações necessárias à sobrevivência nele. Em outras palavras, a informação é direcionada do meio para o fenótipo²⁰ e, deste, para o genótipo. Numa roupagem mais técnica, diz-se que, na evolução de Lamarck, há ‘acoplamento’ entre modificações adaptativas e as pressões seletivas ambientais, acoplamento entre o organismo e o meio. Em Darwin, por outro lado, o ambiente renuncia de seu papel instrutor; o meio tem apenas o papel de selecionar autonomamente, dentre as variações geradas, aquela com maior aptidão, ou seja, aquela mais adaptada às especificidades ambientais e, portanto, com maior potencial de reprodutibilidade. As variações geradas, entretanto, não são produto de uma prévia instrução do meio; pelo contrário, são aleatórias, cegas aos traços ambientais que a espécie precisa adquirir para sobreviver. Diz-se, então, que há um ‘desacoplamento’ entre os mecanismos de seleção e de variação, uma vez que não comunicam entre si. A evolução pode, então, ser como um processo de ganho de conhecimento que usa mutações randômicas como fonte de tentativas, e seleção natural para eliminar erros.

Esse desacoplamento é um dos aspectos centrais da teoria evolutiva usado pelas epistemologias evolucionárias para mostrar um paralelo existente entre o processo pelo qual indivíduos lutam pela sobrevivência no meio e aqueles onde teorias científicas disputam por aceitação junto a uma comunidade. Sobre as variações genotípicas de uma dada comunidade biológica e as variações de hipóteses científicas concorrentes de uma certa área podemos dizer o mesmo: que o processo que as produz não é o mesmo que as seleciona e preserva. A produção de variedade ocorre segundo um processo randômico de tentativa e erro, um “*blind trial*”. Isso equivale a dizer que, sob o ponto de vista evolutivo, qualquer que seja o processo pelo qual hipóteses científicas são produzidas, ele não pode ser explicado exclusivamente em função das “necessidades” do meio, uma vez que essa relação requereria uma “comunicação lamarckista” (o meio teria que, previamente, informar os cientistas quais as adaptações que

²⁰ Efeito que o genótipo e o ambiente têm na criação de um indivíduo, o que pode incluir, inclusive, traços de comportamento.

uma hipótese apta deveria sofrer), o que é precisamente negado pela evolução darwinista defendida por epistemólogos evolutivos como Popper.

Esse recorte entre uma etapa “cega” e outra “dirigida” reflete a divisão reichenbachiana aderida por Popper. Segundo o filósofo austríaco, era no contexto da justificativa, e não da descoberta, que encontraríamos os traços inequivocamente caracterizadores da atividade científica. Tanto em Darwin quanto em Popper, o meio ambiente tem uma função seletora (e não instrutora) exclusivamente *a posteriori*. Para o filósofo, a racionalidade característica do pensamento científico era devida a essa capacidade de se confrontar, a partir de um aparato experimental, conjecturas criadas “livremente” com o aspecto da natureza que elas pretendem explicar.

Por esse prisma, “adaptação” refere-se à adaptação dos produtos da atividade científica (teorias) aos valores da comunidade científica, que, nesse caso, é entendido como o meio ambiente seletivo das variações produzidas cegamente – nesse caso, cegas porque nada garante que venham a ser aptas ao meio. Assim, temos um processo em, ao menos, duas etapas:

O agente gera ou emite - de forma autônoma, não instruída ‘de fora’ - variações cognitivas e o meio ambiente as seleciona (confirmando ou rejeitando cada variação cognitiva, como sendo adequada ou inadequada). As variações pertinentes à epistemologia podem incluir: variações na estrutura e no funcionamento dos órgãos envolvidos na cognição, percepções, processos cognitivos de alto nível e/ou seus produtos (representações, etc.), comportamentos, métodos etc. (ABRANTES, 2004, p. 25).

Vimos que Popper considera que toda teoria é uma hipótese (uma conjectura teórica) que pode ser derrubada no futuro em função de sua perda de aptidão adaptativa ao meio, visto que este é passível de mudança. Por “mudança no meio”, queremos nos referir a mudanças no quadro de referência científico, incluindo, por exemplo, novos procedimentos de testagem aos quais uma teoria antes bem-sucedida se mostre inapta. Isso não deve, em absoluto, ser lido como uma rejeição popperiana ao objetivo científico da busca pela verdade. Na verdade, é justamente a busca, conduzida criticamente por teorias explicativas verdadeiras, que confere racionalidade ao empreendimento científico. As teorias científicas nunca podem, em si, serem justificadas ou verificadas, mas é possível uma justificação lógica de preferência entre teorias rivais. Não podemos, em absoluto, afirmar a verdade da teoria preferida, mas, em oposição às suas rivais, podemos afirmar a negação momentânea de sua falsidade, de modo que há, ao menos, a possibilidade de que seja verdadeira:

O método descrito pode ser chamado método crítico. É um método de experiência e eliminação de erros, de propor teorias e submetê-las aos mais severos testes que possamos projetar. Se, em via de certas admissões limitadoras, só é considerado possível um número finito de teorias pela eliminação de todas as suas concorrentes. Normalmente – isto é, em todos os casos em que o número de teorias possíveis é infinito - este método não pode levar-nos a isolar a teoria verdadeira; nem o pode fazer qualquer outro método. Ele permanece aplicável, embora inconclusivo. (POPPER 1994, p. 27).

A tese dos selecionistas é, em última instância, a afirmação da continuidade dos mecanismos de seleção darwinistas: dos níveis mais elementares, como o genético, até os mais complexos, como o conhecimento científico. Assim, supõe-se que os processos de seleção natural ocorrem nos mais diversos sistemas de aquisição de conhecimento, independente do nível de complexidade. Afirmar que um sistema opera de acordo com certas regras requer, antes de qualquer coisa, que se tenha bem delimitado quais são os limites desse sistema: onde começa e onde termina. Por exemplo, podemos considerar a ciência como um sistema fechado onde regras de seleção natural são observadas. Nessa analogia, a comunidade científica é o meio seletor que preservará as hipóteses e teorias mais aptas. Mas podemos também considerar que cada hipótese concorrente é produto de um programa científico local (digamos, um laboratório em Copenhague) onde outras ideias, consideradas inaptas para publicação, foram descartadas por seleção natural. Podemos ir ainda mais longe e supor que cada integrante do programa operou um processo de seleção em seus cérebros antes de expor uma ideia, pré-selecionando as que julgava mais aptas a serem compartilhadas com seus pares.²¹

Cabe salientar que, assim como a visão epistemológica revolucionária de Kuhn, a perspectiva evolucionista possui alguns pontos problemáticos. Aguiar (2011), por exemplo, nos alerta que há pontos problemáticos em se utilizar uma teoria científica, como a teoria da evolução, para um argumento em filosofia da ciência.

Primeiro, a teoria em questão pode ser mal aplicada, pode ser que o que valha no nível estritamente biológico não valha para o conhecimento. Segundo, a teoria pode estar simplesmente errada, pode ser que Darwin esteja errado e que alguma forma de lamarckismo seja admissível. (AGUIAR, 2011, p. 12-13)

Outro ponto problemático apontado pelos críticos das epistemologias evolutivas, uma

²¹ Claramente, em cada subsistema o meio seletor é distinto e, portanto, também os são os critérios de adaptabilidade.

dissimilaridade entre a evolução de sistemas biológicos e a da própria ciência, pelos críticos é o caráter progressivo exibido pela ciência como um todo em contraste com a “localidade de propósitos” na biologia evolutiva. De fato, em níveis globais, a ciência alcança o objetivo da explicação das causas de fenômenos observáveis com progressivo sucesso. Por outro lado, não podemos dizer que a evolução biológica global está se aproximando de algum objetivo comum.

Neste capítulo, apresentamos uma síntese de duas das mais importantes teorias do conhecimento do século passado. De um lado, o racionalismo crítico de Popper e uma visão segundo a qual o progresso da ciência ocorre de maneira gradual, como um organismo biológico em que suas partes se desenvolvem holisticamente. Do outro, o social-construtivismo de Thomas Kuhn, para quem a empresa científica ora se desenvolve cumulativamente, em longos períodos de vigência de um paradigma, ora sofre reviravoltas bruscas em que, por meio de revoluções, uma visão de mundo incapaz de responder às questões que se impõe é substituída por outra. No próximo capítulo, discutiremos como os elementos conceituais destas duas epistemologias integrarão a visão de ciência adotada neste trabalho, a saber, uma perspectiva que, ao levar em consideração tanto a dimensão humana e social do trabalho científico quanto seu domínio técnico e conceitual, se afastará tanto de um relativismo radical quanto de um racionalismo ingênuo.

CAPÍTULO 2 – ERRO CIENTÍFICO E NATUREZA DA CIÊNCIA

“A ciência não é... aquilo que os filósofos dizem sobre ela e ainda menos aquilo que é dito pelos manuais. O que é ela, então? Eu realmente só me coloquei esta questão após ter dado o meu acordo senhor De Rose sobre o título desta conferência. Um poema, então, me veio à memória:

Uma centopeia vivia feliz

Até que um sapo malicioso lhe perguntou: ‘Diga-me, você jamais se confunde de pata quando caminha?’

Tomada de dúvida, a centopeia caiu num buraco, porque ela não sabia mais caminhar.

Eu fiz ciência toda a minha vida, sabendo perfeitamente o que ela era. Mas quanto a dizer a vocês, como colocar um pé diante do outro [...], eu sou incapaz.” (FEYNMAN 1988, pp. 212-213 apud VIDEIRA, 2006, p. 32)

Neste capítulo, discutiremos a relação da Natureza da Ciência com o erro científico, argumentando que uma abordagem histórica de teorias equivocadas pode contribuir para o acesso à compreensão de alguns aspectos essenciais do fazer científico. Na primeira seção, discutiremos a ausência de consenso por parte da comunidade de ensino de ciências sobre o que é NdC, defendendo, entretanto, que isso não impede que temas epistemológicos da atividade científica sejam trabalhados em sala de aula de maneira eficaz; neste ímpeto, situaremos a nossa visão de ciência como uma perspectiva plural, identificada como uma interpretação tanto evolucionária quanto revolucionária de aspectos da NdC. Na segunda seção, serão discutidas algumas perspectivas educacionais e filosóficas sobre a relação da ciência e do ensino de ciências com o erro, o que nos permitirá discutir as bases conceituais necessárias à compreensão da maneira como o erro promove o desenvolvimento da ciência – por praticidade, passaremos a nos referir a essa circunstância como o *papel epistêmico do erro científico*.

2.1 – Duas rotas epistêmicas para compreensão da NdC.

Há um reconhecimento, por parte de um grande número de educadores, formadores e acadêmicos, da importância de não só compreender a ciência, mas *sobre* a ciência, isto é, a compreensão de como o conhecimento científico é produzido, validado, comunicado, de como a comunidade científica se organiza enquanto uma instituição social e de como se dá a relação entre ciência e sociedade. O reconhecimento da Natureza da Ciência como elemento para formação de professores e alunos mais conscientes e integrados com o mundo e realidade em que vivem foi acompanhado por estudos acadêmicos que destacaram a importância da História e Filosofia da Ciência para promoção da NdC. (MOURA, 2014a; MARTINS, 2015).

A caracterização genérica que demos acima para o que seria a “natureza da ciência” não seria suficiente para embasar um professor que quisesse incorporar à sua aula conteúdos metacientíficos. Nesse sentido, algumas tentativas de classificar a NdC de maneira sistemática e ordenada, de modo a permitir a condução da dimensão epistemológica da ciência para o contexto educacional, foram propostas por filósofos, sociólogos e historiadores da ciência, sem que, entretanto, chegassem a um consenso sobre uma única maneira de se caracterizar a NdC.

Lederman (1992; 2007) dividiu os trabalhos acadêmicos que versam sobre a natureza da ciência em três linhas de pesquisa: a primeira abriga trabalhos que avaliam as concepções de estudantes e professores sobre a natureza da ciência; a segunda diz respeito às propostas didáticas que, implementadas e testadas, visam a melhoria daquelas concepções; e uma terceira linha de pesquisa refere-se às investigações sobre as relações entre concepções de professores, prática pedagógica e concepções de estudantes.

Os trabalhos da primeira linha de pesquisa identificaram que grande parte dos alunos e mesmo professores de disciplinas científicas apresentavam visões sobre a ciência que poderiam ser consideradas como “ingênuas”, no sentido de que são concepções derivadas diretamente do senso comum, da experiência mais imediata, sem terem passado por um processo reflexivo ou problematizador. Nesse sentido, pesquisadores como Gil- Pérez et al. (2001), Fernández et al. (2002) e Lederman (1992; 2007) destacaram o que não deveria ser ensinado, as concepções equivocadas que deveriam ser problematizadas em sala de aula pelos professores.

A tentativa de organizar a NdC em um conjunto de características da ciência que seriam pontos pacíficos entre pesquisadores ficou conhecida como visão consensual sobre a natureza da ciência, e pode ser entendida como uma abordagem pragmática que, conquanto reconheça que a complexidade do fazer científico é incompatível com uma lista absoluta, fechada, de tópicos consensuais, aponta para um, ao menos temporário, consenso pedagógico em torno de determinados aspectos, o que permitiria, na prática, a inserção da temática NdC nas salas de aula (BAGDONAS, 2015; MARTINS, 2015). Segundo Moura (2014a), as listas de aspectos consensuais apresentadas por McComas e colaboradores (1998), Pumfrey (1991) e Gil-Pérez et al. (2001) podem ser resumidas em cinco tópicos abrangentes, a saber: a ciência é mutável, dinâmica e tem como objetivo buscar explicar os fenômenos naturais; não existe um método científico universal; a teoria não é consequência apenas da observação ou experimento; a ciência é influenciada pelo contexto social, cultural, político etc., no qual ela é construída; e os cientistas utilizam imaginação, crenças pessoais, influências externas, entre outros para fazer ciência.

Enquanto poucos especialistas discordariam de que um consenso sobre o que é ciência em nível filosófico não é possível dada a complexidade e multiplicidade de perspectivas epistemológicas com que podemos enxergar o processo científico, mesmo o aludido consenso pedagógico advogado por adeptos de uma visão consensual (VC) vem sendo colocado em xeque por abordagens alternativas. Críticos de uma visão consensual têm apontado para limitações advindas de uma perspectiva de consensos pedagógicos, como por exemplo o fato de que os princípios apresentados como consensuais pelos autores refletiriam escolhas de documentos oficiais desenvolvidos exclusivamente no eixo ocidental do globo, e que portanto poderiam não conferir uma imagem coerente com práticas científicas de outras regiões, ou o fato de que a ideia de modelagem na ciência não é suficientemente enfatizada (MARTINS, 2015). Irzik e Nola (2011, p. 593) afirmam que as limitações da visão consensual, entre as quais destacam o fato de retratar “uma imagem muito monolítica da ciência [...] cega em relação às diferenças entre as disciplinas científicas”, são suficientes para que seja adotada uma concepção mais apropriada, a que os autores chamam de semelhança de família.

De maneira resumida, podemos destacar que os autores fazem uso de uma definição do filósofo da linguagem austríaco Ludwig von Wittgenstein. Ao perceber que não temos uma definição de “jogo” que abarque todas as atividades a que, no dia-a-dia, nos referimos com esta palavra, o filósofo austríaco propõe a conceituação por semelhança de família. O fato de diversos exemplares serem referidos por um mesmo predicado não implica que compartilhem em comum um traço essencial. Como, por exemplo, defender que há uma característica compartilhada entre uma partida de futebol e um garoto que brinca, sozinho, de amarelinha na porta de sua casa? O que nos autorizaria chamar essas atividades pelo mesmo nome não seria o fato de compartilharem uma essência comum, mas por apresentarem algo como a semelhança que percebemos na fisionomia de membros de uma mesma família. Três filhos de um mesmo pai, por exemplo, podem se apresentar como semelhantes sem que dividam um único traço em comum, mas uma sobreposição de características: o irmão A pode “ter” o nariz e o sorriso do pai, enquanto B tem a cor dos olhos e também o sorriso; por sua vez, C tem a cor dos olhos e o formato do nariz do pai. Não há um traço essencial que se evidencie nos rostos dos quatro membros ao mesmo tempo e, ainda assim, a impressão de semelhança é inequívoca para qualquer um que observe uma fotografia de família. Este argumento, que podemos chamar de anti-essencialista, é utilizado por Irzik e Nola (2011) para afirmar que, diferente do que sugere uma visão de consenso, não há princípios gerais comuns a todas as disciplinas científicas. Ao invés disso, os autores propõem o estabelecimento de quatro categorias: atividades, objetivos e

valores, metodologias e regras metodológicas, e produtos. Assim, por exemplo, atividades científicas podem partilhar de mesmos objetivos e valores, mas diferirem quanto aos métodos.

Outro forte crítico das listas consensuais, o historiador da ciência Douglas Allchin enxerga fragilidades nos princípios apresentados pela visão de consenso, como a exclusão de aspectos importantes como a confiabilidade científica, a interação social entre cientistas, o processo de revisão por pares, vieses cognitivos, fraudes entre outros (FERRER, 2015). A proposta de abordagem de Allchin, tipificada como ciência integral (whole Science), não visa expressar a natureza da ciência a partir de uma lista de princípios explícitos. Em vez disso, propõe que a ciência seja apresentada como um conjunto de dimensões a respeito de como a confiabilidade é conferida ao processo científico (ALLCHIN, 2012). Allchin sugere que os processos de geração do conhecimento sejam divididos em um “inventário parcial das dimensões de confiabilidade na ciência”, constituído por três dimensões, observacional, conceitual e sócio-cultural. (BEJARANO et. al, 2019).

Segundo Bagdonas (2015), nas últimas décadas a comunidade de ensino de ciências tem utilizado como referência as obras de epistemólogos que se posicionaram contra o positivismo lógico, tais como Karl Popper, Gaston Bachelard, Thomas Kuhn, Imre Lakatos e Paul Feyerabend. Não julgamos arriscado afirmar que todas as abordagens da NdC listadas acima guardam em seu corpo teórico ao menos alguns aspectos das filosofias de um ou mais desses cientistas. Poucos duvidariam que as obras de Kuhn – marcada pela historicidade e pela introdução de ingredientes sociais ao processo científico – e Popper – conhecido pela sua crítica ao indutivismo e pela formulação de critérios racionais de validade do conhecimento científico – apresentam duas das mais influentes epistemologias na comunidade de ensino de ciências.

Ao argumentar que à visão consensual estaria implicitamente assumida uma compreensão kuhniana da produção do conhecimento científico, Martins (2015) defende que um compromisso prévio com uma epistemologia em particular pode representar um problema. As noções kuhnianas de ciência normal, incomensurabilidade e revolução científica, por exemplo, em que pese o grande número de adeptos que certamente possuem na área de pesquisa em educação, estão longe de ser uma unanimidade epistêmica.

Nesta pesquisa, assumiremos uma postura epistemológica plural, que privilegie a controvérsia e a problematização de concepções que consideraremos inadequadas. Para nos referenciaros quanto à adequação ou inadequação das concepções dos alunos, consideraremos a abordagem consensual, o que não deve ser lido como uma adesão à abordagem como um todo. Trata-se, antes, de uma necessidade metodológica. A explícita inexistência de um consenso acerca do que é NdC deixa claro o quão problemático é categorizar uma visão como inadequada.

Por outro lado, nos parece igualmente claro que as concepções empírico-indutivistas identificadas como recorrentes em alunos e professores de ciência, apesar de descreverem de maneira coerente alguns traços do fazer científico, particularmente aqueles relacionados a aspectos internos, certamente podem ser refinados para uma visão mais fiel à efetiva prática científica.

Além disso, argumentamos que o crescimento do conhecimento científico pode ser corretamente explicado tanto por uma perspectiva evolutiva ou evolucionária, que identificamos com o racionalismo crítico de Karl Popper, quanto por uma visão revolucionária ou de ruptura, que associamos aos trabalhos de Thomas Kuhn. Julgamos que a compreensão de aspectos epistemológicos da natureza da ciência pode ser beneficiada pela amplificação da controvérsia entre as teorias do conhecimento dos dois autores, uma vez que esta dissonância reflete tensões duradouras tanto na Filosofia da Ciência (relativismo *versus* racionalismo) quanto na historiografia da ciência (continuísmo *versus* descontinuísmo).

A primeira “visão deformada” listada por Gil-Pérez et. al (2001) diz respeito às (i) *concepções empírico-indutivistas e ateóricas da ciência*, que acabam conduzindo a uma ciência baseada exclusivamente na experimentação, o que, por sua vez, alimenta a ideia de que o progresso ocorre por meio de “descobertas” periódicas - uma visão socialmente difundida, transmitida por histórias em quadrinhos, pelo cinema, revista, televisão etc. (GIL PÉREZ et al, 2001, p. 129). Como dissemos, tanto Popper quanto Thomas Kuhn são filósofos da ciência reconhecidos como pós-positivistas por suas críticas à indução e ao positivismo lógico. Em especial, a tese de Popper é marcada por um dramático anti-indutivismo que rejeita a possibilidade de uma ciência alimentada cumulativamente por dados experimentais, visto que, como já discutimos, o filósofo austríaco advoga a anterioridade da teoria em relação à experiência: não existem dados científicos puros, toda observação é condicionada aprioristicamente por uma hipótese.

Uma segunda visão equivocada está associada à (ii) *compreensão de que o método científico é rígido, algorítmico, exato*, um instrumento infalível usado por cientistas para se alcançar a verdade. Essa visão é amplamente difundida entre professores de ciência (FERNÁNDEZ 2000, apud GIL PÉREZ, 2001, p. 130). Sob uma perspectiva evolutiva, a instituição de métodos científicos é sempre uma resposta a erros cometidos no passado, sendo, portanto, função deles. Como os erros são eventos imprevisíveis, também o são as formas que o método pode assumir. Se quisermos falar de um método científico imutável no tempo e nas diversas áreas de conhecimento, poderemos apenas falar desta circunstância específica, a de que a atividade científica refina sua prática continuamente através de tentativa e erro. Uma visão

kuhniana, por sua vez, compreende que o método científico é provisório como os são os paradigmas. A substituição de uma teoria por meio de uma revolução científica é necessariamente acompanhada pela instituição de novos procedimentos de investigação.

Conectada à ideia de um método de investigação rígido está a *(iii) visão da ciência como aproblemática e ahistórica*. A causa desta deturpação está na transmissão de conhecimentos:

[...] já elaborados, sem mostrar os problemas que lhe deram origem, qual foi a sua evolução, as dificuldades encontradas etc., e não dando igualmente a conhecer as limitações do conhecimento científico atual nem as perspectivas que, entretanto, se abrem. Perde-se assim de vista que, como afirma Bachelard (1938), “todo o conhecimento é a resposta a uma pergunta”, isto é, a um problema/situação problemático, o que dificulta a captação, bem como a compreensão da racionalidade de todo o processo e empreendimento científicos. (GIL-PÉREZ et al, 2001, p. 131)

A teoria do conhecimento de Kuhn claramente se afasta de tradições empiricistas, concebendo as dimensões históricas e sociais como componentes integrativos da ciência. A teoria do conhecimento de Kuhn é reconhecida pela sua historicidade, isto é, pela tendência a considerar o conhecimento científico como um produto não só de esforços técnicos e racionais, mas também como um resultado da conjuntura histórica em que foi concebido. Além disso, o fato de que a ciência é guiada pela solução de problemas (seja a resolução de quebra-cabeças, seja a de anomalias) é um ponto de claridade cristalina no trabalho de Kuhn. Também em Popper é evidenciado o papel central da história e das instituições para o crescimento da ciência. Apesar de ser comumente relacionado exclusivamente às ideias de sua obra magna de 1935, *A Lógica da Pesquisa Científica*, a obra de Popper foi complementada, em trabalhos posteriores, por:

[...] uma abordagem que dá ênfase aos aspectos históricos e sociais. Essa nova abordagem se delineia quando o filósofo elabora uma teoria racional da tradição e uma teoria institucional da objetividade e do progresso científico. (DIAS, 2018, p.186).

Além disso, também não é estranho à filosofia popperiana a ideia de que “[o] crescimento do conhecimento marcha de velhos problemas para novos problemas, por meio de conjecturas e refutações” (POPPER, 1994, p. 236)

Outra visão inadequada da ciência seria ainda uma *(iv) exclusivamente analítica*. Segundo Gil-Pérez et al (2001, p. 131), essa concepção destaca a “necessária visão parcelar dos estudos, o seu caráter limitado, simplificador”, esquecendo “os esforços posteriores de unificação e de corpos coerentes de conhecimento cada vez mais amplos”. É pontuado pelos

autores que a desvalorização dos processos de evolução característicos da evolução do conhecimento científico se constitui num obstáculo crítico na educação científica habitual, especialmente por ser um problema comparativamente pouco discutido por pesquisadores. Em *A estrutura*, Kuhn já havia antecedido sua visão evolucionária ao propor a analogia de que, da mesma maneira que as espécies sofrem mutações com o passar do tempo, o mundo do cientista é transformado através de uma revolução científica. Em sua formulação epistemológica tardia, da década de 1990, ele substitui a referência da mutação pela da especiação: “*o paralelo biológico da mudança revolucionária não é a mutação [...], mas a especiação*” (KUHN, 2000, p. 125). E assim o é porque observamos, após uma revolução científica, uma ramificação do saber em linhas de pesquisa especializadas. Esse processo de especialização das áreas do conhecimento em subáreas é fruto da incomensurabilidade, ou seja, devido à distância conceitual entre campos lexicais que promovem modos distintos de descrição da natureza. Aqui, parece haver um distanciamento entre a descrição adequada conferida pela visão consensual e a epistemologia kuhniana.

Por sua vez, a analogia popperiana do crescimento do conhecimento com a árvore genealógica da biologia evolutiva, sugere que esta não faz justiça à progressiva tendência que o conhecimento científico tem de unificar ao invés de ramificar. Para Popper, o desenvolvimento de ferramentas e instrumentos pelo homem, este sim, seria um processo fielmente representado por uma árvore que evolui por ramificação. Ela começa com instrumentos rudimentares - como uma pedra ou uma vara - representando o tronco e progride, diante da influência de problemas cada vez mais especializados, de maneira ramificada para cima, produzindo galhos que representam a nossa variedade tecnológica. Popper, entretanto, restringe a analogia ao conhecimento aplicado, não o estende para o próprio crescimento do *conhecimento puro*, como o faz Kuhn (2006). A estrutura evolucionária do conhecimento puro é oposta à da árvore genealógica de organismos vivos; seria representada por inúmeras raízes que crescem do ar em direção ao solo, tendendo a unificarem-se num tronco comum.

Mas se compararmos agora essas crescentes árvores evolucionárias com a estrutura do nosso conhecimento crescente, veremos então que a árvores crescentes do conhecimento humano tem uma estrutura extremamente diferente. [...] É amplamente dominado por uma tendência para crescente integração no rumo de teorias unificadas. Esta tendência tornou-se muito óbvia quando Newton combinou a mecânica terrestre de Galileu com a teoria de Kepler sobre os movimentos celestes; e persistiu desde então (POPPER, 1972, p. 239).

A árvore kuhniana cresce expandindo-se em inúmeros galhos, cujo intercuro é limitado pela incomensurabilidade – os campos especializados de conhecimento tenderão a afastar-se continuamente com a produção de novos galhos. A árvore popperiana, por outro lado, sugere uma contínua aproximação de modos mais verossímeis de descrição do real; partimos inicialmente de muitas conjecturas, que têm seu número reduzido devido ao método de tentativa e erro; o progressivo conhecimento do problema nos leva a eliminação das soluções inadequadas e preservação daquelas mais aptas. Tal processo é conduzido racionalmente pelo método experimental.

A especialização profissional da atividade científica pode então ser melhor acessada a partir de uma leitura kuhniana do conhecimento científico, enquanto que a integração do conhecimento²² – o que transcende o campo de atuação profissional – e o estabelecimento de uma unidade que “constitui uma conquista recente e nada fácil da ciência” (GIL-PÉREZ et al., 1991; GIL PÉREZ, 1994 apud GIL PÉREZ et al, 2001) pode ser melhor destacada através de um olhar evolucionária ou popperiano.

A quinta visão refere-se à interpretação ingênua do conhecimento como (v) *acumulativo e de crescimento linear* e é descrita por Gil-Pérez (2001, p. 132) como uma visão em que:

[...] o desenvolvimento científico aparece como fruto de um crescimento linear, puramente acumulativo (Izquierdo, Sanmartí e Espinet, 1999), que ignora as crises e as remodelações profundas (Praia, 1995), fruto de processos complexos que não se desejam e deixam moldar por nenhum modelo (pré) definido de mudança científica (GIL-PÉREZ et al, 2001, P. 132).

“Crises” e “remodelações profundas” levadas a cabo por processos não moldados por um “modelo pré-definido” são termos bem próximos ou análogos aos utilizados pelo próprio Kuhn e nos parece claro que a visão descontinuista de Kuhn se opõe à ideia de um crescimento por acumulação. Como detalhamos no capítulo anterior, também um modelo evolucionário afasta esta visão deturpada, já que crescimento por “acumulação” e por “continuidade” não devem ser encarados como sinônimos. De um ponto de vista epistêmico a acumulação está

²² Rocha (p. 34-6, 2015) nos fala desses processos de síntese de campos do conhecimento ao longo da história da física: até meados do século XVII, a física (aristotélica), a geometria/matemática (euclidiana) e a astronomia (ptolomaica) caminhavam paralelamente, sem se interceptar, até que são unificadas com a Mecânica newtoniana que, por sua vez, com algumas elaborações matemáticas introduzidas no século XVIII, evolui ganhando o nome de Mecânica Analítica. No século seguinte James C. Maxwell sintetiza a Eletricidade, o Magnetismo e a Ótica em quatro equações fundamentais, fundando o Eletromagnetismo. Com o cálculo probabilístico, Teoria Cinética dos Gases e Termodinâmicas são fundidas na Mecânica Estatística. Finalmente, no século XX, a Mecânica Clássica se torna uma situação limite da Relatividade Geral e da Mecânica quântica, com o Eletromagnetismo e a Relatividade Restrita fundida a esta última. Segundo Hawking (p. 23, 2015), atualmente, essas são as duas teorias usadas pelos cientistas para descrição do universo e um esforço integrativo contemporâneo diz respeito à busca de uma única teoria capaz de incorporá-las: uma ainda utópica teoria da gravitação quântica.

associada às teses empírico-indutivistas, a uma instrução lamarckista. Ora, como evidenciamos, é precisamente a essa descrição “pré-darwiniana” do conhecimento científico a que as diversas epistemologias evolutivas se opõem.

Listada como uma das visões deformadas mais frequentemente citadas por professores, e também uma das mais tratadas na literatura, a *(vi) visão individualista e elitista da ciência* retrata o conhecimento científico como:

(...) obras de gênios isolados, ignorando-se o papel do trabalho coletivo e cooperativo, dos intercâmbios entre equipes... Em particular, faz-se crer que os resultados obtidos por um só cientista ou equipe podem ser suficientes para verificar, confirmando ou refutando, uma hipótese ou toda uma teoria. (...) Não se faz um esforço para tornar a ciência acessível (começando com tratamentos qualitativos, significativos), nem para mostrar o seu carácter de construção humana, em que não faltam hesitações nem erros, situações semelhantes às dos próprios alunos (GIL-PÉREZ, 2001, p. 133).

Ambas epistemologias valorizam a dimensão social do empreendimento científico. A ênfase dada à coletividade por uma visão evolucionária está associada aos processos racionais de validação do conhecimento científico, inviáveis sem uma comunidade de cientistas organizada e interconectada. De sua parte, Thomas Kuhn assevera a impossibilidade de um cientista isolado fazer ciência: sim, é o indivíduo, sua mente, suas capacidades cognitivas, que realizam a investigação científica, mas o campo fértil para o desenvolvimento científico está na estrutura comunitária.

[...] em vez disso, tentei insistir que, embora a ciência seja praticada por indivíduos, o conhecimento científico é intrinsecamente um produto de *grupo* e que nem a sua peculiar eficácia nem a maneira como se desenvolve se compreenderão sem referência à natureza especial dos grupos que a produzem. (KUHN, 1977, p. 24).

A última visão considerada como inadequada está associada à imagem descontextualizada de uma *(vii) ciência socialmente neutra*, i.e, uma visão que não considera a complexa relação entre ciência, tecnologia e sociedade. Decisões científicas estão longe de serem guiadas exclusivamente por critérios racionais e, considerando que estas decisões têm implicações significativas para a sociedade e o meio ambiente, se faz necessário incorporar à educação científica discussões que, ao invés de considerarem a ciência como um conjunto de conceitos e procedimentos seguidos algoritmicamente, releve a dimensão atitudinal associada à tomada de decisões. O papel da criatividade e da imaginação são privilegiados por uma perspectiva evolucionária na medida em que, para Popper, o processo de gênese de hipóteses

não deve tanto à razão quanto o processo de validação/seleção. Cientistas propõe conjecturas sobre como o mundo é fazendo uso da criatividade humana, sem necessariamente estarem em posse de um suporte experimental. Este seria, em termos popperianos, o contexto da descoberta, que pode ser logicamente dissociado do contexto da justificativa, este sim racional e necessariamente experimental. Em Kuhn, por outro lado, mesmo a neutralidade do processo de validação é colocado em xeque; a escolha entre hipóteses rivais, por exemplo, responderia a critérios externos à ciência, como valores da comunidade científica, autoridade intelectual, conjuntura sócioeconômica etc. Mais uma vez, a escolha pelo uso conjunto de duas visões beneficiam a compreensão de um aspecto essencial do fazer científico; uma analogia darwinista enfatiza a dimensão racional do processo de seleção e validação de uma teoria, enquanto uma visão de ruptura aponta para a dimensão subjetiva desta escolha.

Argumentamos, então, que as duas epistemologias conduzem, por vias distintas, a uma visão de ciência compatível com as recomendações presentes na literatura de ensino de ciências. Acreditamos que a amplificação da tensão entre as duas perspectivas pode auxiliar alunos de cursos de exatas a compreender, pelo contraste conceitual, as bases filosóficas das duas visões e conseqüentemente formular concepções mais maduras sobre o conhecimento científico. Nesta pesquisa, daremos ênfase a aspectos da Natureza da Ciência que se associam mais explicitamente ao erro científico. Durante a escrita do texto histórico que será apresentado no próximo capítulo, buscou-se destacar os seguintes aspectos da Natureza da Ciência:

Tema 1: pluralismo metodológico

Não é possível defender o ‘Método Científico’ como um conjunto de etapas que devem ser seguidas mecanicamente, como se a prática científica fosse rígida e algorítmica. Há uma grande variedade de métodos e deve-se considerar a inclusão da criatividade do cientista no processo de construção do conhecimento. Tanto a epistemologia evolutiva quanto a revolucionária são compatíveis com uma concepção de método científico edificada sobre um princípio de pluralidade metodológica, i.e, uma concepção que se afaste tanto da ideia segundo a qual a ciência segue um conjunto de procedimentos rígidos e imutáveis de maneira algorítmica quanto da defesa da inexistência de métodos na prática científica. A história dos erros na ciência evidencia como os procedimentos de investigação adotados pelos cientistas são muitas vezes “improvisados”, uma resposta a equívocos que surgem no processo. De um ponto de vista evolutivo, a pluralidade metodológica da ciência pode ser encarada como uma consequência da

natureza tentativa desta atividade, uma característica típica de organismos que se desenvolvem através de seleção natural. Similarmente, podemos conceber a pluralidade de métodos na ciência enfatizando a circunstância de que procedimentos de investigação científica, juntamente com crenças, valores, teorias vigentes etc. constituem um paradigma, que, cedo ou tarde, será substituído por outro.

Tema 2: pluralismo teórico

Um mesmo conjunto de dados pode ser coerentemente explicado por mais de uma teoria científica, e mesmo por uma teoria equivocada. Esta circunstância decorre do fato de que cientistas utilizam imaginação, crenças pessoais, influências externas, entre outros, para fazer ciência. A compreensão deste tema relaciona-se com o reconhecimento de que um mesmo conjunto de dados pode ser coerentemente explicado por mais de uma teoria, ainda que uma delas esteja errada. A essa concepção subjaz a noção de que a observação é direcionada por uma teoria que a precede, sendo as diferentes leituras possíveis de um fenômeno devidas às diferentes hipóteses observacionais que um cientista pode ter. Segundo uma visão empírico-indutivista, o cientista seria responsável por aplicar um conjunto de procedimentos e “colher” os resultados experimentais da natureza, cenário em que a ocorrência de distintas interpretações deveria ser atribuída a falhas na aplicação do método científico. Discutimos como a proposta epistemológica de Ludwig Boltzmann perpassa por um reconhecimento de que nossas teorias científicas são meras representações da realidade, e que por esse motivo mais de uma representação pode coerentemente descrever um conjunto de fenômenos. Em outras palavras, mais de uma espécie pode reunir as características necessárias à adaptação a um determinado meio. A compreensão do pluralismo teórico está associada ao entendimento do processo de escolha entre hipóteses rivais. Sob uma perspectiva kuhniana, como discutimos, a escolha entre hipóteses depende em grande parte de questões externas ao laboratório, como a autoridade de um cientista ou programa de pesquisa, a conjuntura socioeconômica, valores culturais etc. Desse modo, também por uma via epistemológica revolucionária a pluralidade de teorias é valorizada.

Tema 3: confiabilidade da ciência

O conhecimento científico é provisório e confiável. É importante que a consciência da falibilidade, da provisoriedade e da mutabilidade do conhecimento científico não conduza a um ceticismo exagerado. É importante perceber que a ciência dispõe de mecanismos de

identificação e remediação do erro, o que lhe confere sucesso teórico-experimental e consequente confiabilidade. O estudo do papel do erro científico pode permitir que a defesa da ciência seja feita em bases mais sólidas, reconhecendo seus erros e limites na medida em que aponta para razões pelas quais tais “fragilidades” são, na verdade, a força do empreendimento científico. A confiabilidade da ciência sob uma ótica kuhniana é explicada pelo fato de que após um episódio de crise, a ciência passa por um período denominado de ciência-normal, quando a credibilidade é garantida pela existência de uma comunidade empenhada em desenvolver o paradigma, trabalhando num conjunto de problemas que podem ser respondidos pela teoria vigente. Como para Kuhn um paradigma não está mais próximo da verdade – para ele, inacessível – que o anterior, a confiabilidade em termos revolucionários não está associada ao poder explicativo de uma teoria, mas, antes, a necessidade dos cientistas de “defender” o paradigma vigente. Assim, a ciência é confiável na medida em que novos conhecimentos se adaptam aos fenômenos e às teorias já fornecidos pelo paradigma que lhes dá suporte (FERREIRA et al, 2018). Sob uma ótica evolutiva ou popperiana, enfatizaríamos o escrutínio da comunidade científica, a severidade dos testes experimentais e a competição entre teorias como aspectos garantidores da confiabilidade da ciência.

Tema 4: mutabilidade²³

A ciência está sujeita a inúmeras transformações, oriundas tanto de causas internas como avanços teóricos e experimentais, quanto externos, como as ocorridas por influências das transformações sociais, políticas etc. (PORRA et al., 2001). O desenvolvimento dos modelos atômicos no início do século passado é uma boa ilustração do dinamismo e da mutabilidade da ciência; do modelo de Thomsom, em 1904, ao de Bohr, em 1913, foram inúmeras as tentativas de conferir uma imagem coerente ao átomo, com cada nova contribuição modificando a teoria predecessora, lançando luz a aspectos inexplorados pela anterior. De um ponto de vista revolucionário, a mutabilidade da ciência está associada à “natureza tentativa das teorias científicas, que estão sujeitas a transformações e até derrocadas, seja como partes de um mesmo sistema paradigmático ou competindo com outros paradigmas, apoiados em pressupostos e concepções diferentes” (TEIXEIRA et al, 2001, p. 9). Outro caminho possível de se ilustrar a mutabilidade da ciência, neste caso pela via evolutiva, é enfatizando o fato de que a adaptabilidade das teorias científicas ao meio ambiente seletor (i.e, comunidade científica)

²³ Apesar de ter embasado a construção da narrativa, este tema não se constituiu diretamente em um objeto da análise de dados de nossa proposta de intervenção, por razões que serão apresentadas na secção 4.5.

é sempre provisória, uma vez que o meio está em constante modificação com o advento de novos conhecimentos teóricos, experimentais e tecnológicos.

Naturalmente, há outros aspectos que também possuem uma relação intrínseca com o erro. Procuramos, entretanto, a formulação mais simples possível considerando que alguns aspectos podem ser sobrepostos a outros. Por exemplo, o fato da *ciência ser uma construção coletiva* (HENRIQUE et al, 2011) e de que *a teoria não é consequência da observação/experimento e vice-versa* (MOURA, 2014a) claramente se relacionam com o erro científico, mas podem ser sobrepostos, respectivamente, aos temas *confiabilidade e método*. Os aspectos de NdC listados acima podem ser coerentemente expressos tanto por um referencial epistemológico evolucionário quanto por um revolucionário. Como vimos, apesar de distintas, essas epistemologias não são entre si contraditórias, pelo contrário, em muitos pontos apresentam similaridades, como no papel de destaque dado a comunidade científica para garantia da confiabilidade dos enunciados científicos. Ao propor que os discentes se posicionem a partir de referenciais da Filosofia da Ciência, o objetivo não é sugerir que uma epistemologia possua acesso privilegiado à Natureza da Ciência em detrimento da outra; trata-se, antes, de estimular que os discentes optem por uma das perspectivas e, assim, formulem concepções filosoficamente mais maduras sobre a maneira como a ciência se desenvolve.

2.2 – O papel epistêmico do erro científico.

Segundo Douglas Alchin (2012, p. 1-2), por mais de meio século um aspecto tem permanecido central em praticamente todas as recomendações de ensino da Natureza da Ciência: a circunstância de que a ciência é “tentativa”. Outros termos empregados, mas que se relacionam com a aludida tentatividade são: falível, provisória, contingente, mutável, sujeita à revisão etc. Esses aspectos do empreendimento científico encontram sua expressão mais palpável nas diversas ocorrências de erros científicos que nos apresenta a História da Ciência. Se, por um lado, parece haver um cada vez maior reconhecimento de que o letramento em ciências pode ser beneficiado com a elucidação destes aspectos, por outro, o erro é ainda vastamente encarado como a antítese de conhecimento.

De um modo geral, há no senso comum duas maneiras igualmente equivocadas de se encarar a falibilidade das ciências. De um lado, há a negação da mesma: diante das múltiplas e espetaculares demonstrações de como as aplicações tecnológicas da ciência vêm tornando nossa vida mais prática, confortável e longa, diante das evidências colossais da capacidade do conhecimento científico em iluminar o que sabemos sobre nós mesmos e o universo que nos

rodeia, não espanta que uma das opiniões mais populares seja a de que a ciência é uma atividade onde não há espaço para erros. As sociedades do século XXI vivem sob o domínio das aplicações científicas em todas as dimensões da vida humana (relações afetivas, trabalho, saúde e bem-estar etc.) de modo que, para grande parte da sociedade, o conhecimento produzido pela ciência possui inquestionável estatuto de verdade. Do outro extremo, temos não só o reconhecimento de que a ciência é falha, mas que os erros cometidos por cientistas são razão suficiente para que coloquemos em xeque todo enunciado produzido pelo empreendimento científico. A esse respeito, Clough (2007 apud MARTINS, 2015) chama a atenção para a possibilidade de se obter resultados indesejados quando a problematização de concepções equivocadas em sala de aula não ocorrer de maneira apropriada:

Princípios sobre a natureza da ciência podem ser facilmente mal compreendidos e usados de modo abusivo. Estudantes com frequência veem as coisas como preto ou branco. Por exemplo, quando discutia o caráter histórico provisório da ciência, há alguns anos, ao ensinar ciências na escola secundária, meus estudantes saltavam do extremo de ver a ciência como conhecimento absolutamente verdadeiro para o outro extremo, como conhecimento não confiável. Era necessário muito esforço para movê-los para uma posição mais intermediária. Colegas contaram-me sobre estudantes que perguntavam por que eles tinham que aprender o conteúdo científico se ele estava sempre mudando (CLOUGH, 2007, apud MARTINS, 2015).

A dificuldade de conduzir os discentes ao aludido “meio termo” está associada à própria complexidade do conhecimento científico, uma atividade que, ao mesmo tempo em que possui uma forte objetividade, tem seus resultados condicionados a fatores eminentemente subjetivos. Como já argumentamos no capítulo anterior, é possível que essas dificuldades sejam superadas com uma abordagem didática que busque a controvérsia, que explicita uma tensão entre visões distintas da ciência, de modo que seja possível destacar as limitações tanto de um relativismo radical quanto de um racionalismo ingênuo.

Contemporaneamente, um certo ceticismo exagerado tem sido usado como um instrumento político para “destituir” a ciência de sua autoridade epistemológica, num movimento que, por exemplo, questiona a eficácia de vacinas, a proeminência da ação antropogênica no aquecimento global, a teoria evolutiva etc. A HC nos mostra que a ciência não se constrange com algumas inconsistências, limitações ou mesmo evidências contrárias a uma teoria. A sobrevivência de uma hipótese depende de diversos fatores que envolvem não só aspectos internos como simplicidade, amplitude explicativa e poder de predição, mas também aspectos externos como crenças e valores, interesses pessoais, conjuntura socioeconômica, autoridade intelectual etc. Portanto, uma abordagem que enfoque o papel do erro científico no

progresso da ciência deve estar atenta para a necessidade de problematizar posições extremas. As lições pedagógicas do erro podem ser acessadas a partir de incursões em episódios históricos estratégicos. Momentos da HC em que hipóteses equivocadas, procedimentos falhos ou métodos duvidosos conduziram a progresso efetivo, são exemplares frutíferos dos aspectos da Natureza da Ciência acima listados.

Como dissemos, Eric Scerri nos recomenda o abandono da perspectiva kuhniana a fim de dar o devido destaque ao erro científico. De fato, acreditamos que, quando visto sob uma roupagem darwinista, o crescimento do conhecimento científico assume de maneira explícita o seu caráter tentativo, mutável e coletivo. Consideramos, entretanto, exagerada a asserção de que uma historiografia kuhniana suprime o papel do erro científico. Pelo contrário, a própria compreensão da analogia darwinista para a ciência é beneficiada quando se contrasta essa visão com um ideário revolucionário. Incorporar a uma análise histórica o contraste entre esses referenciais epistemológicos abre a possibilidade de que não só estudantes compreendam a Natureza da Ciência, mas que o façam de maneira mais sólida, ancorando suas noções no arcabouço conceitual da Filosofia da Ciência.

Tradicionalmente, o erro – seja o erro cometido por cientistas, seja aqueles cometidos pelos alunos – é considerado como um desvio de procedimento a ser evitado e do qual nenhuma lição podemos extrair. A oposição de senso comum entre erro e conhecimento, fonte de visões ingênuas, deve ser problematizada em sala de aula e, para tal, o uso de episódios da HC pode se mostrar numa ferramenta eficaz para dirigir frutíferas discussões sobre a NdC: afinal de contas, o debate sobre o erro científico necessariamente é um debate sobre o método científico, sobre a confiabilidade da ciência, sobre o pluralismo teórico, da relação entre dados experimentais e teorias, dos critérios de escolha entre hipóteses rivais, dos limites da ciência, do papel da coletividade para o avanço da ciência etc. Uma discussão profunda sobre o erro pode, portanto, conduzir os alunos à compreensão de aspectos importantes da empresa científica, afastando-os tanto da crítica irresponsável quanto de uma aceitação cega dos produtos da ciência.

O filósofo francês Gaston Bachelard reserva um espaço especial para o erro científico em sua epistemologia, razão pela qual não surpreende que grande parte dos trabalhos que versam sobre as implicações do erro no ensino de ciências usa as ideias do filósofo como referencial teórico (CEDRAN, 2017; COSTA, 2009; PINTO, 2002). A epistemologia bachelardiana se concentra na ideia de que todo conhecimento científico é produzido a partir da retificação de concepções anteriores, falsas ou incompletas. Para Bachelard, *“o ato de conhecer dá-se contra um conhecimento anterior, destruindo conhecimentos mal estabelecidos, superando o que, no próprio espírito, é*

obstáculo à espiritualização.” (BACHELARD, 1996, p. 17). Todas nossas concepções científicas são, assim, suscetíveis a limitações ou equívocos, que comumente são identificados através de um exame racional que é marca essencial da atividade científica. Segundo Cedran et al (2017), uma das consequências de uma abordagem pedagógica bachelardiana é a possibilidade de se transportar concepções epistemológicas para a sala de aula para auxiliar os discentes a compreenderem o desenvolvimento do conhecimento científico como um processo histórico errático e não-linear, o que os afastaria de concepções equivocadas sobre a ciência, tais como: a ideia de que o conhecimento científico é absoluto; de que o principal objetivo dos cientistas é o de descobrir leis naturais e verdades; de que os fundamentos da ciência são triviais e imutáveis; de que a ciência é feita apenas por grandes gênios e suas descobertas independem da participação e validação de outros grupos de pessoa etc. Ainda segundo Cedran et al (2017):

A principal ideia proposta por Bachelard é a de que, ao ensinar, ao apresentar conceitos, devemos considerar o processo, com os avanços, os impasses e os erros cometidos até que tal teoria seja “afirmada”, demonstrando aos alunos a trajetória desenvolvida pelo processo de produção de conhecimento, da vigência do erro até sua superação. Assumindo esse ponto de vista, a ideia de linearidade no processo de produção do conhecimento científico pode ser substituída por uma perspectiva histórica. (CEDRAN 2017, p. 46).

Vê-se que, em Bachelard, há uma defesa de que o erro seja revelado como um componente constitutivo dos processos de saber, não como anomalias desprovidas de racionalidade e que, portanto, deveriam ser evitadas. O progresso científico pode ser explicado como um processo de contínua busca de superação dos erros. Portanto, um espírito crítico que submeta ao escrutínio mesmo as mais firmemente consolidadas ideias é necessário ao fazer científico, uma vez que, quando posições equivocadas são defendidas dogmaticamente, elas transformam-se em *obstáculos epistemológicos*.

Em sua tese de doutorado, ao investigar as potencialidades e os limites do uso do erro como ferramenta didática para o ensino de matemática, Pinto (2002) constatou que, no ambiente escolar, o erro é comumente concebido como falta, déficit, como sinônimo de fracasso, um produto que precisa ser apagado da vida intelectual, enfim, como um elemento indesejável. A autora chama atenção ainda para a necessidade de se considerar o potencial didático dos erros, se afastando da concepção tradicional segundo a qual os equívocos são um signo da falta de conhecimento. Pelo contrário, o erro deve ser considerado na sua dimensão construtiva, “como oportunidade para se refazer o percurso e ampliar o raciocínio, tornando mais claras as inter-relações do processo do conhecimento” (PINTO, 2002, p. 16). Nos procedimentos didáticos

tradicionais, os erros cometidos pelos alunos são eliminados sem maiores reflexões; substitui-se o modelo equivocado, apresentando o correto. A autora aponta que a simples apresentação de um novo esquema não gera a necessária desestruturação do antigo. Esse expediente didático se assemelha a um tratamento paliativo de efeitos, sem atacar as causas. A fonte do erro, a natureza do obstáculo epistemológico enfrentado pelo aluno, permanece desconhecida. Nesse sentido, a autora propõe que o erro se torne um observável; ao errar, é preciso que se explore as causas e implicações daquele erro, de modo que o discente seja capaz de avaliar criticamente as razões porque aquele esquema é errôneo. Dessa maneira, argumenta Pinto (1998), a compreensão do esquema correto será mais consistente.

Allchin (2012) defende que as lições epistemológicas do erro científico devam ser ensinadas a partir da ideia de *aprendizado progressivo*. As diferentes dimensões do erro devem ser abordadas progressivamente, em estágios, de maneira a garantir que níveis cada vez mais profundos de entendimento acerca da NdC sejam alcançados pelos discentes. Dos cinco estágios propostos, os dois últimos são caracterizados por Allchin como envolvendo “lições mais sutis e sofisticadas, e (que) portanto devem talvez ser reservadas para estudantes mais maduros”. A seguir, apresentaremos, de maneira sucinta, os cinco estágios propostos por Allchin, que se constituem em objetivos de aprendizado de nossa sequência didática.

No primeiro estágio, o estudante deve reconhecer que erros fazem parte do desenvolvimento da ciência e são cometidos mesmo pelos mais proeminentes cientistas. A referência a erros cometidos pelos “grandes gênios” da ciência, como a constante cosmológica de Einstein, a ideia de hereditariedade por mistura de Darwin ou a explicação de Galileu para o movimento das marés, são exemplos que podem ajudar o professor a atenuar a tendência a se romantizar os feitos da ciência, humanizando-os. Se devidamente articulado com a HC, este estágio pode contribuir para problematizar uma visão individualista e elitista da ciência, acentuando que “grandeza não precisa implicar perfeição” e que “na ciência, erro é um primeiro passo” (ALLCHIN, 2012, p. 13).

No segundo estágio, o erro deve ser apresentado como o subproduto de um processo racional e que, portanto, possui fontes identificáveis, não como eventos aleatórios ou devidos à falta de integridade ou limitação de um cientista. É parte da lição epistemológica a capacidade de atribuir causas racionais ao erro a partir de sua identificação, levantar hipóteses acerca das possíveis fontes do equívoco, em outras palavras, “refazer o caminho do erro” até a sua origem. Ao invés de ser considerado como uma momentânea supressão do juízo racional, o erro científico deve ser encarado como um traço da racionalidade do fazer científico, uma atividade proeminentemente tentativa.

O terceiro estágio refere-se à compreensão de como erros são identificados e remediados. Popularmente, a ciência é considerada como “autocorretiva”. Se, por um lado, o empreendimento científico de fato exibe uma capacidade incrível de identificar e corrigir os erros que ele mesmo produz; por outro, este processo não ocorre da maneira exclusivamente analítica como o termo parece sugerir. O componente social, a interação entre membros da comunidade, a publicação de trabalhos para escrutínio de pares, é um aspecto central para identificação e remediação de erros científicos. Isso quer dizer que a mera sujeição de uma hipótese a sucessivos testes experimentais pode não ser suficiente para conferi-la um alto nível de confiabilidade. Quando se trata da confiabilidade da ciência, sua dimensão social é tão importante quanto a experimental. A HC nos mostra diversos episódios onde o erro de uma teoria só é identificado quando um olhar de outra perspectiva é direcionado ao problema; não é incomum que a descoberta de um erro esteja acoplada a uma grande descoberta científica, a superação de uma teoria anterior por outra imune àquele equívoco. Investigações conduzidas por perspectivas alternativas são, portanto, uma das mais recorrentes formas de identificação e remediações de erros científicos: “visões contrastantes ajudam a realçar déficits na evidência ou a expor pontos cegos conceituais” (ALLCHIN, 2012, p. 15).

O quarto estágio diz respeito ao reconhecimento de que que hipóteses podem ser produtivas ou frutíferas mesmo que estejam erradas em certo sentido. Esse estágio demanda uma mais profunda investigação de como erros podem ser aspectos constitutivos do progresso científico, de como mesmo ideias posteriormente provadas falsas podem contribuir para o avanço do entendimento da natureza, não só acomodando dados disponíveis mas também fazendo previsões corretas de fenômenos. Douglas Allchin cita a teoria do flogisto, segundo a qual os corpos combustíveis possuíam uma matéria chamada flogisto, liberada ao ar durante os processos de combustão ou de calcinação, como um dos exemplos históricos em que sólido desenvolvimento científico foi conseguido por intermédio de uma teoria falsa:

O conceito de flogisto, por exemplo, é frequentemente denegrido e mesmo ridicularizado como um dos mais tolos conceitos da HC. No entanto, com o uso do conceito de flogisto, químicos puderam prever que o hidrogênio (ar inflamável) poderia reduzir metais. O conceito de flogisto facilitou a descoberta do papel da luz na química do crescimento de plantas. Abriu a possibilidade de um metal reduzir outro (ao invés da dependência do carvão). Também estimulou investigações das propriedades químicas da eletricidade, incluindo sua habilidade para reduzir metais e ácidos, e dos aparatos galvânicos (incluindo eletrólise). No fim das contas, o conceito de flogisto não estava tão errado assim. (ALLCHIN, 2012, p. 15)

Os casos do flogisto, do átomo de Nicholson, e em última instância de qualquer teoria abandonada que já foi bem-sucedida, indicam o quão inadequada é a visão de método científico como é comumente ensinado na escola. A investigação de episódios em que teorias hoje abandonadas se mostraram empiricamente bem-sucedidas coloca em xeque a concepção de um método científico rígido e exato e podem conduzir a discussões sobre como os modelos e teorias científicas são representações ou “mapas” de eventos naturais, não os eventos em si. Assim, mesmo modelos reconhecidamente equivocados podem se mostrar empiricamente bem-sucedidos se considerarmos um domínio de fenômenos restrito.

Finalmente, o quinto e último estágio envolve a capacidade do discente de compreender que os processos que desembocam em erro científico ou em grandes descobertas, não raro, são os mesmos; que a aplicação atenta dos métodos e procedimentos considerados necessários em um determinado período não imuniza o conhecimento produzido de eventuais equívocos. Em outras palavras, após os discentes compreenderem que errar é uma consequência do inevitável caráter tentativo do conhecimento científico, o próximo passo é que sejam capazes de problematizar a distância epistêmica entre descoberta científica e erro:

O que leva ao insight em uma ocasião é um ponto cego em outra. O potencial para descoberta e erro parecem inextricavelmente acoplados (...) às vezes, o mesmo conceito ou forma de pensar que conduz à descoberta, leva também ao erro. Pontos de vista raros podem, em um contexto, levar um cientista a *insights* e, em outros, cegá-lo para alternativas. Paradoxalmente, se insights e pontos cegos são de fato dois lados da mesma moeda – a expressão de perspectivas raras –, então não podemos impedir a ocorrência de erros na ciência. Nem quereríamos, se valorizamos ideias novas. O custo da inovação parece ser o risco do fracasso. (ALLCHIN, 2012, p. 16)

Os cinco estágios de aprendizado progressivo propostos por Alchin (2012) constituem um conjunto de habilidades esperadas do discente ao final da intervenção, como mostrado no quadro abaixo:

Quadro 1 - Níveis de compreensão do papel epistêmico do erro científico e habilidades associadas

ESTÁGIO DE APRENDIZAGEM	HABILIDADE ESPERADA DO DISCENTE
Nível 1	Reconhecer que erros fazem parte do desenvolvimento da ciência e são cometidos mesmo pelos mais proeminentes cientistas.

Nível 2	Reconhecer que erros não são eventos aleatórios nem devidos a falhas de integridade pessoal, mas, antes, possuem fontes identificáveis e podem ser devidos a processos legitimamente racionais.
Nível 3	Compreender como os erros são identificados e remediados; compreender o papel da comunidade científica no processo de autocorreção da ciência.
Nível 4	Reconhecer que hipóteses equivocadas podem ser produtivas ou frutíferas mesmo que estejam erradas em certo sentido.
Nível 5	Compreender que os processos que desembocam em erro científico ou em grandes descobertas, não raro, são os mesmos

Fonte: Adaptado de Allchin (2012).

Buscaremos, através do estudo histórico das *Contribuições de John William Nicholson para o átomo de Bohr*, discutir todos esses traços sob distintas perspectivas epistemológicas a partir da problematização de aspectos da Natureza da Ciência. No próximo capítulo, desenvolveremos uma narrativa da construção da Antiga Teoria Quântica que valorizará o papel do erro para o progresso da ciência.

CAPÍTULO 3 – CONTRIBUIÇÕES DE JOHN WILLIAM NICHOLSON PARA O ÁTOMO DE BOHR

Em 1930, Niels Bohr já era reconhecido como um dos mais brilhantes cientistas da história da física. Além de ter ganhado um prêmio Nobel oito anos antes “por suas investigações sobre a estrutura do átomo e da radiação por ele emanada”, era agraciado naquele ano com a Medalha Max Planck, concedida pela Sociedade de Física Alemã como recompensa para feitos extraordinários em física teórica. Bohr consolidava, para sempre, a imagem de um físico brilhante, influente e inspirador, com suas enormes contribuições para o desenvolvimento teórico da Teoria Quântica, particularmente a partir da aplicação de seu princípio de complementariedade para compreender a Mecânica Quântica, no que ficou conhecido como Interpretação de Copenhague.

O início daquela década, entretanto, era melancólico para John William Nicholson. Após uma concussão causada por um misterioso²⁴ acidente sofrido em 1923, Nicholson passou os anos seguintes sendo internado em clínicas psiquiátricas para tratar de alcoolismo e de outros problemas. No ano em que Bohr era laureado com uma das maiores honrarias científicas, o astrofísico inglês entrava numa das salas da Universidade de Oxford para ministrar para um público de cinco alunos a primeira aula de um curso de hidrodinâmica. Em roupas maltrapilhas, Nicholson ascendia um cigarro após o outro, apesar de ser expressamente proibido pela instituição fumar em trajés acadêmicos. Em certo momento, alegando que suas gengivas coçavam, arranca sua prótese dentária e a coloca na tribuna. A fala, naturalmente, é indistinguível... No dia seguinte, apenas dois alunos apareceriam e no posterior, nenhum. A disciplina foi cancelada por acordo mútuo entre as partes²⁵.

Cerca de 20 anos antes, Nicholson era reconhecido com um dos mais importantes físicos britânicos. O jovem astrofísico, eleito em 1917 um membro da Royal Society por indicação de um cientista do porte de Joseph Larmor, rapidamente se tornou uma autoridade nas investigações em estrutura da matéria estimuladas nos anos iniciais do século passado pela cada vez mais numerosa quantidade de dados experimentais fornecidos pela espectroscopia. Nicholson chegou a liderar este programa de pesquisa, construindo um modelo de sucesso experimental e que serviu de inspiração para diversos outros trabalhos. Particularmente, o método de trabalho de Nicholson se apresentou como uma inspiração para Niels Bohr.

Neste capítulo, apresentaremos uma narrativa da ascensão da Antiga Teoria Quântica que evidencia as contribuições dadas pela teoria atômica de Nicholson para o período. Na primeira

²⁴ Os registros médicos de Nicholson serão abertos para o público em 2023, quando talvez saibamos as circunstâncias do acidente ocorrido 100 anos antes

²⁵ O curioso relato está presente na biografia de Dorothy Wrinch (SENECHAL, 2013), primeira e única esposa de Nicholson, e foi dado por Reginald Victor Jones, aluno do astrofísico durante o Hilary Term de 1930.

secção, situaremos as ideias centrais do contexto científico em que Nicholson estava imerso, aquelas da tradição de “construtores de átomo” de Cambridge, cuja figura mais importante e influente foi Joseph John Thomson. Argumentaremos que a tensão entre “tradicionalistas” britânicos - representados por Thomson e outros cientistas comprometidos com um átomo fundamentado na dinâmica clássica - e “modernistas” - representados por Bohr, Rutherford e demais cientistas para quem a incorporação das ideias de Planck e Einstein, conquanto estranhas ao ideário clássico, eram necessárias para se compreender a estrutura do átomo -, apesar de didática, já que corrobora uma leitura kuhniiana de “defensores do antigo paradigma” versus “cientistas revolucionários, se torna uma categorização simplória que não representa fielmente a postura de alguns cientistas do período, entre eles, John W. Nicholson. Na segunda secção, analisaremos o itinerário científico de Nicholson que o conduziu à formulação da sua teoria atômica. Particularmente, daremos ênfase às contribuições que seu trabalho deu para uma das mais importantes obras da Física Moderna, *Sobre a Constituição de átomos e Moléculas*. Na terceira e última secção, serão apresentadas as bases conceituais do átomo de Bohr.

Ao tentar resgatar o reconhecimento que a obra de Nicholson gozou durante o início da segunda década do século passado e que acabou por ser apagado ou diminuído na tradição historiográfica que se sucedeu, estaremos ajudando a construir uma imagem científica que julgamos mais próxima da realidade, uma que reconheça as contribuições que ideias equivocadas podem dar ao progresso da ciência.

3.1 – A Escola de Cambridge

Segundo Kragh (2011a), assim como Norman Robert Campbell, James Hapwood Jeans, Owen Willans Richardson, Arthur Willian Conway, Willian Peddie e Albert Crushing Crehore, John Willian Nicholson pertenceria a uma tradição inglesa de “construtores de átomos”, uma referência a cientistas comprometidos com trabalhos acerca da estrutura da matéria e que de alguma forma guardavam os métodos de análise característicos da obra de J. J. Thomson. Para Heilbron (1981), em certo sentido, o próprio modelo Rutherford-Bohr faria parte deste programa baseado nos métodos dos físicos de Cambridge do meio da era vitoriana e iniciado por Thomson.

Três anos após a publicação da terceira e última parte de *Sobre a Constituição de átomos e Moléculas*, a teoria atômica de Bohr era amplamente aceita ou, no mínimo, seriamente considerada pela maior parte dos cientistas que de alguma maneira estavam envolvidos com estudos sobre teoria quântica ou estrutura da matéria. Considerando que a obra foi

primeiramente publicada num periódico inglês, além do fato do físico dinamarquês ter estado entre Cambridge e Manchester durante o período de germinação de suas ideias, não é de espantar que o modelo bohriano tenha atraído especial atenção nos ambientes acadêmicos ingleses. A recepção da obra de Bohr, entretanto, não se constitui em uma unanimidade imediata para a “Escola de Cambridge”, termo que usaremos aqui para designar um grupo de cientistas ingleses de alguma forma comprometidos com o programa científico de Thomson, isto é, com a ideia de um modelo de átomo cuja estabilidade possa ser descrita através da física clássica.

Para uma parte desses cientistas (por exemplo, Norman Robert Campbell e Owen Williams Richardson), as ideias apresentadas por Bohr em sua trilogia eram esclarecedoras e promissoras por abrir portas para novas descobertas. Outros físicos (James Jean Hopwood, por exemplo) reconheciam o poder preditivo da teoria mas viam com receio alguns “saltos” teóricos injustificados do ponto de vista físico. Por fim, um terceiro e menor grupo (J. J. Thomson, Frederick A. Lindermann e John W. Nicholson) se opôs ativamente, durante algum tempo, a Bohr e seus apoiadores. Entusiastas ou céticos, pessimistas ou otimistas, certo é que “os britânicos” em geral mantinham algo em comum em suas visões sobre o trabalho de Bohr, a de que a teoria trazia enormes dificuldades conceituais. Antecipando um estado de controvérsia científica que se repetiria com frequência nos anos de maturidade da Teoria Quântica, a rejeição de cientistas ao átomo de Bohr não dizia respeito ao poder preditivo da teoria, que em meados de 1913 se traduzia na sua capacidade de fornecer um aparato matemático que explicava linhas do espectro de emissão na faixa visível do átomo de hidrogênio, mas era, antes, uma rejeição aos seus fundamentos. Era, em última instância, uma controvérsia produzida pela tensão entre a mecânica clássica e uma incipiente mecânica quântica. Nenhum outro cientista representa melhor esse “espírito clássico” - caracterizado por uma busca insistente por uma descrição do fenômeno atômico em termos clássicos e, portanto, também por um afastamento do instrumental matemático da teoria quântica da época – do que J. J. Thomson.

De 1904 a 1910, o átomo de Thomson foi geralmente aceito como o melhor candidato de uma teoria atômica, particularmente em território inglês (KRAGH, 2012). Em oposição a modelos planetários que surgiram no período, como o de Nagaoka, a configuração proposta por Thomson tinha a vantagem de apresentar tanto uma estabilidade mecânica quanto uma eletrodinâmica. Além disso, o modelo de Thomson foi capaz de oferecer fortes analogias com os elementos do segundo e terceiro período da tabela de Mendeleev. Essa acomodação experimental representou uma rápida popularização da teoria atômica de Cambridge. O modelo de Thomson gozou de prestígio científico até, pelo menos, 1911, pouco antes da exposição dos resultados encontrados por Rutherford com o espalhamento de partículas alfa (HEILBRON,

1977). Segundo Lopes (2009), a teoria eletrônica dos metais de Thomson foi a base de sustentação da tese de doutorado de Bohr, sendo provavelmente o principal motivo que levou o físico dinamarquês a escolher Cavendish como destino de seu estudo de pós-doutorado

Pouco após ter descoberto o elétron, em 1897, Joseph John Thomson (1856-1940) demonstrou interesse em explicar a periodicidade das propriedades dos elementos químicos em termos dessas partículas carregadas negativamente, que seriam constituintes atômicos. Como em condições químicas normais os átomos são eletricamente neutros, a carga elétrica negativa dos elétrons deveria ser compensada por uma carga positiva de igual magnitude. Além disso, elétrons assumiriam posições fixas, ligados por forças eletrostáticas e possivelmente cinéticas (HENTSCHEL et al., 2009). Lopes (2009) chama a atenção para como as ideias de Thomson sobre a estrutura do átomo se modificaram ao longo dos anos, desde concepções iniciais associadas ao trabalho de Dalton, passando pela crença no átomo vórtex de Kelvin, recorrendo a uma analogia com os imãs flutuantes de Mayer, até a proposição comedida de uma hipótese quântica e do átomo nuclear.

Figura 2- Joseph John Thomson (1856-1940)

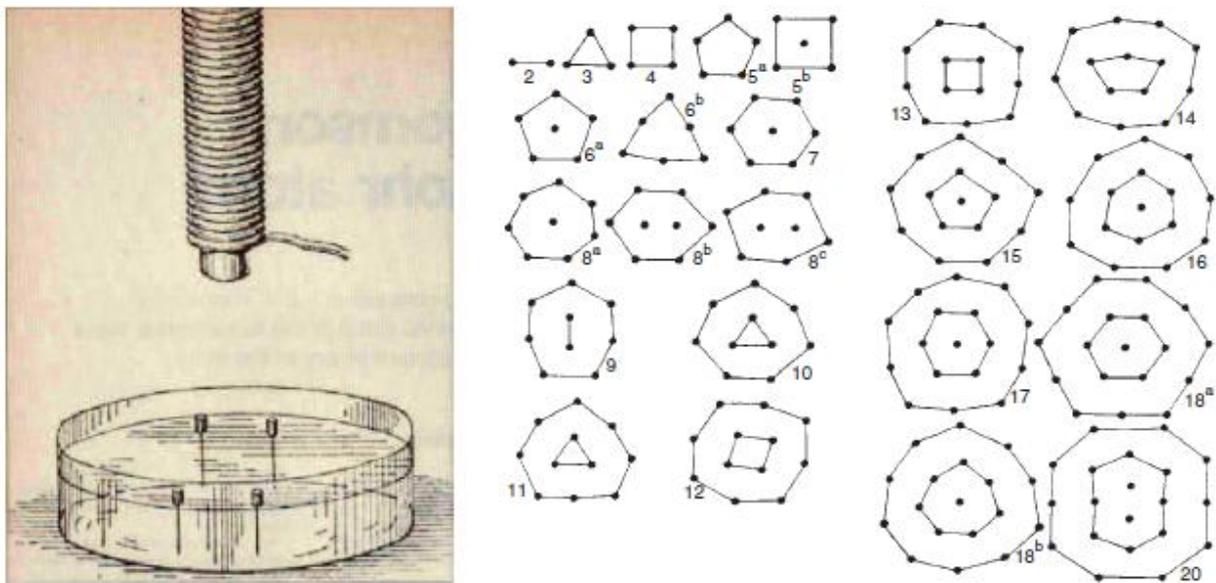


Fonte: Kragh (2011a).

O objetivo de Thomson era explicar as propriedades periódicas dos elementos com base na distribuição dos elétrons no átomo. Com o intuito de obter uma melhor ideia de quais seriam as configurações estáveis dos elétrons na estrutura atômica, Thomson estudou um experimento

conduzido por Alfred Marshall Mayer (1836-1897). Mayer prendeu as extremidades de agulhas magnéticas, no caso, seus polos positivos, a rolhas, de modos que estas flutuassem em um recipiente com água e, assim agulhas submersas apontassem para cima com a mesma altura em relação à coluna d'água, como mostrado na figura abaixo. Acima da superfície da água, Mayer posicionou um ímã direcionado exatamente ao centro do recipiente de modo que este polo negativo, mais intenso, atraísse todas as agulhas simultaneamente. O objetivo de Mayer era identificar quais padrões geométricos resultariam das configurações estáveis para diferentes números de agulhas. Mayer percebeu que as agulhas tendiam a se arranjar em anéis concêntricos de estabilidade e argumentou que as diversas configurações ocorriam devido a “competição” entre as forças repulsivas entre os polos positivos agulhas e as forças atrativas entre estes polos positivos e o polo negativo do ímã centralizado, resultando em arranjos de energia mínima.

Figura 3 - Esquema do experimento de Mayer com agulhas magnéticas e configurações encontradas²⁶.



Fonte: Hentschel et al (2009).

Com o aumento do número de agulhas, estas eram acomodadas no interior dos anéis já formados até que seu número fosse suficiente para formar um novo anel. Thomson esperava que uma estrutura similar, com corpúsculos (o termo elétron ainda não era usado por ele) ao

²⁶ À esquerda, esquema do experimento conduzido por Mayer, com agulhas magnéticas presas a rolhas em um recipiente de água acima do qual é posicionado um ímã a uma certa distância. As forças de atração entre o ímã e as agulhas, e de repulsão entre as agulhas, produzem padrões de posicionamento que se alteram com o aumento do número de agulhas. Os padrões encontrados por Mayer estão representados na figura à direita.

invés de agulhas, fosse obtida de uma configuração atômica. O físico britânico acreditava que poderia relacionar cada um desses anéis aos períodos químicos observados na tabela periódica. Sobre a analogia atômica com o experimento de Mayer, Thomson afirmava que:

Se considerarmos o átomo químico como um agregado de átomos primordiais, o problema de se encontrar as configurações de equilíbrio estável para um número de partículas iguais agindo uma sobre a outra de acordo com alguma lei de força (...) é de grande interesse em conexão com a relação entre as propriedades de um elemento e seu peso atômico. Infelizmente, as equações que determinam a estabilidade de tal coleção de partículas aumentam tão rapidamente em complexidade com o número de partículas que uma investigação matemática geral dificilmente é possível. Entretanto, podemos ter um bom insight sobre as leis gerais que governam tais configurações através do uso de modelos, dos quais o mais simples é o dos imãs flutuantes do professor Mayer. Nesse modelo, os imãs arranjam-se em equilíbrio sob as repulsões mútuas e uma atração central causada pelo polo de um imã extenso situado acima dos imãs flutuantes. (THOMSON, 1897, p. 313)²⁷

Um sistema dinâmico estável para o átomo não seria possível sem que houvesse algo que compensasse as cargas negativas dos elétrons, razão pela qual Thomson propôs que os corpúsculos estariam imersos em algo como “um fluído com uma certa quantidade de coesão, o suficiente para impedi-lo de separar-se em pedaços devido a sua própria repulsão”. Química e espectroscopicamente inerte, o fluído introduzido por Thomson tinha a única função de fornecer uma força capaz de manter os elétrons em arranjos estáveis (BAILY, 2012, p. 7). Em outras palavras, Thomson não acreditava na realidade física do fluído, cujo efeito de contrabalancear as cargas negativas poderia ser, na verdade, devido a uma outra propriedade atômica, àquela altura ainda desconhecida. Por volta de 1903, Thomson acreditava que cada átomo químico possuiria um grande número de corpúsculos, algo em torno de 1000 elétrons ou mais para o átomo de hidrogênio, por exemplo. Com a suposição de que este grande número de elétrons habita o átomo, Thomson esperava explicar dois dados experimentais disponíveis à época, a multitude de linhas espectrais de um único átomo e o fato de que a massa atômica era muitas vezes maior que a do elétron. (HENTSCHEL et al., 2009).

Em 1904, após anos de amadurecimentos de suas ideias sobre a estrutura do átomo, Thomson apresenta o que seria um dos modelos mais importantes do início do século XX. Sob o título “*Sobre a Estrutura do Átomo: uma Investigação da Estabilidade e Períodos de Oscilação de um número de Corpúsculos dispostos com iguais Intervalos numa Circunferência, com aplicação dos resultados à Teoria da Estrutura Atômica*”, Thomson comunicava numa

²⁷ É interessante notar como a passagem ilustra bem a postura que podemos considerar como instrumentalista de Thomson em relação à função dos modelos nas teorias científicas.

publicação da *Philosophical Magazine* as bases de seu modelo atômico. Thomson havia fixado a estabilidade mecânica deduzindo matematicamente as condições de equilíbrio do seu sistema dinâmico²⁸. Seu modelo, entretanto, era eletrodinamicamente instável: corpúsculos arranjados sobre anéis com uma aceleração centrípeta deveriam, em acordo com a eletrodinâmica clássica, emitir energia e, portanto, as órbitas descritas deveriam ser cada vez menores até o eventual colapso do anel. Em um importante artigo publicado em 1897, Joseph Larmor (1857-1942) chegou a uma equação matemática para a taxa de energia emitida por um elétron em rotação, de onde se deduzia que, dadas as carga e velocidade conhecidas para o elétron, a perda da energia orbital deveria ocorrer muito rapidamente:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{2}{3} \left(\frac{e^2 v^4}{c^3 a^2} \right)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo, a o raio da órbita, v a velocidade do elétron e e sua carga. O teorema ou fórmula de Larmor denunciava a limitação de praticamente todos os sistemas dinâmicos do início do século passado, tanto os concêntricos como o de Thomson, como os planetários como o de Rutherford e Nagaoka. O problema da instabilidade eletromagnética dos modelos atômicos só foi satisfatoriamente resolvido com a hipótese quântica do átomo de Bohr: Thomson mostrou, entretanto, que se por um lado a “drenagem de radiação” era enorme para um único elétron, a perda de potência radiativa seria desprezível para um anel com vários elétrons, como era previsto pelo seu modelo. A solução para o “problema da drenagem” dada por Thomson deu uma sobrevida ao seu átomo, mas não se sustentaria por muito tempo. Os físicos estavam cada vez mais perto de descobrir que átomos leves como hélio e hidrogênio tinham apenas alguns poucos elétrons em sua órbita. Para o hidrogênio, por exemplo, com uma única partícula negativa na eletrosfera, o teorema de Larmor previa um tempo de vida de absurdos $1,6 \times 10^{-11}$ segundos. Além disso, o próprio Thomson chegara à conclusão de que o número de elétrons do átomo deveria ser muito menor que aquele concebido originalmente, e, portanto, o seu fluido positivo não poderia ser desprovido de massa, de modo a dar conta do peso do átomo. O sistema dinâmico de Thomson de 1904, outrora bem-sucedido, chegava a seu limite explicativo.

Quase uma década depois da formulação de seu modelo mais bem-sucedido, Thomson fez uma última tentativa de edificar uma imagem clássica para a estrutura da matéria. Dessa

²⁸ Para um maior detalhamento da estratégia adotada por Thomson para conferir estabilidade mecânica ao seu modelo, ver Kragh (2012, p. 13-15)

vez, Thomson tentaria provar que era possível chegar aos resultados alcançados pela teoria quântica através de uma abordagem ortodoxa, provando que a hipótese quântica não era tão essencial quanto a tradição de “físicos modernos” parecia estar convencida (HEILBRON, 1977). Em setembro de 1913, já quando as ideias centrais do átomo de Bohr haviam sido consideravelmente difundidas nos espaços científicos ingleses, J. J. Thomson traz a público um novo modelo atômico²⁹. Se o modelo de Bohr, em que pese seu poder preditivo, se sustentava em postulados quânticos cuja ausência de uma justificação física seria vista como os pés de barro da teoria, o modelo de Thomson assumiria como pressuposto uma relação eletrodinâmica específica entre o elétron e o átomo porque “se considerarmos os elétrons e as cargas positivas como centros de forças variando inversamente com o quadrado da distância, temos a potencialidade de explicar as propriedades do átomo através de princípios mecânicos” (THOMSON, 1919, p. 419 apud KRAGH, 2011a, p. 12-13). Para Thomson, “o átomo consistiria numa força radial repulsiva que variava com o inverso do cubo da distância do centro do átomo e uma força radial atrativa que variava com o inverso do quadrado da distância do centro do átomo” (KRAGH, 2011a, p. 11–2). Desse e de outros postulados, conseguiu reproduzir a equação de Einstein para o efeito fotoelétrico, incluindo a constante de Planck, expressa em termos de constantes atômicas³⁰. Essa última investida de Thomson lhe rendeu apenas algum reconhecimento temporário por parte de seus apoiadores. As evidências a corroborar a hipótese quântica, entretanto, se amontoavam, e se tornava cada vez mais rara a publicação de trabalhos sérios que ignorassem o átomo de Bohr.

Thomson permaneceu durante algum tempo rejeitando as ideias de Bohr, tratando-as como “superficialidades obtidas sem, ou ao preço de, um entendimento do mecanismo dos átomos”. (HENTSCHEL et. al, 2009, p. 21). Para o veterano de Cambridge, fingir que as condições arbitrárias propostas por Bohr tinham algum significado dinâmico seria covardemente substituir um conhecimento da estrutura do átomo por uma “tela de ignorância” (HEILBRON 1977, p. 29, tradução nossa). Em uma crítica feita ao modelo de Bohr em 1919, parece estar bem expresso o “espírito de Cambridge” das ideias de Thomson:

O Sr. Bohr, em sua teoria do espectro, supõe que as únicas órbitas possíveis são aquelas onde a razão entre a energia do elétron e sua velocidade angular é um múltiplo inteiro de um valor definido. Isso, entretanto, não é uma

²⁹ J.J. Thomson, “On the Structure of the Atom,” *Phil. Mag.* (1913), 792-799

³⁰ Nesse ponto, a noção que Thomson fazia do quantum elementar de ação se opunha a de Bohr da mesma forma que a de James Hopwood Jeans. Ambos faziam uma interpretação dinâmica da constante, descrevendo-a em termos de outras, o que, para Bohr, seria um contrassenso, já que, para o físico dinamarquês, h seria uma constante extraída da natureza irreduzível a outras.

consequência de considerações dinâmicas; é aritmética ao invés de dinâmica, e se for verdade é o resultado de forças cuja existência ainda não foi demonstrada. Com o uso deste e de outro princípio, o de que quando um elétron passa de uma órbita à outra, ele emite radiação cuja frequência é proporcional à diferença de energia entre essas duas órbitas, o Sr. Borh obtém uma expressão que dá, com considerável acurácia, a frequência das linhas do espectro de quatro linhas do hidrogênio. Entretanto, não me parece injusto dizer que, para muitos, a base aritmética da teoria parece muito mais satisfatória que a física. (THOMSON, 1919, p. 420 apud KRAGH, 2011a, p. 11-12)

Por sua vez, Bohr e Rutherford avaliavam os primeiros modelos atômicos de Thomson e outros como “um museu de curiosidades científicas”. Para o físico dinamarquês, “As coisas não precisavam ser muito exatas para Thomson, e se assemelhava-se, o era” (KRAGH, 2012, p. 17, tradução nossa) Irremovível da posição segundo a qual a teoria quântica não era fundamental, Thomson acabou por reconhecer que estava em descompasso com a academia e renuncia ao cargo de professor em Cavendish em favor de Rutherford quando os trabalhos acadêmicos são retomados após a Primeira Guerra Mundial. Em sua autobiografia publicada em 1937, finalmente reconheceu que os artigos de Bohr tinham “trazido ordem ao caos” em certos ramos da espectroscopia, e que representavam as mais valiosas contribuições dadas pela teoria quântica à ciência física (HEILBRON, 1977).

A postura de Thomson e de outros cientistas é perfeitamente compreensível se considerarmos a tensão entre uma física clássica cujos limites explicativos eram cada vez mais evidentes e uma teoria quântica em ascensão. Para cientistas como Rutherford e Bohr, a imposição de condições quânticas de estabilidade não eram apenas um “utilitarismo preguiçoso”, mas uma necessidade imposta pela incapacidade da linguagem clássica em expressar coerentemente fenômenos microscópicos: a explicação do fenômeno precisava vir antes de sua compreensão. Físicos que podemos categorizar como “protetores do paradigma” clássico, como Thomson, Larmor e, em menor grau, Nicholson, se empenharam em produzir uma teoria atômica newtoniana e consideravam inadmissível que descobertas científicas fossem feitas através daqueles “atalhos quânticos” empregado por Bohr. Sobre Larmor, outra grande autoridade científica de Cambridge, um episódio ocorrido no início da década de 1920 parece ilustrar bem sua posição durante a inflexão clássico-quântico.

De 1903 a 1932, a prestigiosa cátedra de Professor Lucasiano de Matemática da Universidade de Cambridge, já ocupada por Isaac Newton, pertencera ao físico e matemático irlandês Joseph Larmor. Segundo Clark (2015), apesar do grande prestígio de que gozava entra a comunidade de físicos de Cambridge – entre outras coisas, devido à inovação do seu trabalho

*O Éter e a Matéria*³¹, de 1900 -, ao alvorecer dos anos 20, sua posição intelectual começa a ser percebida como ultrapassada. Um exemplo da “inabilidade” deste cientista em não acompanhar os avanços em curso seria, para além de sua crença no éter e postura cética em relação à relatividade, sua recusa do modelo nuclear de Rutherford de 1911. Em 1922, Larmor deu suporte ao modelo atômico proposto por Richard Hargreaves, apresentado no artigo *Atomic Systems Based on Free Electrons, Both Positive and Negative, and Their Stability*. O modelo de Hargreaves estava em flagrante descompasso com a sua época: a mecânica quântica era ignorada em detrimento de uma descrição matemática exclusivamente newtoniana das propriedades do átomo. A hipótese de Hargreaves ecoava a teoria atômica dos vórtices proposta por J.J. Thomson no século XIX. Curiosamente, o artigo acabaria nas mãos de Nicholson - àquela altura trabalhando no King’s College e avaliador da *Proceeding of the Royal Society* -, que recomendou que o artigo, conquanto inventivo, fosse rejeitado por estar baseado em uma teoria refutada experimentalmente³².

Além de ilustrar como o modelo de Bohr enfrentou resistência mesmo quase uma década após a sua publicação, o episódio revela ainda que, no início da década de 1920, Nicholson parece ter finalmente reconhecido a descrição quântica da estrutura da matéria, já que, em seu parecer do artigo, refere-se ao fato de que o autor certamente “*não está em contato em qualquer nível com os desenvolvimentos modernos*”, apontando que a hipótese apresentada fora rejeitada em detrimento da teoria quântica. Apesar das críticas severas que teceu à obra de Bohr, Nicholson parece se distanciar de nomes com Thomson e Larmor; sua rejeição à teoria do físico dinamarquês era muito mais devido às limitações experimentais do modelo do que a assunção de postulados quânticos. Em um artigo de 1913³³, Nicholson afirmava que os físicos estavam hesitantes em acreditar na hipótese quântica porque suas conclusões eram demasiadamente estranhas, apontando, entretanto, que Poincaré³⁴ havia fornecido uma prova aparentemente válida de que nenhuma outra alternativa seria possível. Em termos kuhnianos, a “conversão”

³¹ Joseph Larmor, *Aether and Matter: A development of the dynamical relations of the aether to material systems, on the basis of the atomic constitution of matter: Including a discussion of the influence of the Earth’s motion on optical phenomena*. (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1900)

³² Uma outra avaliação, efetuada por insistência de Larmor, foi feita por Charles G. Darwin, que condicionou a publicação do artigo à incorporação das ideias da teoria atômica de Bohr. Com a intervenção direta da influência e autoridade intelectual de Larmor, o artigo acabou por ser publicado na *Philosophical Magazine*, em 1922, quando a revista ainda não realizava revisão por pares. Em resposta à solicitação de Larmor, um dos editores do periódico escreveria: “*Não sei nada, no momento, sobre o artigo de Hargreaves: mas, sob sua recomendação, estou certo de que a Phi. Mag. encontrará espaço para ele.*” (DAY, 2015)

³³ “The Physical Interpretation of the Spectrum of the Corona,” *The Observatory*, 36, 109 (1913).

³⁴ O artigo *Sur La Théorie des Quanta* (1912), do filósofo da ciência Henri Poincaré (1854-1912) havia causado forte impressão, não só em Nicholson, mas em Jeans, quem substituiu uma posição de rejeição à teoria quântica por uma forte defesa)

de Nicholson ao novo paradigma se deu ainda durante o período de crise, enquanto o astrofísico estava em intensa atividade intelectual, e não apenas após a Revolução Quântica da década de 20, quando não mais havia cientistas de renome questionando a teoria quântica.

Segundo McCormack (1966), a análise da participação (ou da ausência) de cientistas britânicos no Congresso de Solvay de 1911, destinado à discussão de problemas da teoria quântica, é um indicativo de como a teoria era aplicada com receio, ou totalmente rejeitada, por esses cientistas. Jeans participara, entretanto se opondo à teoria e descrevendo o quantum de ação em bases clássicas. Além dele, Rayleigh, Larmor³⁵, Schuster e Thomson, que não compareceu à despeito de ter sido convidado, não eram simpáticos à noção de quanta.

Além do modelo de Thomson e Nicholson, que incorporavam aspectos limitados da teoria quântica, o trabalho de Bohr sofreu ataques de alguns “concorrentes” clássicos, modelos atômicos britânicos que rejeitavam completamente a teoria quântica. Albert C. Crehore, físico e inventor norte-americano, publica um modelo³⁶ baseado no trabalho de Thomson pouco após a publicação da primeira parte da trilogia de Bohr. Crehore desenvolve o átomo de Thomson e estende suas implicações a moléculas e cristais. Em dezembro de 1913, Arthur William Conway, professor de físico-matemática da University College, Dublin, propõe um sistema atômico³⁷ fundamentado nos eletromagnetismo e mecânica clássica para explicar a propriedade de algumas séries espectrais. Assim como o de Crehore, o seu modelo consistia num átomo de Thomson modificado. Como um terceiro exemplo, William Peddie, professor de física na University College, Dundee, propõe, em 1914, um sistema dinâmico³⁸ que consistia, em suas palavras, numa “contraparte esférica do átomo tubular de Thomson”, traduzida numa série de projéteis carregados negativamente em torno de um núcleo positivo e construído de forma a dar os resultados desejados. É presumível o conforto de Bohr diante da oposição destes modelos clássicos fora de sintonia com as ideias caras à teoria atômica e aos estudos sobre estrutura da matéria da época. O físico dinamarquês simplesmente não se ocupou de respondê-los.

³⁵ Segundo Kragh (2011a), o respeitado professor lucasiano de matemática da Universidade de Cambridge, ignorou completamente o átomo de Bohr, apesar de ter trabalhado extensivamente com teoria atômica durante 1908. A primeira referência ao modelo Rutherford-Bohr só viria em 1929, num pós-escrito a um artigo de 1927. Também John William Strutt, o Lorde Rayleigh, nunca teceu comentários sobre os escritos de Bohr. Sobre os escritos de 1913 do físico dinamarquês lhe é atribuída a frase “Não digo que descobertas não possam ser feitas daquela maneira. Eu realmente acho que podem, mas isso não me serve”

³⁶ Albert C. Crehore, “*On the Formation of the Molecules of the Elements and their Compounds, with Atoms as constituted on the Corpuscular-Ring Theory,*” *Phil. Mag.* 26 (1913), 25-84.

³⁷ Arthur W. Conway, “*An Electromagnetic Hypothesis as to the Origin of Series Spectra,*” *Phil. Mag.* 26 (1913), 1010-1017

³⁸ W. Peddie, “*On the Structure of the Atom,*” *Phil. Mag.* 27 (1914), 257-268.

Diferente de Peddie, Conway e Crehore, entretanto, John Willian Nicholson havia proposto uma teoria quântica para o átomo antes de Bohr e, não obstante, suas ideias eram bem aceitas nos meios científicos ingleses. Em linhas gerais, em meados da primeira década do século passado, o nome de Nicholson suscitava considerável respeito ente físicos e, acima de tudo, astrofísicos. Portanto, foi apenas em tensão com as ideias de Nicholson que *Sobre a Constituição de Átomos e Moléculas* encontrou algo próximo de uma controvérsia científica.

3.2 – A teoria atômica de Nicholson.

Em 1881, nasce John William Nicholson, em Darlington, Inglaterra, onde teve sua educação primária. Seu pai foi um balconista de ferraria e sua mãe, “a filha de um pintor. Quando garoto, gostava de passear pelos campos e se mostrava um entusiasmado entomólogo. Depois do colegial, Nicholson foi a Manchester estudar matemática e física no Owens College (posteriormente renomeado como Universidade de Manchester) para se preparar para o rigor de Cambridge. Àquela altura, conheceu Arthur Stanley Eddington, de quem se tornou amigo e que fora a Manchester pelos mesmos motivos (WILSON, 1956). Trabalhou no Laboratório Cavendish, em Cambridge, e depois na Queens University, em Belfast, até 1912, quando fora nomeado professor de matemática no King’s College, em Londres. Nesse período, a pesquisa de Nicholson dizia respeito ao que se poderia ser revelado sobre a estrutura do átomo através do estudo do espectro do sol e de outros corpos celestes (SENECHAL, 2013). Em 1911, em um encontro da Associação Britânica para Desenvolvimento da Ciência, Nicholson apresentava um modelo atômico planetário que influenciaria de maneira significativa os rumos da física no início daquele século.

Figura 4 - John William Nicholson (1881-1955)



Fonte: Kragh (2011a).

A aparição de modelos planetários para explicar a estrutura da matéria data de antes da descoberta do elétron. A “estratégia planetária” de investigação da matéria consistia na suposição de que o microcosmo está estruturado de maneira análoga ao macrocosmo, obedecendo às mesmas leis do movimento. Entre 1901 e 1905, muitos físicos endossaram a analogia atômica com um sistema planetário. A essa altura, já era conhecida a existência de cargas negativamente carregadas como um constituinte do átomo. Possivelmente, o primeiro cientista a propor um modelo atômico planetário levando em consideração a existência do elétron foi Jean Baptiste Perrin (1870-1942), um físico francês ganhador do Nobel em 1926 por seus trabalhos sobre Movimento Browniano e fenômenos associados (KRAUGH, 2012). Em uma palestra datada de 1901, Perrin conferiria a seguinte imagem para seu átomo:

Cada átomo será constituído, de um lado, por uma ou diversas massas fortemente carregadas com eletricidade positiva, ao modo de sóis positivos cuja massa será superior a do corpúsculo, e do outro, por múltiplos corpúsculos, ao modo de pequenos planetas negativos... [com] a carga total negativa exatamente equivalente à carga total positiva, de modo que o átomo é eletricamente neutro (PERRIN, 1901 apud KRAUGH, 2012, p.23).

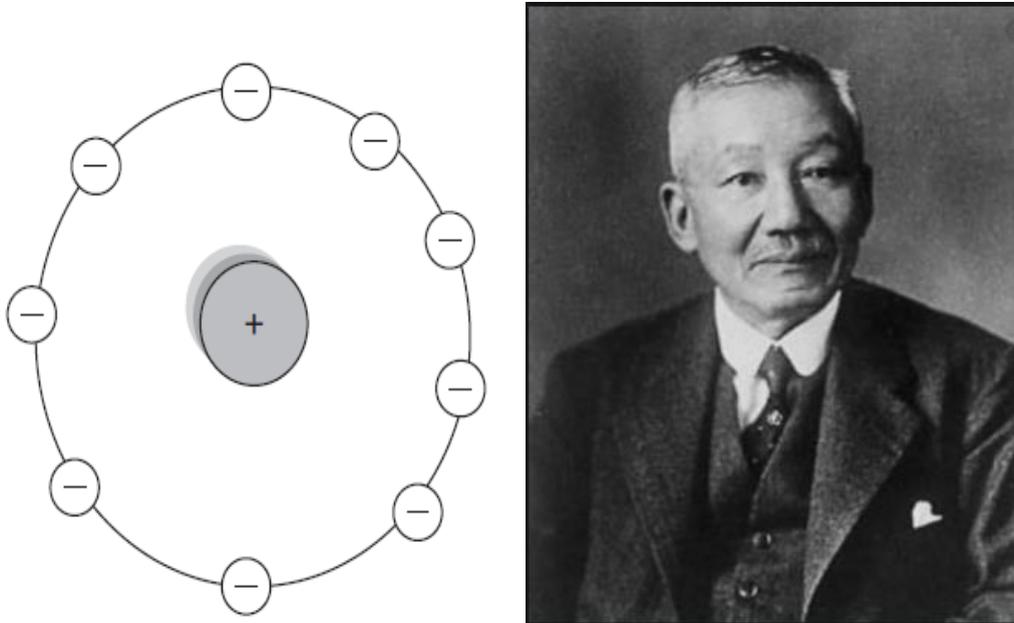
Em 1904, o físico japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950), publicara na *Philosophical Magazine* um artigo em que apresentava um modelo do tipo saturniano para o átomo. Tendo realizado seu pós-doutorado em Viena, Berlim e Munique, Nagaoka se especializara no estudo

feito por James Clerk Maxwell (1831-1879) sobre a estabilidade mecânica do sistema de anéis de Saturno. Nesse estudo, pelo qual venceu o Adams Prize, Maxwell afirmava que se a velocidade das inúmeras partículas-satélite ao redor de Saturno fosse suficientemente alta, o anel formado pelo movimento seria estável. Nagaoka aplicou esse raciocínio para o nível atômico, substituindo as inúmeras partículas por elétrons e o corpo central de Saturno pelo núcleo (KRAGH, 2012; HENTSCHEL et al., 2009). Sobre o sistema atômico em questão, o físico japonês escreveu:

(...) consiste de um grande número de partículas de iguais massas arranjadas em um círculo de iguais intervalos angulares e repelindo umas às outras com forças inversamente proporcionais ao quadrado da distância; no centro do círculo, situa-se uma partícula de grande massa atraindo as outras partículas de acordo com a mesma lei de força. Se essas partículas giram com aproximadamente a mesma velocidade sobre o centro atrativo, o sistema permanecerá de maneira geral estável para pequenas perturbações, desde que a força atrativa seja suficientemente grande (NAGAOKA, 1904, p. 445)

Publicado no mais importante periódico de teoria atômica, o modelo de Nagaoka se tornou conhecido e atraiu interesse, tendo sido positivamente avaliado pelo matemático francês Henri Poincaré. Como era comum na época, Nagaoka acreditava que as frequências espectrais observadas deveriam ser diretamente relacionadas à frequência da órbita do elétron. Radioatividade era interpretada como uma eventual “quebra” do anel saturniano, com os elétrons sendo ejetados como raios beta (HENTSCHEL et al., 2009). Explicada a estabilidade mecânica dos anéis devido à rotação, o mesmo não ocorria com as oscilações dos elétrons ortogonais ao plano de rotação, o que foi percebido por Thomson e George A. Schott, um físico da Universidade de Gales que acabou por mostrar que o sistema proposto por Nagaoka era incapaz de produzir a quantidade de ondas observadas tanto em espectros discretos quanto de bandas. Diante dessas dificuldades, o próprio Nagaoka acabou abandonando seu modelo em 1908 (KRAGH, 2012).

Figura 5 – Hantaro Nagaoka (1865-1950) e seu modelo atômico.



Fonte: Hentschel et al (2009).

Assim como Nagaoka e Perrin, Nicholson propôs um modelo planetário para o átomo. Os passos intelectuais seguidos por Nicholson podem ser resumidos da seguinte forma: primeiramente, postula que todos os elementos terrestres seriam constituídos de uma classe de elementos mais simples³⁹, os protoelementos, cuja existência só poderia ocorrer na superfície de estrelas e em nebulosas; em seguida, Nicholson define as estruturas dinâmicas que seus elementos primários teriam e as submete a dois tipos de testes quantitativos. O primeiro teste diz respeito ao cálculo dos pesos atômicos dos elementos conhecidos àquela altura em função dos pesos atômicos de seus átomos hipotéticos. O segundo teste relaciona-se com o cálculo das frequências espectrais que seriam emitidas por tais átomos, a fim de poder compará-las com conhecidos espectros de corpos celestes⁴⁰. Para Nicholson, os elementos terrestres exibiam uma

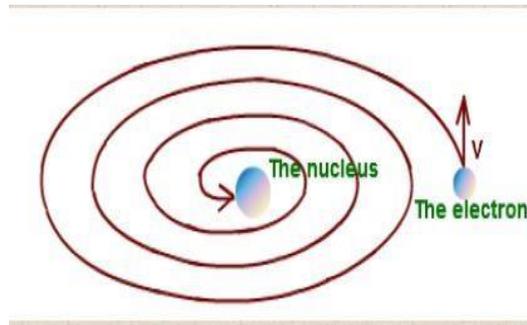
³⁹ Entre o final do século XIX e início do século XX, era muito comum a ideia de que os elementos terrestres seriam a evolução de formas mais simples, identificáveis em condições celestiais. O astrofísico inglês Sir Norman Lockyer (1836 – 1920) foi o primeiro, em 1897, a conjecturar que algumas linhas espectrais não identificadas eram devidas à “dissociação” do elemento químico em formas mais elementares da matéria, que ele chamou de protoelementos. Os estudos de Lockyer surgem três anos antes da “descoberta” do elétron e são considerados como decisivos para o convencimento de J. J. Thomson de que o átomo era complexo e divisível. O campo de pesquisa da astrofísica viveu, nas últimas décadas do século XIX, uma evolução impressionante, impulsionada pelos constantes aprimoramentos de equipamentos e traduzida na descoberta do hélio em 1868, por Jules Janssen e Norman Lockyer, fato que causou forte impressão em Nicholson.

⁴⁰ Como suas investigações abarcavam, no mínimo, três distintas áreas de conhecimento, Nicholson dividiu suas publicações entre dois grandes periódicos da época: os cálculos das frequências espectrais foram publicados na *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* enquanto a derivação dos pesos atômicos de seus proto-elementos foi apresentada na *Philosophical Magazine*, em 1911, em um longo artigo intitulado *A Structural Theory of the Chemical Elements*.

complexidade que tornava utópica qualquer tentativa de matematizar a sua estrutura. Evidência da alta complexidade dos elementos terrestres era a de que mesmo o átomo de hidrogênio exibía um espectro com uma enorme quantidade de linhas de emissão. Apenas as formas elementares, detectáveis graças à astrofísica, permitiriam um tratamento matemático mais simples e eficiente. Em 1911, aos 30 anos de idade, Nicholson já havia produzido cerca de 25 publicações científicas, praticamente todas concernentes a tópicos em eletrodinâmica e eletromagnetismo. Ele já havia iniciado uma rota para compreensão da estrutura do átomo ao desenvolver uma teoria dos metais, exibindo grande interesse por questões envolvendo a natureza de corpúsculos elementares, suas massas, distribuição de cargas e propriedades dinâmicas e radioativas. Quando começou a desenvolver sua teoria atômica, portanto, Nicholson possuía uma visão definida acerca dos constituintes elétricos do átomo. De maneira resumida, Nicholson via o átomo como um sistema eletrodinâmico constituído de minúsculas partículas carregadas negativamente orbitando uma esfera de carga positiva - de dimensão ainda menor que a do elétron - a que chamou de núcleo.

Seus primeiros artigos sobre estrutura da matéria foram *The Spectrum of Nebulium* e *A Structural Theory of Chemical Elements*, ambos escritos em Cambridge em 1911 e publicados no mesmo ano, respectivamente, na *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* e na *Philosophical Magazine*. Em seus primeiros trabalhos sobre a constituição da matéria, Nicholson parte da suposição de que os átomos são formados por um núcleo maciço envolto por elétrons circundantes em órbitas. Apesar da teoria de Nicholson ter sido publicado apenas alguns meses depois da exposição dos resultados dos experimentos com espalhamento de partículas alfa levado a cabo por Rutherford, e a despeito da similaridade entre os dois modelos, o astrofísico inglês asseverou que o modelo do físico de Manchester não foi uma influência para o seu trabalho. Nicholson considerava que o modelo atômico de Rutherford, com um núcleo simples, era apropriado para descrever os elementos primários, mas não os terrestres. Além do modelo saturniano apresentado por Nagaoka, os trabalhos de Thomson foram uma forte fonte de inspiração para a teoria de Nicholson, tanto Nagaoka quanto Thomson estavam preocupados em resolver a conhecida instabilidade dinâmica dos anéis de elétrons.

Figura 6 - Representação do "colapso" do átomo previsto por Joseph Larmor em 1900⁴¹.



Fonte: Martins (2013).

Os átomos primários de Nicholson eram essencialmente átomos de Thomson com a esfera positiva reduzida a uma dimensão inferior à do próprio raio do elétron⁴²:

Sir J. J. Thomson tratou os elétrons no átomo como girando dentro da esfera positiva, que possuía tamanho atômico. Na visão desenvolvida nesse artigo, a carga positiva existe em unidades com raio muito pequeno, mesmo quando comparado com o do elétron, e é a fonte de quase toda a massa do átomo. (NICHOLSON, 1911, p. 457).

Convencido de que a infinidade de linhas espectrais (observadas mesmo no átomo de hidrogênio) era consequência dos inúmeros graus de liberdade dos elementos terrestres, Nicholson supunha que seus átomos primários possuíam apenas um anel de elétrons. Dessa maneira, o pequeno número de modos de vibração de um dado anel era essencialmente o número de graus de liberdade correspondente ao átomo primário de sua teoria. A instabilidade mecânica do modelo, isto é, devido às vibrações transversais ao plano do anel, não era uma questão central para Nicholson porque ele poderia argumentar que os seus elementos primários estavam continuamente perdendo e ganhando elétrons nas condições extremas da superfície de estrelas e nebulosas:

⁴¹ Segundo o eletromagnetismo clássico, uma partícula acelerada e carregada orbitando um núcleo de carga oposta deveria rapidamente espiralar em direção ao núcleo.

⁴² O argumento de Nicholson para reduzir tão drasticamente o tamanho do núcleo tem como origem uma série de estudos realizados entre 1910 e 1911 onde conclui que toda a massa deve ter uma origem elétrica. De acordo com essa visão, a massa de uma esfera carregada era representada pela quantidade $\frac{2}{3} e^2 / ac^2$, onde e é a carga, a o raio e c a velocidade da luz no vácuo. Se o núcleo de fato fosse responsável pela maior parte da massa do átomo, seu raio deveria ser muito menor que o do elétron.

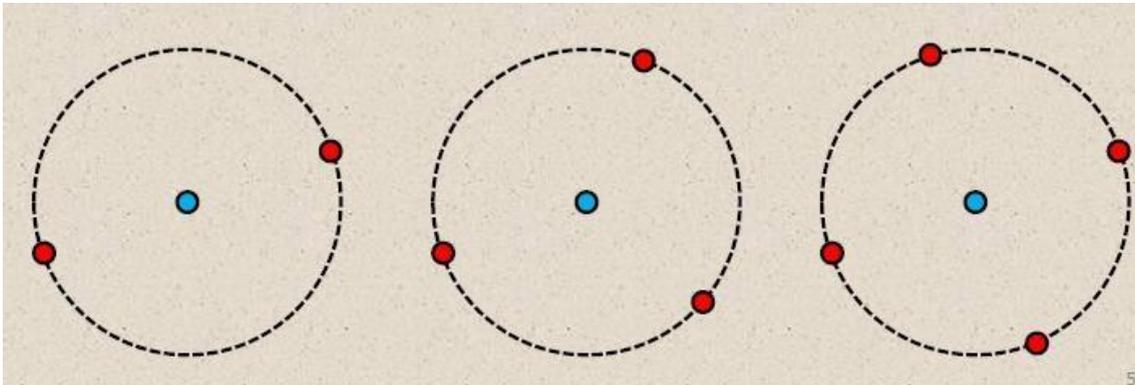
A instabilidade de um único átomo tem sido usada contra o modelo de Nagaoka, mas em uma massa de gás por exemplo, em que elétrons estão livres para se deslocar de átomos instáveis para estáveis, a crítica não me parece válida. Existem muitos fenômenos físicos que podem facilmente receber uma explicação, se átomos individuais de um corpo não podem manter estáveis todos os seus elétrons. (NICHOLSON, 1911, p. 148)

Quanto à instabilidade eletrodinâmica prevista por Larmor para sistemas saturnianos, Nicholson conferiu ao seu átomo um arranjo simétrico em que os elétrons do anel estariam separados entre intervalos angulares iguais, de modo que o vetor soma da aceleração central de todos os elétrons fosse igual a zero. Este “truque” de Nicholson teria consequências dramáticas para sua teoria, uma vez que impossibilita a existência de um sistema atômico com um único elétron. Ironicamente, a aceitação da teoria de Bohr, dois anos mais tarde, estava assentada proeminentemente na sua capacidade de derivar os espectros do átomo de hidrogênio.

Nicholson procurou acomodar seu modelo aos dados experimentais por dois caminhos distintos. Ao estabelecer teoricamente o sistema dinâmico de seus proto-elementos ele foi capaz de (i) explicar os pesos atômicos dos elementos terrestres como compostos desses elementos mais elementares, de peso conhecido; e (ii) identificar as frequências das linhas dos espectros de nebulosas e da coroa solar com as vibrações produzidas pelas configurações destes elementos primários. A derivação dos pesos atômicos foi apresentada detalhadamente por Nicholson no artigo de 1911 *A Structural Theory of Chemical Elements*, publicado na *Philosophical Magazine*.

Ao excluir a possibilidade de existência de um elemento primário com apenas um elétron no anel, o “coronium” - que possuiria dois elétrons orbitando um núcleo com carga positiva igual ao módulo de duas unidades de carga do elétron - era o átomo mais simples e mais leve da teoria de Nicholson.

Figura 7 - Representação dos três primeiros elementos da teoria de Nicholson: corônio, hidrogênio e nebulio



Fonte: Martins (2013).

Em seguida, aparecia o proto-elemento “hidrogênio”, contendo um anel de três elétrons; o “nebulium”, com quatro elétrons; e o “proto-fluor” com cinco elétrons. Os proto-elementos de Nicholson eram identificados em função da carga do núcleo; se, por exemplo, um átomo com quatro unidades de carga em seu núcleo possuir menos ou mais que quatro elétrons orbitando no anel, ele continuaria sendo um “nebulium”. A ligação entre átomos primários seria a causa de existência dos diversos elementos terrestres conhecidos. A natureza da ligação foi exemplificada por Nicholson da seguinte forma: um elemento terrestre constituído por nebulium e proto-fluor seria formado por dois anéis coplanares de quatro e cinco elétrons e por dois núcleos que não fundiriam em um só, existindo conjuntamente. Para Nicholson, a complexidade do núcleo era essencial para dar conta dos conhecidos fenômenos radioativos. A razão para que Nicholson tenha estabelecido a existência de apenas quatro elementos primários é que ele julgou não ser necessário mais que isso para derivar os pesos atômicos constantes na tabela periódica.

Quadro 2 - Os proto-elementos de Nicholson e seus pesos relativos hipotéticos.

Elemento	Símbolo	Carga do núcleo	Peso atômico
Corônio	Cn	2e	0,51282
Hidrogênio ⁴³	H	3e	1,008

⁴³ Nicholson não achava que o hidrogênio primário era necessariamente o mesmo que o terrestre, mas que o último era constituído de duas ou três unidades do primeiro. A razão para Nicholson atribuir ao hidrogênio primário o mesmo peso que o terrestre se explica pela circunstância de que o que lhe importava era que os pesos relativos

Nebúlio	Nu	4e	1,6281
Proto-flúor	Pf	5e	2,3615

Fonte: Adaptado de Scerri (2016).

Com a suposição da distribuição uniforme da carga positiva na esfera do núcleo, com a expressão que obtinha para determinação da massa de uma esfera carregada (ver nota de rodapé 42) e atribuindo ao proto-hidrogênio o peso atômico de 1,008, Nicholson fixou, os pesos relativos de seus elementos primários. Desse ponto em diante, tudo o que o astrofísico fez foi, por tentativa e erro, combinar aritmeticamente os pesos dos elementos primários até que coincidisse com os elementos conhecidos da tabela periódica. Com esse expediente, Nicholson conseguiu identificar todos os elementos da tabela periódica como uma composição de seus três⁴⁴ átomos fundamentais:

Quadro 3 - Interpretação dada por Nicholson aos doze primeiros elementos da tabela periódica em função dos seus proto-elementos.

Elemento	Fórmula	Peso atômico calculado	Peso atômico observado
H	H	1,008	1,008
He	Nu + Pf	3,99	3,99
Li	3Nu + 2H	6,90	6,94
Be	3Pf + 2H	9,097	9,10
B	2He + 3H	11,00	11,00
C	2He + 4H	12,00	12,00
N	2He + 6H	14,02	14,01
O	3He + 4H	15,996	16,00
F	3He + 7H	19,020	19,00
Ne	6 (Pf + H)	20,21	20,21
Na	4He + 7H	23,008	23,01

Fonte: Adaptado de Scerri (2016). As abreviações Pf, H e Nu indicam, respectivamente, proto-flúor, hidrogênio e nebulio.

estivessem corretos. Se no decorrer de sua pesquisa descobrisse a composição exata do hidrogênio ordinário, tudo que precisaria fazer era modificações nas fórmulas estabelecidas.

⁴⁴ Nicholson julgava que o corônio não poderia existir na atmosfera terrestre sequer na forma ligada.

A primeira aparição pública da teoria atômica de Nicholson acontece num encontro da British Association na cidade portuária de Porthsmouth, em agosto de 1911. O método de Nicholson, apesar da acurácia dos resultados, não fora recebido com muito entusiasmo pelos presentes:

A coincidência entre os valores calculados e observados é grande, conquanto a atitude geral dos presentes é de cautela em face de uma pendência de apresentação mais completa do artigo, além do fato de que um esquema completo da constituição da matéria deve, ao fim e ao cabo, dar uma explicação espectral satisfatória.⁴⁵

Nicholson já parecia antever que críticas dessa natureza seriam feitas a um modelo que não fornecesse uma boa acomodação dos dados experimentais fornecidos pela espectroscopia, razão pela qual já desenvolvia *The Spectrum of Nebulium*, onde discutia justamente a acomodação de linhas do espectro de nebulosas com as vibrações do nebulio. Este artigo foi publicado cerca de dois meses depois do evento, em novembro, na *Monthly Notices*.

Na comunicação feita em Porthsmouth, Nicholson já adiantara que algumas das linhas não identificadas (que não puderam ser associadas nem ao hélio nem ao hidrogênio) do espectro de nebulosas foram atribuídas ao nebulio. Além de acomodar diversas linhas observadas, Nicholson foi capaz de prever a ocorrência de algumas linhas ainda não identificadas, o que, naturalmente, lhe conduziu a um status de autoridade científica na área. Os resultados da identificação quantitativa desses espectros foram apresentados numa série de artigos publicados na *Monthly Notices*, que eventualmente seriam lidos por Bohr e que muito provavelmente reorientaram a direção das investigações do físico dinamarquês, que, apesar de já possuir um modelo atômico razoavelmente desenvolvido, ainda não havia expressado qualquer intenção de usá-lo para explicar dados espectrais.

Ao ter “encolhido” a esfera positiva do modelo de Thomson, Nicholson abriu mão da determinação da dimensão linear do átomo, e, portanto, lhe era impossível calcular isoladamente as frequências transversais permitidas para um de seus elementos, mesmo com a suposição de que a frequência transversal de um elétron era igual a sua frequência de rotação em torno do núcleo. Entretanto, percebeu que as razões entre as frequências de vibração permitidas para um anel com o mesmo número de elétrons dependiam apenas da quantidade de elétrons no anel e da carga do núcleo, e não de parâmetros do átomo tais como raio e velocidade angular. Por tentativa e erro, passa a procurar equivalência entre as razões das frequências permitidas para o nebulio com as razões entre linhas observadas na nebulosa de Orion. Com

⁴⁵ Anônimo, *Nature*, 12 de outubro de 1911, p. 501.

esse expediente, consegue acomodar com grande acurácia dez das doze linhas nebulares conhecidas àquela altura. Nicholson “valida” suas conclusões desenvolvendo um cálculo da probabilidade de as correspondências serem fortuitas, levando em consideração a extensão do espectro, a largura das linhas etc., concluindo que a chance era desprezível.

Além de acomodar um grande número de dados experimentais em sua teoria, Nicholson previu, ao final de *The Spectrum of Nebulium*, a existência de uma nova linha de 4352,9 Å na nebulosa de Orion. Pouco tempo depois, foi observada no Observatório Lick uma linha de 4353,3 Å, um erro de apenas 0,009%. Em seguida, Nicholson experimentou uma nova vitória para sua teoria, na forma, mais uma vez, de uma predição bem-sucedida de linha espectral, dessa vez identificada com o “proto-flúor” e com um percentual de erro ainda menor: na segunda predição (agora, um erro de apenas 0,003%), a linha observada media 6374,6 Å, valor muito próximo dos cálculos do astrofísico, de 6374,8 Å. Apesar dessas consideráveis vitórias, sua teoria ainda estava incompleta.

Nicholson havia fixado teoricamente o raio de seu elemento primário nebulio, “corrigindo” a deficiência provocada pelo encolhimento do átomo de Thomson, e assim demonstrado que tais dimensões estavam em acordo com as dimensões atômicas conhecidas à época. Mas a verificação deste resultado só seria possível experimentalmente, sem a qual a teoria de proto-elementos era apenas uma hipótese não testada. Outra incompletude de sua teoria era a inexistência de uma equação que relacionasse as configurações das frequências de vibração calculadas em anéis com diferentes números de elétrons. Essas eram as questões que intrigavam Nicholson quando, em dezembro de 1911, publica *The Constitution of the Solar Corona I.: Protofluorine*, onde, analogamente ao que fez em *The Spectrum of Nebulium*, tentaria relacionar as frequências espectrais da coroa solar com o elemento primário proto-fluor. Em junho de 1912, seria publicado *The Constitution of Solar Corona II*, onde mais uma vez o proto-fluor seria usado para interpretar linhas espectrais.

A primeira menção à constante de Planck na obra de Nicholson ocorre em julho de 1912. O astrofísico acreditava que encontraria no trabalho de Planck a resposta para correção da incompletude de sua teoria. Ao observar que seus átomos primários dividiam uma característica essencial com os osciladores de Planck, a saber, o de possuir uma frequência principal que era também uma das linhas mais fortes dos espectros atômicos de seus proto-elementos, Nicholson concluía que a constante de Planck deveria ter um significado atômico (SCERRI, 2016; MCCORMARCH 1966):

A constante da natureza, em termos de seus espectros, parece poder ter sido expressa por Planck, na sua recente teoria quântica da energia. É evidente que o modelo do átomo com que lidamos tem muitas das características essenciais de um oscilador de Planck. Eles possuem uma frequência principal $\omega/2\pi$, onde ω é a velocidade angular dos elétrons dentro de um átomo. Não é desejável, neste trabalho, dar qualquer explicação detalhada dos princípios da teoria de Planck, mas iremos dispor de seus principais resultados. (NICHOLSON, 1912, p. 677)

A forma pela qual Nicholson chegara à constante de Planck entre dezembro de 1911 e julho de 1912 foi através do cálculo da razão entre a energia potencial de uma partícula e sua frequência de rotação. O seu talento em estabelecer relações numerológicas talvez já tenha ficado claro ao longo do texto, portanto, não deve surpreender que o físico tenha descoberto que tal valor é sempre um múltiplo da constante de Planck. Primeiramente, Nicholson expressou a energia potencial do anel como sendo $mna^2\omega^2$, onde m é a massa do elétron, n o número de elétrons no anel, a o raio, e ω a velocidade angular. Utilizando os valores previamente encontrados para a velocidade angular e o raio do proto-fluor, ele calculou a razão entre energia potencial da partícula e sua frequência rotacional:

$$\frac{mna^2\omega^2}{\omega/2\pi} = 154,94 \times 10^{-27} \text{ erg segundos.}$$

Esse valor era aproximadamente 25 vezes a constante de Planck (considerando-se a acurácia experimental da determinação dos valores de carga e massa dos quais a e ω eram dependentes), cujo valor à época era $6,548 \times 10^{-27}$ erg segundos. O ineditismo das ideias de Nicholson não reside, entretanto, neste tratamento da constante de Planck, uma vez que o fato dessa constante ser associada com energia não era exatamente uma novidade à época. A verdadeira contribuição de Nicholson para o desenvolvimento da teoria atômica reside no entendimento que tinha do momento angular, a saber, este deveria ser quantizado em termos do quantum elementar de ação. Para isso, reescreveu o quociente acima como $2\pi mna(a\omega) = 2\pi mnva$, concluindo que, como $mnva$ possui unidade de momento angular (n é um número inteiro), a razão entre energia e frequência para um anel com n elétrons era igual ao momento angular do anel vezes 2π . Era a primeira vez que o quantum de ação de Planck, que já havia sido relacionado com a energia do átomo por Arthur Haas, era associado a grandeza física momento angular. As palavras exatas de Nicholson quando da apresentação da quantização do momento angular foram:

É possível ter uma nova perspectiva da teoria de Planck, que pode ser brevemente apresentada. Uma vez que a parte variável da energia de um sistema atômico na presente forma é proporcional a $mna^2\omega^2$, a razão entre a energia e a frequência é proporcional a $mna\omega$, ou $mnav$, que é o momento angular total dos elétrons em volta do núcleo. Se, portanto, a constante de Planck tem, como sugeriu Sommerfeld, um significado atômico, pode significar que o movimento angular de um átomo só pode aumentar ou diminuir em valores discretos quando os elétrons saem ou retornam. (NICHOLSON, 1912, p. 679).

Assim como chegara à conclusão de que o átomo deveria ser um sistema saturniano independentemente e de forma alheia aos trabalhos de Rutherford, a afirmação da quantização do momento angular do elétron - noção nuclear à teoria quântica que ajudou a garantir o sucesso do átomo de Bohr – por Nicholson se deu de maneira distinta do itinerário científico de Niels Bohr. Se para o físico dinamarquês a quantização das órbitas eletrônicas foi “imposta” por meio de seus postulados quânticos, para Nicholson tal noção surge como uma consequência de sua teoria atômica peculiaríssima, baseada na mecânica clássica:

(...) ele não construiu uma teoria sobre hipóteses quânticas que ele teria considerado arbitrárias. Ao invés disso, ele estabelece sua teoria clássica para estrutura atômica, uma teoria que parecia correta mas incompleta, e nela busca o papel que a constante de Planck desempenha em sistemas atômicos com os valores numéricos precisos que apenas sua teoria poderia produzir. (MCCORMARCH, 1966 p.169)

Se para o físico de Copenhague, o fato de o momento angular das órbitas possíveis para um elétron só poder assumir valores discretos múltiplos de $h/2\pi$ era a consequência matemática derivada da assunção de seus postulados quânticos, para Nicholson, por outro lado, a quantização surge, paradoxalmente, de suas tentativas de conferir uma estabilidade mecânica ao seu modelo. Segundo McCormarch (1966), provavelmente, a inspiração imediata para o ‘insight’ de Nicholson acerca do significado atômico do quantum elementar de ação veio de uma série de palestras proferidas por Thomson na primavera de 1912 na Royal Institution, onde argumentava que as descontinuidades quânticas não eram devidas à existência de uma estrutura na própria energia dos elétrons, mas, antes, às propriedades do átomo (o agente através do qual a energia é transformada).

Com a aplicação da constante de Planck a sua teoria, Nicholson chega a uma expressão a partir da qual consegue determinar as frequências espectrais de uma maneira muito mais prática que a anterior. Com este novo método de calcular as frequências espectrais, Nicholson chega ao número de vinte e uma linhas dos espectros de nebulosas e da coroa solar identificadas

em função de seus proto-elementos e passa a ser tratado como uma autoridade científica tanto no campo da espectroscopia como no campo de estrutura da matéria.

Após assentar sua teoria quântica, Nicholson passa a derivar resultados dela, especificamente, passa a calcular a razão entre a energia potencial e a frequência do protofluor carregado negativamente em 1 e 2 elétrons e encontra, respectivamente, 22h e 18h (isto é, 22 e 18 vezes o valor da constante de Planck). Nota, então que os três valores para o Pf, Pf¹⁺ e Pf²⁺, fazem partes de uma sequência harmônica: 25, 22, 18, 13, 7, 0. Os valores são então divididos pelo número de elétrons no átomo para encontrar o número de unidades de Planck de momento angular por elétron, o que o levou aos valores de 5, 5.5, 6, 6.5, e 7. Chega então a uma fórmula geral para o momento angular de um anel de n elétrons: $1/(15-n) n$. (SCERRI, 2016, MCCORMARCH, 1966)

Essa seria, para Nicholson, a peça que faltava para explicar as diferentes configurações atômicas, aspecto tido como um “buraco” em sua teoria, além de fixar as constantes raio atômico e velocidade angular. Em outras palavras, a capacidade de fixar uma dimensão atômica precisa, outrora perdida pelo encolhimento do núcleo do átomo de Thomson, havia sido reconquistada. É importante notar que, entre os físicos britânicos que lidavam seriamente com a teoria quântica em meados de 1912, apenas Nicholson a aplicava para solução de problemas físicos, enquanto os demais se ocupavam de descobrir seu significado ou explicá-la. Nicholson se apresentou nesse contexto como alguém que tanto aplicou a teoria quanto buscou seu significado (MCCORMARCH, 1966).

A aplicação da constante de Planck permitiu a Nicholson desenvolver um método prático para determinar frequências espectrais, vez que, a partir do cálculo da relação entre a energia e a frequência de emissão dos átomos do protofluor, Nicholson expressaria o espectro de seu elemento primário na forma de uma série que acabou por não se enquadrar em nenhuma das séries espectrais conhecidas da época (Balmer, Rydberg, Kayser, ou Runge). A razão para isso era que, como Nicholson já havia percebido, as mudanças de energia na teoria quântica eram descontínuas, de modo que “não seria possível representar a dinâmica atômica através de equações diferenciais”. A sua fórmula para o momento angular deveria, portanto, envolver uma variável inteira e não uma contínua. Fato é que na espectroscopia da época havia um número de fórmulas empíricas dependentes de inteiros para o espectro de séries e Nicholson observou que quando escrevia as frequências de elemento primário em termos de tais fórmulas, a expressão resultante era incompatível com aquelas séries.

Os comprimentos de onda relativos às emissões de elemento primário, o protofluorino, foram definidos a partir da suposição de que os elétrons não contribuíam definitivamente para

o peso do átomo. Segundo Nicholson (1912a), apesar do valor da massa do núcleo ser desconhecida, seria essencial considerar que o peso atômico desta substância é comparável com o do hidrogênio, que o valor de m/M (massa do elétron/massa do núcleo) deve ser muito pequena. Assim, o a maior parte do peso atômico estaria concentrada no núcleo que por ser capaz de se movimentar, deveria ter avaliada a contribuição de suas vibrações para os espectros identificados do protoflúorino. No artigo seguinte, publicado no final de 1912, Nicholson reflete sobre a aplicação da teoria quântica ao estudo dos espectros:

A teoria quântica, aparentemente, não tem sido utilizada para explicação da “série” espectros, que consiste em um grande número de linhas relacionadas dadas para um átomo relativamente simples. No entanto, na opinião do autor, ela fornece, em certos casos, a verdadeira explicação, e somos levados a supor que as linhas de uma série podem não emanar do mesmo átomo, mas a partir de átomos cujos momentos angulares tenham, por radiação ou por outra forma, decaído por diferentes quantidades discretas de um valor padrão. Por exemplo, nessa visão, existem vários tipos de átomo de hidrogênio, idêntico em propriedades químicas e até no peso, mas diferente em seus movimentos internos. (NICHOLSON, 1912b, pp. 729-730)

3.3 – O modelo de Bohr

Após defender sua tese (Ph.D.) na primavera de 1911 pela Universidade de Copenhague, Bohr obteve um financiamento de estudos pós-graduados. A escolha por Cambridge se deveu à oportunidade de trabalhar mais de perto com o à época diretor do Laboratório Cavendish, J. J. Thomson, autoridade na área de pesquisa de interesse do jovem dinamarquês, a teoria eletrônica nos metais. O problema dos elétrons ligados a estruturas metálicas, de grande interesse para o físico dinamarquês, fez com que Bohr fizesse suposições sobre seu movimento e configuração que eram compatíveis com as investigações de Thomson (HENTSCHEL et al, 2009). Em uma entrevista dada em 1962, ano de sua morte, Bohr recordaria o período em que esteve em Cambridge como “absolutamente inútil” (PAIS, 1991, p. 121). Na introdução que fez a uma (BOHR, 1989) das muitas edições de *Sobre a Constituição de Átomos e Moléculas*, referindo-se à chegada do então jovem Dr. Bohr à Inglaterra, Leon Rosenfeld descreve um ambiente pouco receptivo às ideias do físico dinamarquês: J. J. Thomson já não mostrava muito interesse no seu objeto de estudo do doutorado, a teoria eletrônica dos metais; Jeans tampouco mostrava-se disposto a discutir os pontos de vista de Bohr sobre radiação de corpo negro. Além disso, a *Cambridge Philosophical Society* julgou que a tese de Bohr, demasiadamente extensa, seria uma publicação dispendiosa. Apesar destes infortúnios, Bohr pôde assistir palestras de

cientistas do porte de Thomson, Larmor e Jeans, além de ter estabelecido uma rede de contatos com jovens físicos que tinham interesses de pesquisa em comum. Foi durante esse período que Bohr e Nicholson se conheceram pessoalmente. Sobre o recente artigo publicado por Nicholson sobre teoria dos metais, Bohr se referiria numa carta a Carl Wihelm Oseen como “perfeitamente louco”, e relatando suas impressões sobre o astrofísico inglês da seguinte forma: “Ele foi extremamente gentil, mas dificilmente serei capaz de concordar com ele sobre muito” (KRAGH, 2012).

Figura 8 – Niels Bohr (1885 – 1962)



Fonte: Kragh (2011b).

O explícito desinteresse de Thomson por sua tese, provavelmente jamais lida pelo físico inglês, não foi suficiente para fazer Bohr declinar do carro chefe de sua pesquisa; continuou a perseguir a teoria eletrônica nos oito meses em que esteve em Cambridge e nos três primeiros meses de sua estadia em Manchester. Distintamente do que pode parecer, Bohr não foi à cidade inglesa de Rutherford para analisar as consequências do núcleo atômico, mas, antes, para um curso de seis semanas sobre técnicas experimentais para iniciantes em radioatividade. O objetivo de Bohr não era se tornar um experimentador, mas manter contato com a grande

autoridade em Física de Manchester, Rutherford, para poder seguir com sua pesquisa em teoria dos metais (HEILBRON, 1977). Em outras palavras, a troca de Cambridge por Manchester se deveu menos uma eventual inclinação de Bohr a se debruçar sobre questões relativas ao núcleo atômico, do que a uma frustração com a baixa fertilidade para suas ideias encontrada em Cambridge.

O interesse de Bohr pela estrutura do átomo tem início quando estuda um artigo sobre a absorção de partículas alfa recentemente publicado por Charles Galton Darwin, (1887-1963), o único físico-matemático no grupo de Rutherford. Bohr havia notado que Darwin ignorava as forças de ligação coulombiana, tratando o elétron como uma partícula livre ao analisar a interação entre partículas alfas e elétrons no átomo. Inspirado pela abordagem de Thomson, Bohr considerou que essa interação era um fenômeno de ressonância que dependia da razão entre o período natural de vibração dos elétrons em equilíbrio e o necessário para que uma partícula alfa atravessasse o átomo (HEILBRON, 1977). O artigo de Darwin tratava de uma questão central para o programa de pesquisa conduzido por Bohr, o problema de elétrons ligados em metais, à investigação direta da estrutura da matéria, campo em que Bohr se inseriu definitivamente. Em carta para seu irmão, Harald, Bohr relatava seu entusiasmo com seu modelo atômico recentemente desenvolvido, um sistema que, diferentemente da teoria de J. J. Thomson, “não seria a indicação da natureza de uma possibilidade, mas talvez um pequeno pedaço de realidade” (HENTSCHEL et. al, 2009, p. 59).

A primeira versão do modelo fora desenvolvida por Bohr entre junho e julho de 1912 e apresentada a Rutherford em escritos hoje conhecidos como o *Memorando de Manchester*, cujo tema central é a estrutura necessária ao átomo para garantir sua estabilidade. Ainda que em caráter incipiente, o texto de seis folhas escritas à mão já exibia o título que seria usado na obra definitiva, um ano mais tarde, *Sobre a Constituição de Átomos e Moléculas*. Como discutimos, Thomson havia rejeitado modelos nucleares como o de Nagaoka devido à instabilidade que apresentavam. No memorando, Bohr atacava o problema da instabilidade mecânica de um sistema como o de Rutherford. O problema da instabilidade eletrodinâmica, isto é, devido à irradiação de energia de uma partícula acelerada, apesar de ser conhecida por Bohr, não foi tratada àquela altura. Enquanto Thomson apontava a instabilidade como uma razão para rejeitar modelos nucleares, Bohr, por outro lado, estava interessado em fixar esse problema a partir de uma solução não-mecânica, aplicando uma ideia amadurecida com os estudos de sua pesquisa anterior da teoria de metais, a de que a mecânica clássica e a eletrodinâmica não seriam suficientes para explicar alguns aspectos de átomos e moléculas. Nesse memorando, Bohr tratava de configurações eletrônicas e moleculares, mas não com o espectro, como expressaria

em carta para Rutherford em 31 de janeiro de 1913: “Eu não lido, em absoluto, com a questão do cálculo das frequências correspondentes às linhas no espectro visível”

Ao se debruçar sobre o átomo de Rutherford, Bohr, atentou para o fato de que não havia nada que limitasse o raio do átomo. Não havia uma unidade de medida e, por conseguinte, não havia restrições para os períodos de rotação; os raios permitidos para o sistema de Rutherford - e por conseguinte as frequências rotacionais associadas - eram infinitas, e não havia nada na mecânica clássica que pudesse restringir esses parâmetros. Era precisamente o contrário o que as evidências experimentais demonstravam; os tamanhos dos átomos não variavam de maneira arbitrária e tampouco as frequências espectrais.

A primeira tentativa de estabilização do átomo levada a cabo por Bohr impôs que as energias cinéticas possíveis para o elétron seriam o produto de sua frequência de rotação com um fator de proporcionalidade de mesma ordem de magnitude da constante de Planck. Como dissemos, Bohr já havia aplicado raciocínio parecido para tratar de problemas relativos a teoria eletrônica dos metais em sua tese de 1911. A relação proposta era a seguinte:

$$E_k = K\nu$$

onde E_k , é a energia cinética do elétron, K , a constante de proporcionalidade (que seria identificada como sendo $h/2$ após Bohr finalmente ter contato com a equação de Balmer para o espectro do hidrogênio) e ν , a frequência de rotação. Para Heilbron (1977), a introdução desta condição de estabilidade delineia uma ruptura com o programa de Thomson, que havia lhe servido muito bem até aquele momento. A abordagem de Bohr o aproximava de outro cientista da época, de Max Planck e sua teoria quântica. A abordagem de Bohr lhe conduzia a maturação da ideia de estados estacionários de energia, que acabaria lhe levando a afirmar a que talvez seja sua ideia mais revolucionária porque diametralmente em desacordo com o que parecia ser um ponto pacífico para os cientistas do período: as frequências espectrais observadas não são as frequências mecânicas dos átomos que as emitem, tampouco devidas a vibrações transversais ao eixo da órbita. Parecia já estar claro para Bohr, em 1912, antes do contato com a obra de Nicholson, a necessidade de divórcio, ao menos momentâneo, com a mecânica clássica. De fato, sua condição de estabilidade apresentada ali não tem qualquer suporte mecânico, o que é reconhecido pelo próprio Bohr:

A hipótese é a seguinte: haverá, para qualquer anel estável (qualquer anel ocorrendo em átomos naturais), uma razão bem definida entre a energia

cinética de qualquer elétron no anel e o tempo (frequência) de rotação. Essa hipótese, para qual não será tentada dar uma fundamentação mecânica (já que parece inútil), é escolhida como a única a oferecer uma possibilidade de explicação do conjunto de resultados experimentais que se amontoam e parecem confirmar concepções do mecanismo de radiação como aqueles propostos por Planck e Einstein. (BOHR, 1981, p. 137)

O processo de quantização do átomo é um capítulo da História da Física que recebeu, ao longo dos anos, muita atenção. Niels Bohr está longe de ser o único a ter tentado relacionar o quantum de ação de Planck a um modelo atômico. No início do século passado, o significado da constante de Planck era investigado por diversos cientistas. Em 1909, Einstein suspeitava de que havia alguma relação entre h e a unidade fundamental de carga elétrica. Wien, por sua vez, acreditava que a quantização da energia seria devida a algum tipo de propriedade universal dos átomos. Em 1910, inspirado pela leitura de “Eletricidade e Matéria”, de Thomson, o físico alemão Arthur Haas estabeleceu uma relação entre estrutura atômica e o quantum de ação em um modelo atômico para o hidrogênio neutro traduzido em uma esfera positiva e um único elétron orbitando a superfície desta esfera⁴⁶. Haas percebeu que se dividisse a constante de Planck pela energia do elétron na superfície deste átomo, o resultado seria da mesma ordem de magnitude das frequências espectrais encontradas experimentalmente para o hidrogênio (BAILY, 2012). “Estava no ar a tentativa de usar as ideias de Planck em conexão de tais coisas” (PAIS, 1991, p. 144), diria Bohr sobre aquele período.

Todos os caminhos levavam à quantização da estrutura atômica, que se apresentava como um imperativo experimental colhido diretamente da espectroscopia. A imposição da constância do momento angular de cada elétron no átomo foi a resposta de Bohr a insistente instabilidade do átomo de Rutherford. De fato, era possível ser demonstrado que este postulado implicava tanto na manutenção do raio da órbita quanto na estabilidade do sistema contra perturbações operando no plano da órbita; quanto às perturbações transversais à órbita, Bohr partilhava a ideia de Nicholson, de que essas vibrações eram estáveis em anéis de até sete elétrons. Até então, a teoria de Bohr dizia respeito unicamente aos átomos em seu estado de menor energia, estacionário: até o início de 1913, estava longe de ser uma teoria do espectro (HOYER, 1981 p. 107)⁴⁷. É só ao final de 1912, após ter contato com os trabalhos de Nicholson, que a espectroscopia entra no radar do físico dinamarquês.

⁴⁶ Segundo Rosenfeld (1971, p. 72), há distintas motivações entre os programas de Bohr e Haas. Enquanto o primeiro incorpora o quantum de ação a uma descrição da estrutura da matéria, entretanto o considerando essencialmente estranho à física clássica, Haas enxerga a necessidade de introduzir o quantum de ação na física clássica, um programa que, ainda segundo Rosenfeld, o próprio Planck não desaprovava.

⁴⁷ Introdução de Ulrich Hoyer a “The Rutherford Memorandum” em Rosenfeld, Leon. Niels Bohr collected Works. V2. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1981.

A seguir, iremos sintetizar os passos dados por Bohr em *Sobre a Constituição de Átomos e Moléculas* até a interpretação física da equação de Balmer-Rydber, feito que colocou seu modelo em um patamar de credibilidade jamais alcançado pela teoria de Nicholson. Segundo Bertrand Russel, a derivação teórica da constante de Rydberg foi “talvez a evidência mais sensacional em favor da teoria de Bohr quando fora originalmente publicada”. (RUSSEL, 1927, p. 175 apud KRAGH, 2012, p. 62). Como discutimos, Bohr já tinha percebido que o modelo que adotava, o de Rutherford, não possuía uma dimensão definida, e nem seria possível fazê-lo utilizando apenas a física clássica. Seria necessária a introdução de uma “quantidade estranha à eletrodinâmica clássica, i.e, a constante de Planck ou, como tem sido frequentemente chamado, o quantum elementar de ação” (KRAGH, 2012, p. 59). O primeiro passo nesse sentido em sua trilogia foi a determinação do mecanismo segundo o qual o elétron se mantém ligado ao núcleo. Assumindo que, apesar do movimento acelerado do elétron, não há emissão de radiação pelo sistema, Bohr descreveu a frequência ω em função da energia total do átomo, isto é, a energia necessária para remover o elétron de uma distância infinita do núcleo (KRAGH, 2012). Para o caso mais simples de um átomo composto de um único elétron orbitando um núcleo de carga E , a expressão encontrada foi:

$$\omega = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{W^{\frac{3}{2}}}{eE\sqrt{m}}$$

A expressão ilustra o já aludido problema da instabilidade eletrodinâmica apontado por Larmor; ao se variar W , obtém-se quaisquer valores de frequência e raio ($2a = \frac{eE}{W}$). A energia do átomo precisaria se restringida. De acordo com o entendimento que Bohr tinha da teoria de Planck e ao assumir que, durante a “captura” de um elétron pelo núcleo, radiação monocromática de frequência $\nu = \omega/2$ é emitida, Bohr concluiu que a quantidade de energia emitida no processo considerado é igual a $\tau h\nu$, onde τ é um número inteiro, ν a frequência da radiação emitida e h a constante de Planck (KRAGH, 2012; DARRIGOL et al., 2016). Com esses raciocínios, pôde concluir que, para órbitas estacionárias, a energia seria quantizada segundo a expressão:

$$W = \tau h \frac{\omega}{2}$$

Parâmetros atômicos como energia, frequência e raio, para qualquer órbita estacionária, puderam ser fixados em função de valores constantes. Para o raio atômico, por exemplo, a expressão encontrada por Bohr variava apenas com o número quântico τ , que indica a posição da órbita em relação ao núcleo:

$$a = \frac{\tau^2 h^2}{4\pi^2 m e E}$$

Para o número quântico $\tau = 1$, que descreve o estado de um átomo com apenas uma órbita, o valor encontrado para o raio atômico foi de 0.55×10^{-8} cm, o que é compatível com o raio do átomo de hidrogênio. Bohr passa, então, a discutir as tentativas de quantização conduzidas por Einstein, Haas e Nicholson, se atendo a este último. Apesar de reconhecer o sucesso preditivo da teoria de Nicholson, Bohr tece críticas à pressuposição clássica de que as linhas espectrais são devidas às vibrações mecânicas do sistema atômico.

Apesar da popularidade científica da fórmula de Balmer-Rydberg e da sua importância para elucidação da estrutura da matéria, foi apenas tardiamente que Bohr a conheceu através de seu colega Hans Marius Hansen, em fevereiro de 1913, pouco após ter lidos os artigos de Nicholson publicados na *Monthly Notices*. Não é absurdo imaginar que o método usado pelo astrofísico inglês para interpretar os espectros, talvez o único e certamente o mais notável a investigar a matéria dessa maneira, tenha ajudado Bohr a compreender o significado físico da lei espectral do hidrogênio. “Assim que vi a fórmula de Balmer, tudo ficou imediatamente claro para mim”, diria Bohr ao seu amigo e assistente Léon Rosenfeld, se lembrando do período.

Eu não sabia nada sobre a fórmula espectral. Então eu a vi... Eu a descobri, entendi. Outras pessoas a conheciam, mas eu descobri sozinho. E então eu descobri que havia algo de muito simples sobre o espectro do hidrogênio. Eu estava lendo o livro de Stark, e naquele momento senti que agora veremos como o espectro emerge. (BOHR, 1962)

Em uma de suas muitas notações, a equação de Balmer-Rydberg para o hidrogênio pode ser escrita como:

$$\nu = K \left(\frac{1}{\tau_2^2} - \frac{1}{\tau_1^2} \right)$$

onde τ_2 e τ_1 são números inteiros e K a constante de Rydberg. Para compreender como Bohr pôde relacionar a lei empírica de Balmer com sua teoria, precisamos recordar os dois “postulados de Bohr” sobre os quais, a sua teoria se sustenta:

I – O equilíbrio dinâmico dos sistemas em estado estacionário pode ser discutido com a ajuda da mecânica ordinária, enquanto que a passagem dos sistemas entre diferentes estados estacionários não pode ser tratada dessa maneira.

II – O processo acima é seguido pela emissão de radiação homogênea, para qual a relação entre frequência e quantidade de energia emitida é aquela dada pela teoria de Planck.

Para derivar a equação de Balmer de sua teoria, tudo o que Bohr precisou fazer foi equacionar a diferença de energia entre dois estados estacionários a um *quantum* de energia (KRAGH, 2012):

$$W(\tau_2) - W(\tau_1) = h\nu$$

Para o átomo de hidrogênio ($\tau_2 = 2$ e $\tau_1 = 3, 4 \dots$), a diferença de frequência entre um estado qualquer e o estado estacionário é dada por:

$$\nu = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \left(\frac{1}{\tau_2^2} - \frac{1}{\tau_1^2} \right)$$

A constante de Rydberg, fixada empiricamente, agora havia sido deduzida teoricamente da teoria de Bohr, uma teoria que dava significado físico para a equação de Balmer. Além de ter reproduzido as séries de Balmer, e Paschen para o hidrogênio, Bohr também previu a existência de séries para o ultravioleta e infravermelho, o que não tardou a ser confirmado. O físico dinamarquês conseguiu ainda mostrar que algumas das linhas observadas por Charles Pickering no espectro da constelação de Puppis, originalmente atribuídas ao hidrogênio, na verdade pertenceriam ao espectro do He^+ . Com essa quantidade impressionante de sucesso experimentais, a força da teoria de Bohr foi rapidamente reconhecida. Apesar de enfrentar resistências iniciais e muitas críticas, principalmente vindas de Thomson e Nicholson, o átomo de Bohr conquistou os cenários científicos ingleses e continentais em poucos anos. Ao final daquela década, com raríssimas exceções, nenhum cientista de renome ousaria defender uma teoria atômica que não fosse aquela desenvolvida pelo físico dinamarquês no inverno de 1913.

3.4 – Recepção e legado

Afinal de contas, qual o legado de Nicholson para a História da Ciência, qual a imagem que lhe compete no quadro geral do desenvolvimento dos primórdios da antiga teoria quântica? A de um cientista que deu sólidas contribuições ao progresso da ciência ou a de uma figura menos relevante, que derivou a maior parte de suas conclusões científicas no que hoje se sabe serem erros científicos? O renomado historiador da física John Heilbron comentou, em uma palestra na Sociedade Americana de Física, sobre como o trabalho de Nicholson com o neblium foi “espetacular” e como Bohr foi fortemente inspirado por essa pesquisa. Segundo Heilbron:

O sucesso do átomo de Nicholson incomodou Bohr. Ambos modelos pressupunham um núcleo e ambos obedeciam ao quantum; entretanto, o de Nicholson irradiava – e com acurácia sem precedentes – enquanto o de Bohr era, por assim dizer, espectroscopicamente mudo. No natal de 1912, Bohr elaborou um compromisso: seus átomos eram relativos ao estado fundamental, quando toda a energia permitida havia sido irradiada; Nicholson lidava com estágios iniciais.... Como um átomo de Nicholson alcançava seu estágio fundamental, Bohr nunca se preocupou em especificar. Ele queria meramente estabelecer a compatibilidade entre os dois modelos. O compromisso com Nicholson era deixar um legado importante para a forma definitiva da teoria. No mesmo artigo, Bohr propõe outras formulações de sua regra quântica, incluindo, com total reconhecimento da prioridade de Nicholson, a quantização do momento angular. (HEILBRON, 1977a, p. 69)

De fato, Bohr expressava grande preocupação com a maneira como sua teoria se relacionava com a de Nicholson, como evidencia uma carta enviada a seu irmão em 1912:

A teoria de Nicholson não é incompatível com a minha. Na verdade, meus cálculos seriam válidos para o estado químico final dos átomos, enquanto Nicholson lidaria com os átomos que emitem radiação quando os elétrons estão em processo de perda de energia antes de terem ocupado suas posições finais. A radiação passaria, assim, por pulsos e Nicholson estaria considerando os átomos enquanto seu conteúdo energético ainda é muito grande a ponto de emitirem luz no espectro visível. Mais tarde, a luz é emitida no ultravioleta, até que finalmente a energia que pode ser irradiada é perdida ... (BOHR, 1972, p. 563 apud MEHRA e RECHENBERG, 1982, p. 187)

Mesmo após a publicação de Sobre a Constituição de átomos e Moléculas, em 1913, a teoria de Nicholson continuou a gozar de prestígio da comunidade científica. Por exemplo,

McCormarch (1966, p. 183) reproduz uma fala feita por W. M. Hicks em um encontro na Austrália em 1914:

As frequências calculadas por Nicholson (em comparação com as) observadas são tão próximas e numerosas a ponto de não deixar dúvidas da exatidão da teoria.... A teoria de Nicholson se coloca sozinha como a primeira teoria satisfatória de um tipo de espectro. (MCCORMARCH, 1966, p. 183)

Abraham Pais, autor da mais importante biografia de Niels Bohr, de quem foi amigo pessoal e com quem conviveu por décadas, afirma que:

Bohr não estava impressionado por Nicholson quando ele o encontrou em Cambridge em 1911 e algum tempo depois disse que todo o trabalho de Nicholson não era muito bom. Seja como for, Bohr tomou nota de suas ideias do momento angular em um momento crucial para ele... Ele também o citou no seu artigo sobre o hidrogênio. É muito provável que, à época, o trabalho de Nicholson o tenha influenciado. (PAIS, 1995, p. 41)

Por sua vez, o renomado historiador da ciência Helge Kragh, escreve que:

Não é de admirar que Bohr, ao encontrar a teoria atômica de Nicholson, achou interessante e perturbadoramente semelhante às suas próprias ideias. O átomo de Nicholson era um rival para Bohr e Nicholson era o principal crítico das ideias de Bohr sobre o átomo quântico. (KRAGH, 2012, p. 27)

Em sua tese de doutorado onde investiga os modelos atômicos do início do século XX, Cesar Lopes também assegura a importância da teoria do astrofísico inglês para o progresso da ciência:

(...) Nicholson foi desaparecendo do cenário e a trilha do átomo de Bohr, apesar dos problemas que esse modelo apresentava, levou a pesquisa da estrutura atômica da mecânica quântica. Mas essa trilha começou a ser percorrida nas estrelas, nas investigações sobre os átomos das estrelas e seus espectros, que conduziram Nicholson a propor seu modelo que foi de fundamental importância para o desenvolvimento das hipóteses de Bohr (LOPES, 2009, pp. 152-153)

Nem todos, entretanto, concordam com a relevância de Nicholson para a trajetória intelectual trilhada por Bohr. As mais duras críticas direcionadas à teoria de Nicholson partiram, certamente, de Leon Rosenfeld, amigo íntimo de Bohr que, em um prefácio a uma edição de

Sobre a constituição de átomos e moléculas descreve a pesquisa levada a cabo por Nicholson como uma série de precipitações e coincidências:

(...) a razão das frequências dos dois primeiros modos coincide com a de duas linhas dos espectros nebulares: isso é suficiente para Nicholson ver neste sistema um modelo do átomo neutro do "nebulium"; e, por sorte, a frequência do terceiro modo, que ele pôde então calcular, também, coincidiu com a de outra risca nebular, a qual – para tornar as coisas ainda mais dramáticas – não era conhecida quando fez a predição na sua primeira memória, mas foi realmente encontrada um pouco mais tarde. (...) Sob o ponto de vista matemático, a discussão de Nicholson das condições de estabilidade relativas às configurações anelares e dos seus modos de oscilações é um hábil e esmerado trabalho; mas a maneira pela qual tenta aplicar o modelo à análise das situações físicas choca pela sua precipitação e diletantismo, de modo que não podem deixar de considerar-se como acidente desafortunados os casos em que realmente obteve concordância entre algumas das suas frequências calculadas e as frequências das riscas espectrais observadas. (...) No terceiro artigo (...) ocorre a primeira menção a constante de Planck em conexão com o momento angular dos elétrons girantes: novamente aqui não há qualquer argumento físico, mas apenas uma exibição de numerologia. Bohr não teve contato com as investigações de Nicholson, como veremos, antes do final de 1912, quando ele já havia dado suas próprias ideias de estrutura atômica na sua forma totalmente desenvolvida (ROSENFELD, 1963, p. 12).

Analogamente, o respeitado historiador da ciência Max Jammer defende o ineditismo das ideias de Bohr, afirmando que:

Deve ser lembrado que as antecipações de Nicholson de algumas das conclusões de Bohr estavam baseadas, como apontou Rosenfeld, sobre os fundamentos mais questionáveis e eventualmente falaciosos (JAMMER, 1966, p. 73).

Finalmente, Russel McCormarch, autor da mais completa análise sobre a teoria atômica de Nicholson finaliza seu texto afirmando que, apesar da teoria do astrofísico ter sobrevivido à publicação do modelo de Bohr, em 1913, ia se tornando claro:

(...) com a perspectiva do tempo, que o grande ponto de influência de Nicholson sobre a física não estava em 1914 ou qualquer período depois, mas no inverno de 1912, quando Bohr leu os artigos da *Monthly Notices* (MCCORMARCH, 1966, p. 184).

Como discutimos, é possível perceber nos trabalhos de Bohr publicados antes de seu primeiro contato com os artigos de Nicholson, particularmente no “memorando de Manchester”, fortes evidências de que, como afirma Rosenfeld, o físico dinamarquês já possuía seus

próprios motivos para quantizar o átomo. Argumentamos também que as ideias de Planck e Einstein caminhavam para se tornar uma unanimidade no cenário científico, acentuadamente nos trabalhos de jovens cientistas, que encontravam forte resistência de físicos da geração anterior, como Larmor e Thomson, para os quais a introdução de ideias quânticas no reino microscópico, ao menos sem uma fundamentação clara, eram vistas como uma má maneira de fazer ciência. Não há dúvidas de que Nicholson, enquanto um jovem físico de Cambridge, apresentava fortes marcas de um certo “tradicionalismo clássico”, o que pode ser ilustrado por suas tentativas de conferir ao átomo uma “imagem eletrodinâmica clássica”; o seu programa de pesquisa consistiu, durante muito tempo, numa investida para muitos desencorajadora, a conciliação do caráter discreto dos espectros com estruturas atômicas concebidas classicamente. Por outro lado, o mesmo Nicholson foi o primeiro a relacionar à constante de Planck ao momento angular do elétron, uma das ideias físicas mais fundamentais para edificação da Antiga Teoria Quântica. Apesar dessa significativa conclusão teórica alcançada por Nicholson, não parece haver de sua parte, entretanto, uma profunda compreensão das implicações da adoção da teoria quântica para entender os processos radiativos. Nesse caso, concordamos com Baily (2012), que advoga que era mais palatável para o astrofísico inglês imaginar que o momento angular de um anel de elétrons pudesse variar discretamente através da perda ou ganho de uma partícula, do que conceber que a energia fosse algo distinto de uma variável contínua.

Neste capítulo, desenvolvemos uma narrativa sobre as investigações da estrutura da matéria no início do século passado, com foco nas contribuições dadas por Nicholson e sua teoria dos proto-elementos ao átomo de Bohr. Procuramos tanto destacar aspectos epistemológicos da ciência, como interpretar o episódio por uma perspectiva tanto evolutiva quanto revolucionária. No próximo capítulo discutiremos o processo de construção, desenvolvimento e implementação de uma sequência didática concebida para discutir os conteúdos físico, histórico e epistemológico abordados na narrativa aqui apresentada.

CAPÍTULO 4 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS - A SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Os estudos teóricos que antecederam este capítulo orientaram o processo de construção, aplicação e avaliação da sequência didática que será detalhada nesta etapa. A intervenção didática aqui discutida teve sua aplicação no final do segundo semestre letivo do ano de 2019, em uma disciplina do curso de Física de uma universidade pública baiana. A disciplina escolhida propõe, dentro de uma abordagem contextual, entre outros pontos, a discussão dos conceitos, fenômenos, leis físicas, bem como da parte experimental e matemática relacionada à ótica e à física moderna, usando recursos da HC. Mediante autorização do professor da disciplina – que também é orientador desta dissertação - comecei a frequentar o curso desde o seu início, de modo a me inteirar da metodologia e conteúdo ministrado. Como a disciplina enfoca os conceitos físicos ligados à ótica e à física moderna através de uma abordagem historicamente estruturada, ela se mostrou um ambiente adequado à discussão da espectroscopia e da sua relação com a investigação da estrutura da matéria, principalmente ao final do curso, quando é prevista a abordagem de tópicos de Física Moderna. A turma era composta de quatro alunos matriculados, todos do curso de física diurno, mas um deles não frequentou o curso. Dos três alunos que frequentaram, um deles, identificado como A1 estava no sexto semestre; um segundo identificado como A2, estava no oitavo semestre e, por fim, A3 cursava o quarto semestre.

A discussão de aspectos históricos e filosóficos por alunos da chamada área de ciências exatas pode encontrar barreiras na falta de estímulo que discentes com este perfil têm por questões do gênero. Nesse sentido, o forte apelo experimental da disciplina se constitui num forte recurso didático para romper essa dificuldade. Devido ao seu caráter prático, as aulas são realizadas em um dos laboratórios do Instituto de Física e, no início da maioria das aulas, são apresentados diversos experimentos óticos, acompanhados de considerações e questionamentos feitos pelo professor. Só então, quando diversas questões sobre os fenômenos são levantadas, se dá a exposição oral (com slides) inclusive a apresentação do desenvolvimento histórico das interpretações dos fenômenos apresentados.

Uma sequência didática é um conjunto de atividades planejadas, entre si articuladas, e ordenadas de modo que persiga objetivos de ensino e aprendizagem específicos. É o que nos diz Zabala (2000), para quem os elementos constitutivos do processo, seus objetivos e estrutura precisam ser conhecidos não só pelo professor, mas também pelo aluno. A proposta que segue

tem o objetivo de discutir ou problematizar aspectos da NdC intimamente relacionados com o erro científico a partir de dois referenciais epistemológicos. A hipótese é que um entendimento mais profundo destes aspectos do fazer científico seja uma consequência da análise histórica das contribuições dadas por um cientista de menor destaque para o desenvolvimento do átomo de Bohr. A opção por se analisar o episódio histórico - as contribuições dadas por Nicholson para a teoria de Bohr, especialmente no período 1911-1913 - através das lentes de dois referenciais epistemológicos está fundamentada no argumento que desenvolvemos ao longo deste trabalho, o de que um contato com conceitos da Filosofia da Ciência tende não só a auxiliar na compreensão de aspectos epistêmicos do fazer científico, como a qualificar a maneira como os alunos se referem a esses aspectos.

Antes do início efetivo da intervenção, foram realizadas entrevistas com os participantes, a fim de levantar suas concepções sobre Natureza da Ciência, notadamente aquelas associadas ao erro científico. O período de coleta de dados durou três semanas e a intervenção em sala de aula envolveu um total de três aulas de cerca de 110 minutos cada, que foram precedidas por um encontro preliminar - ocorrido nos 20 minutos finais da aula imediatamente anterior ao primeiro dia da efetiva intervenção – em que o pesquisador apresentou a proposta e entregou o material que seria utilizado durante a sequência. As aulas mesclaram atividade experimental, apresentações orais tanto do pesquisador quanto dos discentes e discussões sobre os temas estudados. Neste capítulo, detalharemos como esta proposta foi planejada, implementada e avaliada.

4.1 – Parâmetros norteadores da construção da sequência.

Em sua tese de doutorado, ao construir uma SD para discussão da NdC em sala de aula, Forato (2009) desenvolveu um conjunto de parâmetros para auxiliar a criação de sequências didáticas que utilizassem a História, Filosofia e Sociologia da Ciência (HFSC). Alguns desses parâmetros foram usados ou adaptados aqui para nortear a construção da nossa sequência na fase de planejamento:

Estabelecer os propósitos pedagógicos para os usos da HFSC no ensino

O objetivo desta sequência didática é problematizar concepções de NdC dos discentes associadas ao erro científico a partir da discussão histórica das contribuições de John William

Nicholson para o átomo de Bohr, tendo como pano de fundo tensões conceituais entre as epistemologias evolutiva e revolucionária. Ao se discutir conteúdos de física (fundamentos e aplicações da espectroscopia, o problema da instabilidade de modelos saturnianos descritos pela eletrodinâmica clássica, os modelos atômicos de Nicholson e Bohr etc.) estruturados historicamente, espera-se que se emerja um debate frutífero sobre questões epistemológicas do fazer científico, como a pluralidade de teorias compatíveis com um mesmo conjunto de dados experimentais, o caráter cooperativo do progresso científico, a relação do erro com o método científico e sua importância no processo construtivo do conhecimento científico, os limites de validade de modelos científicos, o caráter tentativo da investigação científica, a confiabilidade da ciência etc.

Explicitar a concepção de ciência adotada e os aspectos epistemológicos pretendidos.

Como discutido ao longo do segundo capítulo, a ciência é vista, neste trabalho como uma construção humana, e as contribuições para seu desenvolvimento são analisados sob dois referenciais epistemológicos diferentes, estabelecendo-se uma tensão entre uma visão evolutiva, baseada na teoria do conhecimento de Karl R. Popper e uma visão revolucionária, sustentada na teoria do conhecimento de Thomas Kuhn. Assim, ora destacaremos uma ciência que cresce de maneira evolutiva, onde um horizonte de expectativas (valores, problemas e conhecimento científico aceito em um dado período) “produz” variações (hipóteses ou conjecturas teóricas) que serão submetidas a um processo de seleção (escrutínio científico); e ora enfatizaremos uma ciência onde as teorias e modelos aceitos constituem um paradigma vigente, que pode ser substituído, durante um período de crise, por meio de uma revolução científica. Há que se considerar que tanto a epistemologia de Popper quanto a de Kuhn foram objeto de diversas críticas, sendo o mais contundente “ataque” ao racionalismo crítico popperiano a crítica de Imre Lakatos, para quem o “falseacionismo ingênuo” popperiano ilustra uma imagem científica muito distinta da realidade. Também a obra de Thomas Kuhn foi acusada de enfatizar aspectos sociais como proeminentes na escolha entre hipóteses rivais, o que conduziria a um relativismo e deslegitimação do conhecimento científico. Apesar de reconhecer as limitações dos dois modelos adotados, argumentamos que eles enfatizam aspectos epistemológicos do empreendimento científico, que são o cerne de nossos objetivos pedagógicos.

Selecionar o tema e os conteúdos históricos apropriados

O recorte histórico de nossa narrativa acompanha as principais contribuições para o desenvolvimento da área de pesquisa em espectroscopia ao longo do século XIX, dando ênfase à relação da equação de Balmer-Rydberg com as investigações em estrutura da matéria no início do século passado. Focalizamos o período de investigação entre o ano de 1911, quando o astrofísico inglês John William Nicholson começa a apresentar sua teoria atômica numa série de artigos publicados na *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, e finda em 1913, ano de publicação de *Sobre a Constituição de átomos e moléculas*.

Selecionar os aspectos a enfatizar e a omitir em cada conteúdo da história da ciência

Dois aspectos históricos centrais são de interesse deste trabalho e objeto de nosso material de apoio: (i) a evolução da espectroscopia ao longo século XIX, com ênfase para as contribuições de Wollaston, Fraunhofer e, principalmente, Johann Balmer e Johannes Rydberg, e (ii) as contribuições dadas pelo modelo atômico de Nicholson para a obra de Niels Bohr. Por fugir ao escopo temático deste trabalho, não serão discutidas outras linhas de pesquisa que, ao lado da espectroscopia, alavancaram a compreensão da estrutura do átomo (ver nota de rodapé 48); tampouco será dado destaque (apesar de serem mencionados) aos modelos de Jean Perrin, Hantaro Nagaoka, Joseph J. Thomson, Ernest Rutherford, entre outros, em que pese a indiscutível relevância destes trabalhos para edificação da Antiga Teoria Quântica.

Apresentar exemplos de teorias superadas em diferentes contextos culturais permite criticar ideias ingênuas sobre história e epistemologia da ciência, como a possível concepção de que a ciência atual pode resolver todos os problemas

O objeto central de nosso estudo é a hipótese dos proto-elementos de John W. Nicholson, uma teoria tornada obsoleta apenas alguns anos após a publicação de *Sobre a Constituição de Átomos e Moléculas*, em 1913, por Niels Bohr.

Definir o nível de profundidade e formulação discursiva dos conteúdos epistemológicos

Não há espaço nesta pesquisa para um estudo filosófico aprofundado. Por conseguinte, apenas os aspectos mais distintivos de cada epistemologia serão abordados; será feito, entretanto, um esforço para se realçar os pontos em que estas teorias do conhecimento divergem, a fim de que a compreensão dos pontos centrais dessas epistemologias seja alcançada por

contraste entre seus aspectos dissonantes. A simplificação das perspectivas evolucionária e de ruptura em um corpo teórico mais acessível ao estudante de exatas pouco habituado às singelas nuances de temas naturalmente complexos como os de Filosofia da Ciência, é uma estratégia importante para engajamento dos participantes nas discussões da pesquisa.

Ponderar sobre a quantidade e profundidade dos textos

Cada aula da sequência didática tem como base um texto previamente disponibilizado para os alunos, recortado para atender os objetivos de aprendizagem específicos daquele encontro. A forma como os conteúdos de Física e de HC presentes no texto serão abordados mesclará exposição do professor/aluno, atividade experimental ou debate coletivo, sempre seguidos de discussões orientadas para reflexão epistemológica. Cumpre lembrar que, em nossa proposta de intervenção, o entendimento dos conteúdos de física e de HC, apesar de serem o meio pelo qual se espera o acesso à compreensão dos elementos da NdC, não serão objetos de avaliação, que se restringirá à análise do entendimento de questões epistemológicas.

Questionar cada mensagem objetivada sobre a NdC em diferentes atividades didáticas e distintos episódios históricos.

Diversos aspectos da Natureza da Ciência podem ser discutidas a partir da narrativa escolhida, dentre os quais podemos destacar: a pluralidade metodológica da ciência, ilustrada pelo fato de que o desenvolvimento da teoria de Nicholson se deu pelo uso de métodos que, apesar de parecerem inapropriados hoje (como, por exemplo, a frequente asserção de que regularidades numéricas espelhariam regularidades na matéria), eram bem aceitos pela comunidade à época; o pluralismo teórico, evidenciado pela circunstância de que, apesar de equivocado, o modelo desenvolvido por Nicholson foi capaz não só de acomodar os dados disponíveis à época, como também de fazer previsões bem-sucedidas. O período de ascensão da Antiga Teoria Quântica é marcado por uma proliferação de modelos atômicos, cada um apresentando alguma limitação que seria superada pela hipótese posterior, o que denota a mutabilidade característica das teorias científicas. Além disso, maneira dinâmica como a comunidade científica se organizou para avaliar e selecionar esses modelos é uma imagem consistente de como os resultados produzidos pela ciência são críveis, sendo, portanto, uma boa oportunidade de se discutir a confiabilidade da ciência.

A definição desses parâmetros em um estágio prévio da pesquisa nos auxiliou a planejar as etapas da sequência, delimitar o episódio histórico, definir os aspectos de NdC a serem estudados e construir o material de apoio de modo que este convergisse para os objetivos da pesquisa. Na próxima secção, discutiremos os textos produzidos para utilização durante a aplicação da sequência.

4.2 – O material de apoio

Todo o conteúdo físico, histórico e epistemológico que integra a sequência didática está distribuído em quatro textos que foram disponibilizados para os participantes com antecedência e que foram a base para as discussões durante a intervenção. O primeiro, relativo à tensão entre as visões evolutiva e revolucionária do conhecimento científico, foi sintetizado a partir do que foi apresentado no primeiro capítulo. O segundo texto, sobre o desenvolvimento da espectroscopia no século XIX até à formulação da equação de Balmer-Rydberg, foi desenvolvido pelo autor exclusivamente para este fim didático. O terceiro texto, que trata do modelo de John William Nicholson, foi sintetizado a partir do estudo histórico apresentado no *Capítulo 3: Contribuições de John William Nicholson para o átomo de Bohr*. O quarto e último texto utilizado foi *O centenário do átomo de Bohr*, de João Pedro e Carlos A. L. Filgueiras (2013). Optou-se por usar um texto já existente e com foco em aspectos históricos devido ao fato de que o átomo de Bohr é um tema relativamente bem conhecido por estudantes do curso de física. Os textos I, II e III, desenvolvidos pelo autor, podem ser encontrados no Apêndice C.

Texto 1 - Revolução versus evolução

Antes da discussão efetiva do episódio histórico, se fez necessária a apresentação dos referenciais epistêmicos que viabilizaram uma análise mais bem fundamentada do papel do erro científico no progresso da ciência. Dessa maneira, foram apresentados os pontos essenciais das epistemologias evolutiva e de ruptura. Para fins didáticos, pôde-se tencionar as visões de Kuhn e Popper, apontando como a essa tensão epistêmica precedeu uma outra de natureza historiográfica e cujos protagonistas foram Alexandre Koyré, com sua visão descontinuísta da HC, e Pierre Duhem, com sua visão continuísta. Esperava-se, com esta abordagem inicial, que

os discentes pudessem empregar, nas discussões em sala de aula, tanto o vocabulário popperiano quanto o kuhniano para interpretar o episódio histórico estudado.

Texto 2 - Evolução da espectroscopia

O segundo texto tem o objetivo de situar historicamente o cenário científico onde os modelos atômicos de Nicholson e Bohr ganharam vida. Apesar da espectroscopia não ser a única área de pesquisa que contribuiu para o desenvolvimento das pesquisas em estrutura da matéria no início do século passado, sua relação com os dois modelos atômicos objetos deste estudo é bastante explícita⁴⁸. O texto discorre, de maneira sucinta, sobre o desenvolvimento da espectroscopia, desde a produção de um espectro visível por Newton, em 1666, até o desenvolvimento da equação de Balmer-Rydberg, no final do século XIX.

Texto 3 - O átomo de Nicholson

Apresentados os referenciais epistemológicos e tendo o episódio sido contextualizado historicamente, o erro científico é efetivamente introduzido nas discussões através da apresentação da teoria atômica de Nicholson. Como o sucesso relativo de Nicholson entre os anos de 1911 e 1912 pode ser explicado? De uma maneira mais geral, questionamos como a ciência pode progredir a partir de bases incorretas? A análise do “sucesso” de Nicholson pode ajudar a problematizar a visão empirista-indutivista segundo a qual seria papel do cientista a descoberta de uma lei que rege um fenômeno, como se aos dados experimentais se acomodassem, inequivocamente, uma única função. A esse respeito, Silveira (1996, p. 6) observa que “a suposição de que um conjunto de pontos em um plano é compatível com uma única curva é falsa”. Existem infinitas curvas que descrevem os resultados experimentais com o grau de aproximação que se desejar”. O modo como Nicholson conduziu sua pesquisa é, ainda, uma boa ilustração do caráter tentativo e falível da ciência. Sob uma perspectiva evolutiva, suas explicações para as linhas espectrais e para a tabela periódica podem ser lidas como uma variação que, apesar de não ter prosperado, contribuiu para o refinamento de uma versão mais apta para o período, traduzida no modelo de Bohr. Outra leitura possível é a de que a

⁴⁸ Segundo Martins (2013), uma narrativa mais fidedigna do período consideraria, além da espectroscopia terrestre e astronômica, o papel desempenhado por múltiplas áreas de pesquisa, tais como; estudos dos elementos químicos e da tabela periódica, propriedades químicas dos elementos e compostos, teoria eletromagnética e teorias dos elétrons, estudo sobre descargas elétricas em gases rarefeitos, pesquisas sobre raios X e radioatividade, mecânica celeste, estudo dos anéis de Saturno, teoria quântica etc.

inadequação do modelo de Nicholson está associada ao comprometimento do astrofísico com um paradigma em franco declínio. Ainda por esse prisma, as contribuições de Planck, Einstein e Bohr podem ser encaradas como ingredientes de uma revolução científica.

Texto 4 - O centenário da teoria de Bohr

O quarto e último texto que compõe essa pesquisa foi produzido por dois pesquisadores da UFMG e está disponível na internet. Como os aspectos físicos do átomo de Bohr são relativamente conhecidos do público participante da pesquisa, optou-se por um texto menos denso, com explícito enfoque histórico do desenvolvimento do modelo.

4.3 – A coleta de dados

Para os fins de nossa investigação, os dados coletados são a maneira como os participantes da pesquisa expressam suas concepções de NdC em três estágios distintos da pesquisa. Para cada estágio, uma técnica de coleta específica foi utilizada: primeiramente, antes da efetiva aplicação da intervenção, foram coletados os seus relatos através de uma entrevista semiestruturada, que serviu como um registro e sondagem do “estado inicial” de suas concepções epistemológicas, o que nos permitiu, com os métodos de análise apropriados, comparar com os relatos dos estágios subsequentes e, portanto, avaliar a efetividade da proposta. Na etapa intermediária, relativa ao período de efetiva implementação da sequência didática (leitura de textos, exposição oral com o uso de slides, experimentação e discussão) foram analisados os registros em áudio e vídeo, onde os discentes expressaram suas visões de NdC. Finalmente, um documento escrito na forma de um questionário foi aplicado a fim de registrar o “estado final” das visões epistemológicas dos participantes.

Comumente, pesquisas com o intuito de observar mudança conceitual em seus participantes fazem uso da metodologia pré-testes/pós-teste, onde as perguntas do primeiro estágio são idênticas às do último. Em nossa investigação, além de optar-se por instrumentos de coleta de dados diferentes (entrevistas, no estágio inicial, e questionário no estágio final), as perguntas sobre o mesmo tema foram formuladas de formas distintas em cada instrumento. O tempo total decorrido entre o momento da realização da primeira entrevista e o do recolhimento do questionário final, como citado, foi de três semanas.

Estágio inicial – roteiro de entrevista

Uma entrevista é uma conversa propositiva que é dirigida por uma pessoa para conseguir informação de outra. Em pesquisas qualitativas, entrevistas podem ser usadas de duas maneiras, como a estratégia dominante de coleta de dados ou em conjunção com outra técnica tais como observação e análise documental. É típico de entrevistas em pesquisa qualitativas que, mesmo quando um guia geral é empregado para direcionar o andamento da entrevista, seja oferecida ao entrevistado a possibilidade de alargar os limites estabelecidos pelos tópicos previamente determinados, de modo que possa contar sua história de maneira pessoal, com suas próprias palavras (BOGDAN, 1994). Dessa maneira, apesar de ter sido instituído um roteiro de entrevista (Apêndice A) com tópicos que precisariam ser abordados durante a conversa, evitou-se restringir as possibilidades de enunciação do entrevistado, não seguindo, necessariamente, os passos do roteiro, permitindo, eventualmente, “atalhos” de um tópico a outro, enfim, aproximando, dentro do possível, a entrevista de uma conversa informal. Todas as entrevistas foram registradas e armazenadas em um gravador de áudio, o que permitiu posterior transcrição. Ainda segundo Bogdan (1994), na fase inicial de um projeto é mais indicado o uso de entrevistas pouco estruturadas, mais fluidas, uma vez que, a essa altura da pesquisa, o propósito é ter um entendimento geral de um espectro de perspectivas sobre alguns tópicos. Após o trabalho de investigação, técnicas de coleta mais estruturadas devem ser utilizadas.

Estágio intermediário – registros áudio-visuais

Sabendo, previamente, qual característica dos indivíduos será observada, o pesquisador vai até o ambiente natural analisar o comportamento do grupo:

Tal técnica também fornece dados sobre os indivíduos, interações e cultura; normalmente, os pesquisadores primeiro decidem sobre o tipo de indivíduo a estudar e com que frequência se submetem a detalhes para terem acesso ao cenário. As questões da observação incluem, além da decisão de quem estudar, em quais situações, a frequência, o intervalo de tempo para as observações e o papel do pesquisador. Em resumo, a condução da observação dependerá dos conceitos e questões a serem estudadas, do local das observações e como acessá-lo, número de observações e do tipo de grupo estudado (PENA, 2015).

Ao longo da intervenção, particularmente durante a análise do episódio histórico, questões relativas à produção do conhecimento científico foram estimuladas pelo pesquisador, de modo que o debate pôde abrigar as manifestações verbais dos discentes quanto às suas visões

sobre o fazer científico. Todas as aulas foram registradas em vídeo e áudio, o que, juntamente com as observações feitas pelo pesquisador e com as anotações no diário de campo, permitiu compor um conjunto de dados relativo à este estágio da pesquisa. A totalidade dos dados reunidos neste estágio da pesquisa foi sistematizada segundo uma ferramenta de análise elaborada por Amantes e Borges (2011), os “mapas de episódio”. Segundo Pena (2015, p. 43), esta ferramenta compreende “indicações de trechos das gravações em que houve discussão sobre o conteúdo ou unidade de análise, relatos a respeito das atividades e da condução das aulas pelo professor”.

Estágio final – questionário

Segundo Pena (2015, p. 38), os documentos escritos constituem-se em um procedimento comumente utilizado para conseguir informações dos participantes e para fornecer anotações escritas e reflexões do que se está estudando e seus efeitos. As questões de pesquisa incluem a decisão de quais materiais usar e como extrair a essência da escrita. A fim de levantar as concepções dos discentes ao final da intervenção, foi pedido que respondessem um questionário aberto na parte final da última aula. Diante da ausência de instrumentos já validados que centralizassem suas atenções nas relações do erro científico com o progresso, optou-se por desenvolver um questionário próprio inspirado em outros trabalhos (Apêndice B).

Um dos mais utilizados instrumentos de coleta em trabalhos deste tipo é o VNOS-C (*Views of Nature of Science – Modelo C*), elaborado por Lederman et al (2002). Em que pese ser muito conhecido, diversos autores (RUDGE, 2009; PORRA et, al 2011; ANTUNES, 2009) discorrem sobre as dificuldades associadas a este questionário. A partir da aplicação do VNOS-C, Porra et al (2011) puderam levantar críticas, apontar fragilidades e, a partir desses dados, reelaborar um novo questionário, adaptado à realidade brasileira. As mudanças propostas pelas autoras consistiram, entre outros pontos, na supressão de perguntas duplicadas, na contextualização de algumas questões, na fusão de duas perguntas que tratam do mesmo tema etc. Após uma série de testes de versões preliminares aplicadas a alunos de diferentes licenciaturas da UFMT, as autoras chegaram a uma versão final que, por sua vez, foi aplicada a alunos do sétimo semestre do curso de licenciatura em Ciências Exatas da USP. Para estruturar nosso próprio questionário de pesquisa, num total de cinco questões, procedemos do seguinte modo: das seis questões adaptadas do VNOS-C pelas autoras acima citadas, suprimimos três e aproveitamos outras três para o nosso próprio questionário. O critério de escolha das questões foi a proximidade do tema com o erro científico. As questões que selecionamos do trabalho de

Porra e colaboradores (2011) versam sobre a mutabilidade de teorias científicas (Questão 2), sobre a pluralidade de métodos usados na ciência (Questão 3) e sobre a possibilidade de se chegar a explicações distintas a partir de um mesmo conjunto de dados (Questão 4). De modo a questionar mais diretamente a relação entre o erro e o conhecimento científico, além dessas três questões utilizamos também uma pergunta (Questão 1) do questionário desenvolvido por Cedran e colaboradores (2017), um trabalho que teve como objetivo “analisar as concepções de ciências de alunos do ensino médio através da compreensão da importância de se considerar o erro na construção do desenvolvimento científico”. Finalmente, elaboramos a última das cinco questões (Questão 5), atentos à reflexão que Allchin (2012) nos convida a fazer, sobre como uma compreensão epistêmica do erro científico pode ser uma ferramenta eficaz para que estudantes desenvolvam argumentos em defesa da confiabilidade do conhecimento científico.

4.4 – A sequência didática

A sequência didática construída consiste em um conjunto de três aulas de 110 minutos, precedidas de um encontro prévio de 20 minutos, ocorrido uma semana antes, no final da aula imediatamente anterior ao efetivo início da intervenção. Neste primeiro encontro, os discentes foram apresentados à proposta didática, assinaram o termo de consentimento livre e esclarecido e receberam os textos que seriam trabalhados nas aulas seguintes. Visando garantir a participação e mobilização dos participantes em torno dos temas da proposta, propôs-se, ainda neste encontro prévio, que eles ficassem responsáveis pela apresentação dos Textos II, III e IV, de conteúdo histórico, o que foi prontamente aceito.

No terceiro encontro, isto é, na segunda aula, o primeiro tema a ser abordado foi a evolução da espectroscopia no século XIX, discutida no Texto II (Apêndice C). Antes que o discente responsável pela apresentação do tema iniciasse sua explanação, foi efetuado um experimento demonstrativo que consistiu na observação de alguns espectros através de espectroscópios. O primeiro foi o espectro contínuo de uma lâmpada de tungstênio e, os três seguintes, dos gases mercúrio, hélio e, finalmente, hidrogênio. O objetivo desta atividade foi estimular o interesse dos discentes sobre o tema. Foi possível relacionar o espectro do sólido observado com aquele produzido por Newton em 1666, que foi discutido na primeira apresentação, questionar os discentes acerca da razão para o caráter discreto do espectro dos gases, antecipando tanto as explicações clássicas dadas pelos primeiros modelos atômicos do século XX quanto pela explicação quântica dada por Bohr em 1913. Finalmente, foi possível

situar a importância experimental do espectro do hidrogênio para a investigação da estrutura da matéria no final do século XIX, quando da “descoberta” da equação de Balmer.

Com exceção do Texto I, apresentado pelo pesquisador, as demais apresentações dos textos de apoio foram realizadas pelos discentes. Em todas as aulas, mantiveram-se, alunos e pesquisador, posicionados em semi-círculo, um formato que favorece interações discursivas entre os participantes. Ao final da última apresentação, ocorrida na terceira e última aula, foi possível estabelecer uma discussão sobre os aspectos de NdC de nosso interesse a partir da análise histórica intermediada pelos referenciais epistemológicos. Uma síntese das atividades realizadas na sequência didática pode ser encontrada no Quadro 4.

Quadro 4 - Síntese da sequência didática

Aulas	Duração	Temas	Atividades	Objetivo	Materiais
Encontro prévio	20 min	1 -Apresentação da SD	- Apresentação da sequência didática; - Entrega do termo de consentimento livre e esclarecido; - Entrega do material de apoio (textos I, II, III e IV)	1 - Tornar os sujeitos da pesquisa cientes de todas as etapas da SD, bem como dos objetivos de aprendizagem a elas associados.	Projektor; Notebook; Termo de consentimento;
Primeira aula	110 min	1 -Epistemologia Evolutiva <i>versus</i> epistemologia de ruptura	1 – Discutir o uso da História e da Filosofia da Ciência no ensino de Ciências; 2 – Apresentar, de maneira sucinta, as epistemologias de Thomas Kuhn e de Karl Popper, que servirão de instrumento de análise do episódio histórico a ser estudados nos próximos dois encontros.	1 - Discutir os conceitos centrais e as diferenças entre um referencial epistemológico evolutivo e um revolucionário.	Projektor; Notebook; Texto I.
Segunda aula	110 min	1 – Espectroscopia;	1 – Demonstração experimental dos espectros de uma lâmpada de tungstênio e dos gases hidrogênio,	1 - Associar os conceitos e os dados experimentais da espectroscopia do final do século XIX e início do século	Espectroscópio; Lâmpadas de gás de H, Hg e He;

		2 -Modelo atômico de John William Nicholson	mercúrio e hélio, paralela a considerações e questões do pesquisador; 2 – Apresentação sobre o desenvolvimento da espectroscopia ao longo do século XIX; 3 – Apresentação do modelo atômico de Nicholson e sua relação com o trabalho de Bohr.	XX aos problemas enfrentados, àquela altura, pelas investigações em estrutura da matéria; 2 – Discutir o modelo atômico de Nicholson, sua relação com a espectroscopia, sua recepção pela comunidade científica e suas relações com o modelo de Bohr;	Projektor; Notebook; Textos II e III.
Terceira aula	110 min	1 - Modelo atômico de Bohr; 2 – O papel epistêmico do erro científico (debate)	1 – Apresentação do modelo atômico de Bohr; 2 – Será entregue o questionário final e se discutirá com os alunos sobre os temas tratados ao longo da intervenção	1 – Discutir o átomo de Bohr, enfatizando a aceitação do modelo em detrimento da perda de relevância da teoria de Nicholson; 2 – Usando o episódio histórico estudado como pano de fundo, debater aspectos epistemológicos do fazer científico, e relaciona-los com os dois referenciais epistêmicos adotados.	Projektor; Notebook; Texto IV; Questionário sobre erro científico.

Fonte: O autor.

4.5 – Parâmetros para análise de dados

Seguindo a proposta de aprendizagem progressiva de Allchin (2012), discutida no Capítulo 2, o termo *papel epistêmico do erro científico* se referirá aqui a um conjunto de cinco características do trabalho científico que se relacionam com a circunstância de que a ciência comete erros. A compreensão destes aspectos implica em uma problematização de visões consideradas inadequadas (GIL-PEREZ, 2001) da Natureza da Ciência. Espera-se, portanto, que ao final da proposta os discentes evidenciem compreensão em algum nível do papel epistêmico do erro científico fazendo uso de um dos dois referenciais epistemológicos trabalhados, o evolutivo ou o revolucionário.

Diante dos cenários possíveis de efetividade desta proposta, determinou-se as seguintes categorias *a priori*, relativas às respostas dos alunos: **visão evolutiva**, se o discente expressar concepção adequada de aspecto da ciência fazendo uso de termos ou expressões características de epistemologias evolutivas; **visão revolucionária**, se o discente expressar concepção adequada fazendo uso de termos ou expressões características de epistemologias de ruptura; **visão mista**, caso o discente expresse concepção adequada fazendo uso de termos ou expressões característicos das duas epistemologias; **visão adequada sem referência**, caso o discente apresente compreensão do papel epistêmico do erro científico sem utilizar os referenciais epistemológicos estudados; e finalmente, **visão não-problematizada**, caso o discente demonstre uma visão considerada inadequada.

Como já dissemos, o que aqui chamamos de papel epistêmico do erro científico nada mais é que o papel desempenhado no progresso da ciência pelos equívocos e, portanto, trata-se de um tema que se encontrará presente em todos os aspectos da NdC aqui estudados. A compreensão desta circunstância epistemológica, a de que teorias equivocadas contribuem para o refinamento ou progresso do saber científico, está condicionada à compreensão: da relação entre erro e método científico (tema 1), de como aspectos de um fenômeno físico podem ser satisfatoriamente descritos por um modelo equivocado ou por diferentes modelos (tema 2), de como a confiabilidade do conhecimento científico está edificada na maneira que esta atividade identifica e remedia seus erros (tema 3), e de como o conhecimento científico é provisório e mutável (tema 4).

A divisão de temas em quatro tópicos atendeu a uma necessidade metodológica de sistematizar e apresentar de maneira clara os resultados desta pesquisa. Na verdade, o estudo em questão abarca muitos outros aspectos da NdC encontrados na literatura. Por exemplo, ao se falar da pluralidade metodológica da ciência, necessariamente se está discutindo como

métodos são produzidos para enfrentar situações específicas, contingentes, portanto, por tentativa e erro. Por outro lado, é impossível reconhecer que a confiança da ciência advém de um processo de refino de hipóteses através de testes que podem identificar fontes de erro sem também reconhecer que estes procedimentos de testagem devem ser conduzidos por uma organizada comunidade de cientistas, desatacando-se, portanto, a coletividade da ciência. Quanto ao tema 4 (mutabilidade), este foi originalmente concebido como um objetivo de aprendizagem da sequência, mas, tão logo iniciou-se a coleta de dados no estágio inicial, percebeu-se que este aspecto estava se superpondo aos demais, razão pela qual optou-se por conduzir a análise de dados focando em apenas três dos quatro temas originais. Portanto, apesar dos discentes terem respondido a cinco questões relativas a quatro aspectos da NdC⁴⁹, apenas as respostas para três destes aspectos foram consideradas em nossa análise. Em outras palavras, os temas se interconectam e é possível que em um tópico temático sejam abordados mais de um aspecto do fazer científico.

Um dos resultados esperados desta intervenção é que os discentes tenham caracterizado o trabalho científico valendo-se de um dos referenciais epistemológicos estudados. As respostas serão consideradas adequadas se estiverem de acordo com a visão de ciência adotada neste trabalho, que pode ser encontrada na primeira seção do Capítulo 2. Ali, também demos exemplos de como essas concepções podem ser expressas pelos dois referenciais epistemológicos.

4.6– Resultados e discussões

Nesta seção apresentaremos alguns dos dados registrados na pesquisa - aqueles que melhor ilustram os resultados alcançados por este trabalho - e a análise dos mesmos. Optamos por dividir a análise em três partes: denominamos como *estágio inicial* a etapa em que as concepções dos discentes foram expressas durante a entrevista semiestruturada, realizada antes do início efetivo da intervenção didática; o *estágio intermediário* abarca as manifestações orais dos alunos sobre o tema durante todo o período da intervenção; e o *estágio final* refere-se as respostas dadas ao questionário final.

⁴⁹ A Questão 1 tem como objetivo nos permitir avaliar, de uma maneira mais genérica, a compreensão dos discentes acerca do papel epistêmico do erro científico, fazendo uso dos parâmetros de análise apresentados na seção 2.2, inspirados nos níveis de aprendizagem progressiva propostos por Douglas Allchin.

A investigação ocorreu nas três últimas semanas de novembro de 2019 em uma turma de física de uma universidade baiana e envolveu apresentação com slides, experimentação e debate. Como trata-se de uma disciplina focada no uso de experimentos, as aulas ocorreram em um dos laboratórios do Instituto de Física daquela universidade. A turma era constituída de quatro alunos, três dos quais frequentaram efetivamente que, como previsto no planejamento da sequência, participaram ativamente da proposta. A condução da sequência ficou a cargo do autor deste trabalho, que expôs o conteúdo, experimentação e organizou o debate. Como forma de mobilizar os discentes a participarem ativamente da proposta, foi sugerido que cada um ficasse responsável por apresentar um tópico do estudo. Dos quatro textos estudados, apenas o referente à primeira aula “*O Progresso da Ciência: Revolução ou evoluções*”, foi apresentado pelo pesquisador. Os textos relativos aos dois encontros seguintes, “*Evolução da Espectroscopia*”, “*A Teoria Atômica de Nicholson*” e “*O Centenário do Átomo de Bohr*”, foram apresentados cada um por um participante da pesquisa.

4.6.1 – Estágio inicial

As concepções iniciais dos discentes sobre os aspectos da NdC de interesse para o nosso trabalho (o pluralismo do método científico, o pluralismo teórico e a confiabilidade científica) foram levantadas a partir de entrevistas semiestruturadas realizadas cerca de uma semana antes da intervenção. Os relatos foram gravados em áudio e, posteriormente, transcritos e analisados. O roteiro de entrevista (Apêndice A) foi desenvolvido de maneira que, quando possível, os temas em questão pudessem ser abordados em momentos distintos durante a entrevista. A seguir, apresentaremos e analisaremos os dados coletados nesta etapa da pesquisa.

Pluralismo metodológico

Para o tema pluralismo metodológico, consideramos como adequadas respostas que, em conformidade com a visão de ciência adotada, apresentaram uma conjunção de duas ideias: a primeira diz respeito à compreensão de que a ciência não utiliza um método rígido e imutável no tempo e nem nas diversas disciplinas científicas em um mesmo período; a segunda refere-se ao entendimento de que a ciência segue um conjunto de procedimentos ordenados logicamente, que envolvem observação, experimentação, dedução, indução etc. Em outras palavras, consideramos como uma concepção adequada de método a asserção de que,

conquanto não haja um método científico universal, único a todas as atividades científicas, é indiscutível que a ciência conduz suas investigações de maneira metodologicamente ordenada.

Uma das perguntas da entrevista visava identificar como os alunos distinguiriam ciência de religião, o que poderia esclarecer suas visões gerais sobre o que é o conhecimento científico. É comum que discentes identifiquem a ciência como uma atividade em que se utiliza o método científico, razão pela qual esta pergunta serviu para acessar as concepções dos alunos sobre o tema. Para A1, por exemplo, o método científico seria um critério demarcador capaz de separar essas duas atividades. Cabe salientar que a palavra método não foi utilizada pelo entrevistador, aparecendo espontaneamente na resposta do entrevistado.

[...] ciência é algo que segue a rigor esse método científico, que é algo que vem da Filosofia das Ciências, então, se algo não consegue seguir esse método científico, então pra mim não é ciência, é algo que tenta se aproximar do que seria a ciência em si. (A1)

Ao ser indagado sobre como caracterizaria o aludido método científico, o discente argumentou:

[...] essa maneira que a gente tenta buscar compreender esses fenômenos de maneiras minuciosas através de sucessão de experimentos, sucessão de entendimentos mesmo do que... da forma que aquele fenômeno se dá e analisando aquilo, elaborando hipóteses, testando essas hipóteses, elaborando teorias, testando essas teorias pra ver se elas se encaixam com o fenômeno, eu acho que isso não seria a... pode não ser a única, mas por enquanto é a melhor maneira que a gente tem de conseguir associar uma determinada explicação ao fenômeno em si. (A1)

Ao considerar que “*seguir esse método científico de maneira rigorosa*” é um critério de demarcação entre o que é científico e o que não é, o discente endossa as visões que advogam a existência de um conjunto de procedimentos que tipificam de maneira inequívoca o fazer científico. Esses procedimentos são identificados, na fala do aluno, com alguns aspectos que poderíamos chamar de internalistas, caracterizados como “*sucessão de experimentos, sucessão de entendimentos (...), elaborando hipóteses, testando essas hipóteses, elaborando teorias, testando essas teorias pra ver se elas se encaixam com o fenômeno*”. Segundo Henrique (2011), uma ideia bastante difundida tanto entre cientistas quanto na população em geral é a da existência de um conjunto de procedimentos que caracterizariam o trabalho científico. Segundo essa visão, comumente tipificada como empírico-indutivista, o método científico pode ser visto como uma forma de justificar a autoridade e o valor da ciência, assim como distinguir a ciência

de outras formas de conhecimento. Não há menções ao caráter tentativo ou mutável deste método. Diante disso, consideraremos a concepção de A1 sobre método científico no estágio inicial como uma **visão não-problematizada**⁵⁰. Como esperado, não há neste estágio incipiente elementos de análise suficientes para categorizar o pesquisado em um dos referenciais epistemológicos do estudo.

Similarmente, A2 argumentou que a ciência poderia ser demarcada de outras atividades através dos métodos que empregava para entender o mundo natural:

A ciência está voltada pro natural. Então busca, através de métodos que vão ser sistematizados, estigmatizados como científicos, né, métodos altamente naturais, racionalistas, empiristas... e a partir desses métodos se constroem conhecimentos para entender a realidade. Então nesse sentido. A minha questão é que a Filosofia tem os seus métodos, a religião tem os seus métodos, mas eu acho que é o método dito científico com relação à ciência, [é] mais naturalista. (A2)

Há, entretanto, nuances de sua visão que a afastam da ideia de método defendida por A1. Uma melhor compreensão de sua ideia de método pôde ser identificada quando lhe foi pedido que explicasse mais detalhadamente o que estava considerando como método científico:

[...] hoje eu entendo que método científico não é uma receita pronta, não é algo estanque, algo já definido, mas o que existe na verdade são procedimentos científicos. Então não existe uma ordem de levantamento de hipóteses, levantamento de dados, às vezes os dados chegam e você começa a teorizar a respeito daquilo, às vezes você tem uma teoria primeiro e os procedimentos... então, a verificação por meio de experimentos, a construção de uma teoria logicamente coerente, o uso nas ciências exatas, o uso da matemática como linguagem, então eu não sei exatamente como exemplificar os procedimentos, mas eu falo [que o] método científico consiste no uso dos procedimentos científicos, no uso de um arcabouço teórico de... da experimentação, de repetições, de verificar esses experimentos em outras condições ou condições parecidas em outros lugares para ver se não havia antes ali alguma interferência do ambiente, então tem tudo isso, esses procedimentos científicos ao invés de falar de um método fechado, uma caixa preta (A2)

É notável que o discente problematize a rigidez da visão tradicional de método, apontando para o fato de que, na prática científica, não é possível seguir uma ordem pré-estabelecida de etapas. Além disso, quando indagado sobre o que seria experimento, mais uma

⁵⁰ É importante notar que, em sua fala, o discente reconhece que o método científico por ele descrito “*pode não ser a única forma*” de investigar fenômenos, o que revela um indício de problematização de uma visão empírico-indutivista que deveria ser melhor explorada pelo pesquisador, por exemplo, indagando-lhe que outras formas seriam possíveis. Neste caso, possivelmente os dados indicariam uma categorização distinta da fala do discente.

vez pôde se distanciar da chamada visão empírico-indutivista, uma vez que colocou em xeque a ideia da anterioridade da experimentação em relação à teoria:

Acho que experimento depende de uma teoria prévia, ninguém faz um experimento sem ter pensado em alguma questão que ele vai colocar em xeque a partir do experimento (A2).

Considerando a problematização que faz do que os defensores da visão consensual consideram concepções inadequadas, e atentos ao fato de que - previsivelmente – não há um uso explícito dos referenciais epistêmicos estudados, optamos por categorizar as concepções iniciais de método do discente A2 como **adequada sem referência**.

Afastando-se das posturas assumidas pelos outros dois alunos, A3 não buscou um critério demarcador para distinguir ciência de religião. Pelo contrário, buscou aproximá-las, sugerindo que a ciência também depende de algum nível de crença por parte dos cientistas para seu funcionamento. Critica, portanto, uma visão de uma ciência racionalista e neutra:

Então, pelos meus conhecimentos de Conceitos B⁵¹, existe um problema: a gente, pelo menos pelo que aprendi, a gente coloca fé nos resultados, por exemplo, o professor de Conceitos B chamava de “Igreja Newtoniana dos Últimos Dias”, que a gente acreditava no, a gente acredita no modelo que está sendo feito, mas a gente não tem como ter certeza de que aquele modelo é como a natureza se reproduz, como a natureza... [como] ela se expressa. É o que a gente descobre dela. (...) só que no caso a gente [i.e, a ciência] se baseia em dados experimentais, em resultados. (A3)

O discente parece reconhecer os limites da ciência ao afirmar que não podemos “ter certeza” da correspondência do modelo à realidade física. Esse aspecto do conhecimento científico, a incapacidade de se alcançar um grau de certeza, é abordado tanto por Kuhn quanto por Popper. Como vimos, para o primeiro, um paradigma não explica nem mais nem melhor os fenômenos descritos pelo anterior, já que são incomensuráveis entre si. Para Popper, por outro lado, uma teoria pode atingir um nível de corroboração que lhe garante confiabilidade meramente temporária, até que novos dados estejam disponíveis. A correspondência, em nível ontológico, entre teoria e mundo físico é, portanto, negada tanto por uma visão evolucionária quanto revolucionária. Além disso, o discente problematizou a ideia de que a ciência segue um método único:

Não acho que existe um só, mas existe o que a gente mais usa na academia e que não é aceito, se você geralmente sai muito desse padrão a sua teoria tende

⁵¹ Aqui, e em outros momentos, se observará que as disciplinas “Conceitos de Física”, com sua abordagem historicamente estruturada, contribuiu para que os discentes problematizassem alguns aspectos da ciência.

a ser descartada ou, tipo, ridicularizada, então... mas você tem o método científico que a gente usa ainda muito que é aquele método de Descartes e tal, mas existem outros métodos científicos. (A3)

Se, por um lado, a ênfase dada por A3 a um aspecto externo como a crença pessoal dos cientistas poderia sugerir uma visão ingenuamente relativista, o mesmo não deixa de destacar que a ciência se “baseia em dados experimentais, resultados”. Há, portanto, um reconhecimento de que a ciência tem uma dimensão racional - traduzida, por exemplo, no uso de procedimentos experimentais – sem que se deixe de considerar a influência da dimensão humana, e nesse caso o traço destacado pelo discente foi a crença pessoal. Trata-se, portanto, de uma visão que podemos considerar como **adequada sem referência**, dada a ausência de elementos linguístico das epistemologias evolucionária ou revolucionária.

Pluralismo teórico

Quanto ao tema pluralismo teórico, foram consideradas adequadas resposta que, além de reconhecerem que mais de uma teoria é compatível com o mesmo conjunto de dados, reconheciam que a divergência entre interpretações poderia ser devido à influência da criatividade, da imaginação e do contexto sociocultural em que os cientistas estão imersos. Para este tema, foram usadas duas perguntas. Primeiramente, os discentes foram explicitamente indagados se achavam possível que um mesmo conjunto de dados pudesse ser coerentemente acomodados por mais de uma teoria. A respeito disso, A1 afirmou que:

Sim. Eu acho que, dependendo da forma como você analisa dados experimentais, você pode fazer implicações diferentes e isso tem a ver com a forma como você enxerga aquele fenômeno, sei lá, do contexto em que você está inserido, diversos outros fatores. Então você consegue enxergar aquilo ali de uma maneira diferente, mas a partir dessas coisas que você observou, dessa interpretação que você deu, se você não consegue adequar isso ao método científico, daí isso já está invalidando seu processo de... dessa criação, dessa hipótese, até ela atingir o status de teoria, no caso. (A1)

A segunda questão questionou quais seriam os critérios levados em conta pela comunidade científica para escolha entre hipóteses rivais. A1 listou aspectos internos, como replicabilidade, falseabilidade e simplicidade como elementos a serem considerados:

Eu vejo que pra uma teoria ser bem estabelecida dentro da comunidade tem essa questão primeiro da replicabilidade, (...)falseabilidade, então se você consegue provar que aquela teoria está errada e você tenta provar isso e

aquilo não se confirma isso dá mais crédito pra aquela teoria e se você pode replicar isso pra diferentes pessoas, também em diferentes contextos históricos, diferentes contextos sociais e se aquelas predições que aquela teoria fez inicialmente se elas sempre se confirmam, isso são critérios de credibilidade. Agora se, por exemplo, uma teoria não é falseável, se as predições que ela faz são predições erradas ou não próximas, aí sim, eu acho que essa teoria deva ser descartada, que no caso ela é errada. (...) Navalha de Occam! Aquela que consegue explicar de forma mais simples aquele fenômeno, de maneira mais objetiva e precisa, eu acho que deve ser a mais válida no caso. Se as duas teorias, no caso, conseguem explicar, aí seria isso, aquela que consegue explicar de maneira mais simples sem dar muitos desvios, sem dar muitas correções, no caso, colocando parâmetros de especificidade, essa seria a teoria a ser descartada em detrimento da outra. (A1).

A resposta positiva dada à primeira indagação sugere um reconhecimento do pluralismo teórico como uma característica do trabalho científico. O discente faz menção ao contexto em que o cientista está inserido como uma causa dessas interpretações dissonantes. Ao final da resposta, relata a necessidade de que estas interpretações estejam validadas por procedimentos experimentais. Isto é, apresenta uma concepção adequada da ciência sem fazer uso explícito dos referenciais epistêmicos. Na segunda resposta, nota-se que A1 tem alguma familiaridade com o vocabulário popperiano. Entretanto, o discente revela a crença de que um critério objetivo como o da falseabilidade seja suficiente para descartar teorias científicas de maneira mecânica, o que pode ser considerado um falseacionismo ingênuo, concepção distante de como hipóteses rivais são efetivamente tratadas na prática científica. Na visão evolucionária que aqui adotamos, a comunidade científica integra o meio ambiente seletor e, por conseguinte, suas crenças e valores – que tem necessariamente uma origem externa, política, social e cultural – são tão essenciais para escolha entre hipóteses como os são os procedimentos internos aludidos por A1. Essa é a razão para, a despeito de sua aparente aproximação com ideias da epistemologia de Popper, mantermos a sua categorização como **adequada sem referência** para este aspecto da Natureza da Ciência, já que situa a ciência como uma atividade onde fatores externos, de natureza subjetiva influenciam o trabalho do cientista, mas que, ao mesmo tempo, tem uma dimensão experimental igualmente essencial.

Em relação a A2, o reconhecimento da pluralidade de teorias explicativas de um mesmo conjunto de evidências foi expresso da seguinte forma:

A interpretação pode variar; a depender de qual premissa básica a pessoa adquire, ela toma uma premissa e vai por um caminho com aqueles mesmos dados e a outra toma outra premissa. Pode sim dar uma outra direção. (A2)

A dificuldade de se interpretar sua resposta reside na vagueza do termo “premissa básica

assumida”. Com efeito, parece-nos igualmente legítimo entender a premissa adotada por um cientista tanto como um tipo de condicionamento sociocultural ou político que determina quais são as perguntas e respostas de interesse para sua pesquisa, quanto como decisões técnicas, experimentais, que acabam por conduzi-lo à formulação de uma hipótese distinta da de alguém que optasse por outras “premissas experimentais”. Nesse último caso, o mero reconhecimento por parte do aluno de que cientistas podem chegar a conclusões diferentes não pode ser suficiente para considerarmos a visão como adequada sem referência, já que a causa da dissonância interpretativa estaria sendo atribuída exclusivamente a questões técnicas – por exemplo, o correto manejo dos instrumentos. Um olhar mais atento do pesquisador durante a entrevista teria sido suficiente para driblar a equivocidade da resposta; neste caso, bastaria que fosse pedido que o discente explicasse melhor quais seriam tais premissas. Seja como for, pudemos ter uma ideia mais completa do que o aluno pensa sobre o tema com a análise de sua resposta à questão sobre os critérios para escolha entre hipóteses rivais:

Acho que os testes de fogo são outras questões que a teoria pode, ela mesma, provocar. Como a gente estudando viu, a respeito do... não lembro agora o nome... difração! Por exemplo, “ah! se a teoria de Fresnel estiver certa então vai ter que ter um ponto de luz no centro”, então a teoria propôs aquilo e o experimento vai lá e checa se aquela teoria tá coerente ou não, então eu acho que a própria teoria vai propondo coisas para serem testadas e verificar se ela está sendo coerente ou não em descrever a realidade. Outros fenômenos podem ser descobertos e aí vai se checar o que aquela teoria vai... se ela prevê já alguma coisa daquilo, se ela não previu, como ela poderia se complementar para abarcar aquele outro fenômeno. Acho que nesse sentido. (A2)

A ideia de que algum tipo de teste experimental seja uma etapa necessária e suficiente para validação de teorias ou hipóteses pode ser identificada como uma visão verificacionista, uma compreensão do fazer científico criticada tanto por Kuhn quanto por Popper. O aluno parece ignorar a circunstância de que hipóteses erradas podem conduzir a previsões bem-sucedidas, razão pela qual um critério de escolha exclusivamente analítico é incompatível com a atividade científica. Diante da ênfase dada pelo discente ao papel da experimentação e do não reconhecimento da dimensão social da ciência, optamos por categorizar a sua concepção sobre pluralismo teórico como **não problematizada**.

Como os demais participantes, A3 reconheceu o pluralismo teórico como um traço do fazer científico. Se, por um lado, sua resposta não faz menção ao papel da criatividade, da imaginação e do contexto social como componentes subjetivos inerentes ao trabalho científico, por outro, revela a importância da dimensão humana nos resultados da ciência, ressaltando

como experiências individuais – que não julgamos excessivo interpretar como trajetórias pessoais – implicam em maneiras diferentes de se abordar um mesmo problema. Indagado, portanto, se achava possível que mais de uma teoria explicasse corretamente o mesmo conjunto de dados, afirmou:

Pode, porque quem faz a interpretação, quem dá os dados é o fenômeno mas quem faz a interpretação é o cientista; então cientistas diferentes podem interpretar de acordo com o fenômeno, com pensamentos diferentes [...] Eu não me lembro de nenhum caso agora, mas pode. Tipo, pra quem é da área de licenciatura é muito fácil falar isso porque a gente se baseia que pessoas com experiências diferentes desenvolvem ideias diferentes mesmo que elas possam se sobrepor, ou serem tipo, responderem às perguntas. (A3)

Quando questionado sobre quais parâmetros seriam avaliados pela comunidade científica para escolher uma teoria em detrimento da outra, o discente afirmou o que segue:

É, eu acho que o nome e a política entram muito na Física, na ciência porque as pessoas gostam de diferenciar muito, acham que a ciência só pode ser o método científico. Uma teoria pode ser pior do que a outra e ainda assim ganhar nome por causa de política ou influência do cientista que colocou ela em evidência. (A3)

No início dessa subsecção, argumentamos que as respostas dadas por A1 às questões referentes ao pluralismo teórico o aproximavam de uma visão que Lakatos classificou como falseacionismo ingênuo, em linhas gerais, a ideia de que a subjetividade, a dimensão humana e social do trabalho científico podem ser suprimidas a partir de processos racionais como “testes severos” ou “testes crucias”, da falseabilidade, da replicabilidade dos fenômenos etc. A visão oposta a essa, igualmente inadequada segundo nosso referencial, seria uma exacerbação do papel da subjetividade, das negociações de origem social apontadas por Thomas Kuhn como centrais na aceitação de um paradigma. De um lado, há um relativismo radical e, do outro, um racionalismo ingênuo, oriundos de uma interpretação equivocada das epistemologias de, respectivamente, Kuhn e Popper. Na resposta de A3, chama a atenção a ausência, por exemplo, de menções ao papel da experimentação, da simplicidade de uma hipótese e da coerência interna de teorias, como critérios a serem considerados pela comunidade científica. Diante do exposto, por enfatizar apenas aspecto subjetivos, como a “*política ou influência [provavelmente, autoridade intelectual] do cientista*” optamos por categorizar as concepções de A3 sobre pluralismo teórico como **não problematizada**.

Confiabilidade da ciência

Finalmente, buscou-se compreender de que maneira os discentes entendem e justificam a confiabilidade atribuída aos enunciados científicos. Como a resposta que consideramos adequada envolve o reconhecimento de que a comunidade científica desempenha um papel essencial ao escrutinar os produtos da ciência, primeiramente foi perguntado qual seria o papel da intercomunicação entre cientistas para o progresso da ciência. Em um segundo momento, foi perguntado como os discentes defenderiam a confiabilidade da ciência diante de tantos erros testemunhados pela HC. As respostas de A1 para essas duas perguntas foram, respectivamente:

Fundamental porque se uma teoria científica tem que ser necessariamente falseada e replicada, se não houver essa comunicação, como que você vai verificar que a sua teoria é aplicável em diferentes contextos? Você tem que ter outras mentes pensando sobre a mesma coisa pra ver se estas interpretações, se essas coletas de dados, por exemplo, se elas convergem, entende? Então eu acho de extrema necessidade. (A1)

Ai eu levo em consideração, por exemplo, as outras formas, as outras visões de explicar o universo, como por exemplo religião. Dentro de uma religião você adequa os fenômenos as suas considerações, você adequa os fenômenos às suas visões de mundo. Já dentro das ciências, como é previsto pelo próprio método científico, é o contrário; a gente tem que adequar a nossa visão de mundo aos fenômenos que estão acontecendo. Então, dentro do método científico já está previsto esse próprio processo de autocorreção, então se aquilo que você enxerga do mundo não consegue realmente descrever o fenômeno que está ali acontecendo, ok, então a gente tem que fazer uma revisão e pôr um processo de autocorreção no que a gente está fazendo. Ao contrário de outras formas de se ver o mundo, então esse processo de autocorreção não acontece. É mais fácil você atribuir exceções para aquele fenômeno, explicações mirabolantes para aquele fenômeno em detrimento de você falar assim: “não eu estou errado, eu tenho que analisar de uma maneira diferente”. (A1)

A primeira resposta de A1 toca no ponto que julgamos essencial, a saber, o reconhecimento da dimensão coletiva e social do trabalho científico, a compreensão de que o progresso da ciência está condicionado à avaliação de conjecturas em ambientes científicos distintos do de sua criação. Ao argumentar a favor da confiabilidade de ciência, entretanto, o discente ignora esse aspecto comunitário do empreendimento científico e recorre a um argumento empirista para defender a objetividade da ciência; o fato de que cientistas adequam a sua “visão de mundo” aos dados experimentais seria suficiente para confiarmos em seus resultados. Douglas Allchin (2012) atenta para o fato de que é comum a caracterização da ciência como autocorretiva sem que haja, entretanto, uma compreensão da dimensão social deste aspecto da empresa científica. De fato, a ciência corrige os seus erros, mas esse processo

está longe de depender unicamente da existência de rígidos procedimentos de replicação ou testagem de hipóteses:

Visões contrastantes ajudam a destacar déficits nas evidências ou a expor pontos cegos conceituais. Perspectivas alternativas - de diferentes disciplinas, biografias, culturas, classes sociais, gêneros etc. - aumentam a consciência coletiva. Por fim, testando enunciados científicos contra a evidência por si só não é suficiente. A eliminação de erros frequentemente envolve críticas e interação. Em termos de confiabilidade das reivindicações, então, a dimensão social da ciência é tão importante quanto a experimental (Harding, 1991; Longino, 1990; Solomon, 2001). Isso é uma perspectiva importante para os educadores que dispensaria a sociologia porque a veem como uma fonte de erro, e não como um mecanismo fundamental para remediá-lo (ALLCHIN 2004b; FINKEL, 1992 apud ALLCHIN, 2012).

Assim, em conformidade com os parâmetros que estabelecemos para nossa análise, essa visão alinhada ao indutivismo é categorizada como **não problematizada**. Também A2 conferiu uma boa descrição da importância de uma rede de interação de pesquisas científicas para o progresso da ciência:

Eu acho que é muito grande [o papel da intercomunicação] porque sozinho a pessoa não consegue ir muito tempo longe. Então quando há uma rede de diversas pessoas trabalhando em temas comuns, e se você tem uma pesquisa numa área e você começa a receber informações de que outros grupos, outras pessoas descobriram tais coisas, perceberam que isso dá certo, que isso dá errado, então você começa se alimentando daquilo, é vai transformando a forma como você pensa sobre aquele objeto de estudo e vai te direcionando a novos experimentos, já que você não necessariamente precisa repetir o que foi feito, ou repetir com a abordagem diferente a fim de achar uma coisa diferente, então acredito que é um meio de que a ciência progride assim mais rapidamente. (A2)

Apesar de ter demonstrado compreender a necessidade de perspectivas distintas para o refinamento ou descarte de uma hipótese científica, o discente não construiu um argumento em defesa da confiabilidade da ciência que envolvesse essa dimensão do trabalho científico. Ao invés disso, recorreu a um argumento que podemos chamar de estatístico: os erros cometidos pela ciência são estatisticamente insignificantes em comparação com a taxa de acertos.

Essa é uma boa pergunta. Porque o que existe muito hoje é o cientificismo, que é [a concepção da] ciência como detentora da verdade ou a única forma de se chegar a uma verdade. E, de fato, a ciência comete erros, a ciência trabalha com muitas aproximações e dessas aproximações existem áreas escuras, como por exemplo, as vacinas; A gente estava conversando isso com o professor, e realmente, as vacinas, elas são confiáveis porque existe uma faixa, assim, de acertos, mas alguma porcentagem de pessoas podem ter as

reações adversas. Mas ainda com essas reações adversas, a ciência ainda acerta com a grande... tem uma probabilidade de acertos muito alta então eu acho que isso torna a ciência confiável. (A2)

Raciocínios “indutivistas” como o esboçado pelo discente são muito úteis e, de fato, coerentes para a maioria dos aspectos do dia-a-dia. Conquanto essa pragmática forma de pensar se constitua numa maneira legítima de enxergar a confiabilidade dos produtos da ciência, ela pouco esclarece sobre o desenvolvimento do conhecimento científico e tampouco é capaz de apontar os erros como um traço essencial para o progresso. Dessa maneira, também a concepção de A2 sobre a confiabilidade científica será caracterizada como **não problematizada**.

A concepção de A3 não se distanciou das ideias contidas nas respostas dos demais participantes. Se, por um lado, esboçou uma compreensão da importância da comunicabilidade entre cientistas imersos em contextos distintos, por outro, não relacionou de maneira coerente o potencial que uma rede bem estruturada como essa tem de escrutinar erros científicos e, portanto, conferir confiabilidade ao processo. Abaixo, seguem as duas respostas de A3.

Eu acho que contribui na medida que você troca informações, acrescenta coisas no trabalho, nos trabalhos uns dos outros e unifica as teorias científicas. Então, ideias que eu tive o outro pode não ter tido e ele pode usar isso no trabalho dele tanto quanto eu posso usar as coisas que ele pensou no meu trabalho. (A3)

Eu acho que é ainda por causa das respostas que a gente obtém dos fenômenos, e da aplicabilidade deles, aplicabilidade mesmo das teorias erradas, ou das teorias incompletas, elas são inegáveis, elas aconteceram e elas foram importantes para as teorias seguintes, então eu acho que o erro, mesmo o erro, ele é importante estar incluso nas teorias que estão mais corretas ou mais completas a posteriori. (A3)

Também este aluno não conseguiu articular a resposta dada em um momento anterior, sobre o papel da coletividade, com um argumento em defesa da fiabilidade dos enunciados da ciência, restando a caracterização como **não problematizada**.

Como já era esperado neste estágio da pesquisa, todas as respostas, mesmo quando adequadas sob a perspectiva de uma visão consensual da NdC, não exibiram elementos que nos permitissem classificá-las como evolucionária ou revolucionária. Quando os discentes esboçaram uma explicação do funcionamento da ciência que se aproximava de um desses referenciais, acabavam por incorrer no que pode ser descrito como interpretações ingênuas das filosofias de Popper e Kuhn, exibindo ora um relativismo ingênuo, ora um racionalismo radical.

Os resultados encontrados nesta subsecção (relativos ao estágio inicial da investigação) e nas duas seguintes (relativos aos estágios intermediário e final) foram sintetizados no Quadro

13, a fim de conferir uma visão geral da eventual evolução das concepções dos discentes relativas ao longo dos estágios da intervenção.

4.6.2 – Estágio intermediário

O estágio intermediário compreende a efetiva aplicação da sequência didática, isto é, diz respeito às aulas onde foram discutidos os conteúdos físico, histórico e epistemológico. Neste estágio, foram destacados nas gravações de áudio e vídeo seis momentos específicos, a que chamaremos de “episódios”. Como dissemos, a fim de mobilizar os discentes a engajarem-se com mais profundidade nas discussões, propôs-se que cada participante da pesquisa ficasse responsável por uma apresentação. Com o objetivo de construir uma narrativa que sugerisse uma imagem científica mais fidedigna do período estudado, procurou-se dividir esta sequência didática em quatro temas que, estruturados cronologicamente, produziram uma compreensão alternativa da elaboração do modelo atômico de Bohr, uma visão em que erros científicos e figuras secundárias, notadamente John William Nicholson, desempenhassem um papel fundamental para o progresso. Cada um dos discentes ficou com um dos temas, sendo que a apresentação da primeira aula, de conteúdo essencialmente epistemológico, ficou a cargo do pesquisador. A divisão de apresentações por conteúdo lecionado ficou da seguinte forma:

Quadro 5 - Divisão de temas por participantes da pesquisa

APRESENTADOR	TEMA	AULA
Pesquisador	Progresso da Ciência: Revolução ou evoluções?	Primeira aula
A1	Evolução da Espectroscopia	Segunda aula
A2	A teoria atômica de Nicholson	Segunda aula
A3	O Centenário do átomo de Bohr	Terceira aula

Fonte: O autor.

Foi pedido que as apresentações fossem baseadas no material de apoio disponível relativo àquela aula, entregue previamente a todos os discentes e que as exposições fizessem uso de slides, também disponibilizados pelo pesquisador, para facilitar a discussão. Durante as exposições dos participantes, foi necessário que o pesquisador se mantivesse atento, tanto para

acrescentar observações quando percebesse que um tópico essencial não fora devidamente abordado quanto para reconhecer a oportunidade de problematizar aspectos da NdC de interesse para o trabalho.

Nesta secção, apresentaremos estes momentos em que se pôde problematizar as concepções dos alunos e analisaremos as visões de ciência expressas por eles neste estágio da pesquisa. Optamos por sistematizar estas situações em “mapas de episódios”, uma maneira de ordenar de maneira inteligível para o leitor a forma e conteúdo do debate. Desse modo, foram selecionados os momentos de interações discursivas de maior interesse para esta pesquisa, aqui divididos em seis episódios, com títulos que refletem o conteúdo abordado na discussão. Durante a intervenção, o pesquisador procurou estimular que todos os alunos se posicionassem sobre os três temas de interesse. Nem sempre foi possível, entretanto, para um dado episódio, mobilizar falas de todos os alunos.

Houve episódios em que discussões frutíferas tomaram corpo sem que necessariamente se relacionassem de maneira direta com os objetivos de aprendizagem desta proposta. Por exemplo, no episódio 5, os alunos declararam de maneira explícita qual dos dois referenciais epistemológicos melhor descreveriam a progressão da ciência. Nesse caso, como não se expressaram diretamente sobre os aspectos epistemológicos instituídos como objetivos de aprendizagem da sequência didática, a categorização de suas falas segundo nossos parâmetros de análise não foi considerada na visão global apresentada no Quadro 13, conquanto este episódio constitua um importante dado de pesquisa e, por esse motivo, esteja aqui listado.

Ao final da análise de cada episódio, o leitor poderá encontrar o mapa de episódio relativo ao momento de pesquisa, onde estarão detalhados a duração das falas e momento em que ocorreram - tendo como origem o início da gravação na aula em que a discussão ocorre -, além da descrição do contexto em que a interação discursiva emergiu.

Episódio 1: Caracterizando a Natureza da Ciência

Segundo Zabala (2000), o alunado precisa ser uma parte consciente das estratégias didáticas adotadas pelo professor, bem como dos objetivos de aprendizagem almejados. Nesse sentido, antes da efetiva apresentação das epistemologias evolucionária e revolucionária, julgamos conveniente introduzir de maneira sintética o debate sobre a “crise no ensino de ciências”, isto é, comentou-se resumidamente sobre a reaproximação, a partir da década de 80, da História e Filosofia com o Ensino de ciências, situando a nossa pesquisa como integrante de uma tradição de trabalhos que visam o uso da abordagem contextual para o ensino de ciências.

Alertando os discentes de que não há um consenso acerca do que é a Natureza da Ciência, foi apresentada uma visão possível, aquela segundo a qual a NdC pode ser expressa através de uma lista de características ditas consensuais entre pesquisadores.

A partir da apresentação desta lista de características do fazer científico, foi possível fazer comentários sobre cada aspecto, indagar aos discentes sobre o nível de concordância que mantinham com as assertivas e, assim, estabelecer uma discussão sobre quais aspectos seriam apropriados para descrever o conhecimento científico. O primeiro mapa de episódio (Quadro 6), relaciona os três momentos ocorridos no primeiro encontro. O primeiro surge quando o pesquisador pergunta se eles concordam com a afirmação de que “não existe um método científico universal”. A2 não estava presente, chegou apenas alguns minutos após o início da sequência. Os outros dois discentes, entretanto, puderam reafirmar as concepções que expressaram no primeiro estágio da sequência. Enquanto A3 afirmara concordar com a assertiva, o que está de acordo com sua resposta expressa no estágio inicial, A1 argumentou, mais uma vez, a existência de bases gerais comuns a todas as maneiras de fazer ciência.

Logo em seguida, quando questionados acerca da objetividade do conhecimento científico, A1 asseverou a ideia de que o método científico seria capaz de afastar os “problemas” trazidos pelo contexto social. No terceiro momento, os discentes foram questionados sobre como um empreendimento poderia ser, ao mesmo tempo, falível e altamente confiável? A esse respeito, A3 reprisou sua concepção diagnosticada no estágio inicial, a de que a confiabilidade estaria associada à capacidade de realizar predições bem-sucedidas. Previsivelmente, também A1 reafirmou sua posição original, a de que o método científico seria um instrumento de autocorreção garantidor da confiabilidade para os enunciados científicos. Diferentemente dos demais, entretanto, a visão exibida por A2 nesse estágio foi distinta daquela observada na entrevista. Nesta etapa da pesquisa, o discente relacionou explicitamente o papel da comunidade científica com o processo de autocorreção essencial para que a ciência seja considerada uma atividade confiável:

Eu colocaria como essa engrenagem de correção justamente a comunidade científica que vai estar ali pra testar aquelas hipóteses junto com o cientista que encabeça aquela teoria, e aí, por várias pessoas tentando reproduzir alguma coisa, são outros olhares, então aí volta a questão da ciência enquanto empreendimento humano. Então, os olhares, as perspectivas vão depender de cada pessoa mesmo, é individual. E daí vão surgindo os problemas, direções que poderiam clarear mais aquela questão ou torna ainda mais obscura e cria um outro aspecto a ser estudado. Então acho que essa engrenagem de autocorreção e de desenvolvimento está na coletividade (A2).

As discussões neste primeiro episódio tiveram como objetivo investigar se as concepções expressas pelos discentes em um ambiente de debate, mais dinâmico e interativo que o formato de uma entrevista, seriam as mesmas que as observadas no estágio inicial. Desse modo, as concepções de A1 e A3 permanecem inalteradas em relação à entrevista para o tema pluralismo metodológico. Por outro lado, A2 exibiu uma visão de confiabilidade mais refinada que a observada no estágio anterior (**adequada sem referência**), efetivamente associando a dimensão coletiva e cooperativa da ciência, sua dimensão humana, à fiabilidade de seus enunciados. Essa melhora na resposta dada por A2 é, provavelmente, resultado do debate que teve com A1, que mostrou uma visão distinta, atribuindo a autocorreção da ciência a um método científico.

Quadro 6 - Mapa de episódio I: caracterizando a Natureza da Ciência.

(Continua)

Aspecto da NdC	Contexto	Duração	Falante	Comentário
Pluralismo metodológico	1 – Pesquisador e discentes sentam-se em um semicírculo voltados para o quadro onde os slides são projetados. A2 chega com alguns minutos de atraso, durante a explicação do conteúdo. O pesquisador começa falando sobre o desenvolvimento do que hoje é conhecida como abordagem contextual, cita o Projeto de Física de Harvard, os trabalhos de Gerald Holton, as recomendações curriculares de introdução de história e filosofia da ciência que se iniciam na década de 80, a distinção entre ensinar ciência e <i>sobre</i> ciência, apresenta a concepção de ciência segundo a visão consensual e questiona se os discentes concordam com aqueles tópicos. Em um deles, lê-se “não existe um método científico universal”.	09:06 - 09:07	A3	Concordo.
		09:11 – 09:31	A1	Eu não concordo porque eu não sei se isso é verdade. Por exemplo, eu sempre imaginei o método científico como algo universal. Pelo menos dentro de um contexto histórico... ele é mutável, ok! Ele muda a partir de novas concepções que a gente tem sobre o fenômeno, mas, para mim, naquele momento ele seria universal.
		09:32- 09:38	P	Você acha que há um método comum a todas as disciplinas científicas, todos os campos da atividade científica, num mesmo período?
		09:41- 09:51	A1	Acho que sim. A base, pode ser que exista algumas alterações, algumas adaptações, mas eu entendo o método científico como uma base de como se constrói a ciência
		2 – O pesquisador continua tecendo comentários sobre cada um dos aspectos de NdC da lista consensual enquanto indaga aos discentes se concordam com aquela visão. O tema “método científico” foi mais uma vez abordado quando discutimos o tópico “a ciência é objetiva”.	10:55 – 11:10	A1
11:11- 11:12	P		Os aspectos chamados extracientíficos?	
11:12- 11:13	A1		Isso	
11:16- 11:48	P		A gente vai ver que essa é uma discussão que toma corpo da década de 80 e vai haver um movimento de descredibilização do conhecimento científico, e está relacionado com a obra de Thomas Kuhn, as questões das revoluções. Como balancear? Você tem aspectos extracientíficos, sociais, e parece que ninguém discorda disso. Até o cientista mais “puro”, concorda que a ciência é influenciada por esses aspectos, mas ao mesmo tempo você tem uma necessidade do conhecimento ser objetivo.	

Confiabilidade de científica	3 – Em seguida passou-se a contextualização do episódio histórico a ser estudado, ressaltando a importância didática do modelo de Bohr. Afirmou-se que a história da elaboração do modelo de Bohr é contada em livros didáticos e essa narrativa acaba por omitir alguns personagens que contribuíram para o desenvolvimento do período. Relatou-se como o nome de Nicholson aparece com frequência nos trabalhos de Bohr do período, resumiu-se as contribuições da teoria atômica de Nicholson e mostrou-se como ele é subrepresentado em textos que tratam do período. Nesse momento em que se introduzia algumas contribuições dadas por Nicholson, o pesquisador questionou como a confiabilidade da ciência se relacionaria com sua falibilidade.	26:18-26:11	P	A ciência é falível, mas é confiável. Como é possível um empreendimento ser falível e, ao mesmo tempo, grandiosamente confiável?
		26:21-26:31	A3	Confiável na medida em que ela pode fazer previsões. Se algo pode fazer boas previsões, pelo menos no contexto atual, eu acho que ela é confiável.
		26:32 – 26:45	A1	Eu acho que a confiabilidade vem justamente do instrumento de autocorreção, que é o próprio método científico.
		26:48-26:50	P	Vocês concordam que é o método científico, esse mecanismo de corrigir?
		26:50	A3	Eu não acho que o método científico que ele tá falando, que a gente usa, não é tão autocorretivo assim. (inaudível). Tem vários outros métodos científicos, várias formas de fazer ciência. Aí, a gente usa um só no caso. Tipo, a academia geralmente usa mais um.
		27:26 - 28: 10	A2	Eu colocaria como essa engrenagem de correção justamente a comunidade científica que vai estar ali pra testar aquelas hipóteses junto com o cientista que encabeça aquela teoria, e aí, por várias pessoas tentando reproduzir alguma coisa, são outros olhares, então aí volta a questão da ciência enquanto empreendimento humano. Então, os olhares, as perspectivas vão depender de cada pessoa mesmo, é individual. E daí vão surgindo os problemas, direções que poderiam clarear mais aquela questão ou torna ainda mais obscura e cria um outro aspecto a ser estudado. Então acho que essa engrenagem de autocorreção e de desenvolvimento está na coletividade.
		28:10 - 29:21	A1	Mas não é o próprio método científico que prevê essa coletividade, quer dizer, que determina essa coletividade? Porque o método científico, pelo menos pelo que eu entendo como método científico, ele diz que a sua teoria tem que ser falseável, né? Então, ela tem que ser... tem que ser possível que ela seja errada. Então, aí você faz essas várias tentativas, esses vários testes, pra ver se ela dá errada, e justamente nessa questão da reprodutibilidade.... Essa reprodutibilidade implica necessariamente.... reprodutível dentro de uma comunidade vasta, não é só dentro daquele seu contexto, seu laboratório, você sozinho ali, ela implica você reproduzir isso dentro de uma comunidade de cientistas etc. Então, eu acho que isso que você falou eu não discordo, mas eu só acho que isso já tá englobado dentro, sei lá, do método científico, a não ser que eu tenha uma visão equivocada do que seja método científico.

Episódio 2: Relação do erro com o método científico

Uma outra oportunidade de problematizar as concepções iniciais dos discentes ainda no primeiro encontro foi a discussão da relação do erro com o método científico. Procurando demonstrar aos alunos como o modo de conduzir as investigações científicas muitas vezes depende de variáveis incontroláveis, aleatórias, apresentou-se um quadro – aqui denominado Quadro 7, mas que durante a intervenção foi chamado de tabela - construído por Allchin (2012), onde métodos de investigação identificados na HC são associados aos erros que lhes deram origem. Por exemplo, o quadro sugere que o teste cego clínico surge como uma necessidade de controlar a amostra contra o efeito placebo. Pediu-se, em seguida, para que os discentes a observassem e dissessem qual fora a interpretação que fizeram do quadro.

Quadro 7 - Relação entre erro e método científico na História da Ciências.

Erro	Método	Referência histórica
Efeito placebo	Teste cego clínico	Herr (2011) Kaptchuk (1998)
Efeito do observador	Duplo-cego	Shapiro e Shapiro (1997)
Variáveis coincidentes	Experimento controlado	Boring (1954) Lilienfeld (1982)
Erro amostral	Análise estatística	Hacking (1990) Porter (1986)
Amostra tendenciosa	Randomização	Hall (2007)
Instrumento defeituoso	Calibração	Franklin (1997)
Inferências inapropriadas a partir dos métodos e resultados	Revisão por pares	Benos et al. (2007)
Enviesamento cultural ou de gênero	Freios e contrapesos comunitários	Harding (1991) Longino (1990) Solomon (2001)

Fonte: Adaptação de Allchin (2012).

O objetivo desta atividade era que, a partir da observação do quadro e da discussão que emergiria, os discentes pudessem intuir a relação dos erros apresentados na primeira coluna com o método desenvolvido para prevení-los, na segunda. Os diversos procedimentos adotados pelos cientistas para conduzir suas investigações não seriam, então, devidos a uma norma anterior, pré-estabelecida, de como fazer ciência. Ao contrário, o quadro evidencia que, como os erros são eventos imprevisíveis, também o é a prática científica, atividade sujeita a constantes modificações devido a seu caráter tentativo.

Esses métodos foram a forma como falsearam aqueles erros (...). Mostraram que eles não se encaixam dentro do que eles se propõem, do que as teorias se propõem. Por exemplo, o placebo é.... (A3)

Como sua fala foi excessivamente curta e genérica, decidimos que não há elementos suficientes para categorizá-la. A resposta de A3 mostra ainda certa confusão, parecendo considerar método científico como sinônimo de experimento e erro como sinônimo de hipótese, uma vez que afirmou que os erros foram falseados pelos métodos a eles associados no quadro. A2, por sua vez, mostrou compreender a relação sugerida no quadro e, mais do que isso, apontou para importância de se identificar os erros na prática científica:

Pelo que eu entendi [d]a tabela, ela traz a ideia que são erros que se percebem e aí métodos para evitar os erros, se afastar desses erros. E aí geram métodos que podem ser mais potentes, já que você tá minimizando aquele erro ou de fato até mesmo tirando ele da equação. Então, você cria um método mais poderoso para chegar num resultado mais limpo. Ai, perceber esses erros é também a chave. Então é importante que alguém perceba que há o placebo... ali, a questão de viés de gênero e cultural. (A2).

O discente já havia apresentado, no estágio inicial, uma visão considerada adequada acerca do tema pluralismo metodológico. Neste episódio, A2 incorporou à sua visão de método o papel do erro científico, isto é, relacionou o caráter tentativo deste método ao caráter imprevisível da ocorrência de erros. Mais uma vez, é possível que o ambiente de debate, o contato com opiniões divergentes e a leitura do texto disponibilizado previamente possam ter estimulado a discente a dar uma roupagem mais refinada da sua visão de método científico. Apesar desta observada melhora, como não há em sua resposta elementos conceituais de nenhum dos referenciais epistemológicos, sua concepção permanece como **adequada sem referência**.

Tentou-se problematizar a concepção de método identificada em A1 no estágio inicial, indagando-lhe se, mesmo com a recém discutida relação entre erro e método científico,

manteria a ideia de um método universal ao que ele respondeu:

[...] não tem como você identificar concepções comuns dentro de todos esses métodos? Porque, pelo que eu entendo, essa adequação que eu falei, seria de você pegar esses, sei lá, é como se você pensasse que, como se tivesse um código base para esse método e a partir desse código base, que seria o próprio método científico, você adequa métodos específicos pra contornar erros específicos. [...] E aí, no caso, o difícil seria chegar nesse “geralção”, né, de encontrar ele, de determinar ele. Por exemplo, é mais simples você começar - pelo menos pelo que eu vejo -, você tenta contornar erros específicos e aí, na medida que você vê que pra contornar esses erros específicos em diferentes contextos e diferentes áreas, você consegue ver que alguns padrões para contornar esses erros são comuns a todos os métodos desenvolvidos, eu acho que a partir daí você consegue extrair um método mais geral, né. Daí o método mais geral, ele simplesmente, como o próprio nome sugere, ele é geral, ele só diz respeito ao erro como um todo, não é um erro específico que tem que tá aí na tabela (A1)

Como se vê, o discente procurou defender sua posição original, afirmando não enxergar contradição entre a aparente provisoriedade dos métodos científicos expressa no quadro e uma compressão de método universal, uma vez que deveria haver um “código base” subjacente àqueles que seriam, na verdade, “métodos específicos” constituintes de um método mais geral. Podemos atribuir a sua fala algumas confluências com a filosofia de Popper: se por um lado, há uma disposição de pensamento anterior à atividade científica (“código base”), a que Popper chamaria de horizonte de expectativa e que servia de contra-argumento à *tese do balde mental*; por outro, há em sua fala um reconhecimento de que essas disposições requerem os dados da experiência, e a esse respeito A1 afirma que o “método mais geral” é extraído quando os cientistas identificam regularidades (“padrões”) nos processos de remediação dos erros científicos. Apesar de enunciar verbalmente a defesa de um método universal, quando distingue “métodos específicos” de um “método geral”, este último sim universal, A1 parece, na verdade, estar advogando a existência de modos de pensamento que guiam a prática científica. Esta visão é coerente com a que consideramos adequada pois, ao mesmo tempo em que reconhece a pluralidade de métodos, assevera que estes estão limitados por um modo de pensamento *a priori* caracterizador da prática científica. Apesar de se encontrar elementos popperianos em sua fala, seria um excesso categorizar a visão de A1 aqui expressa como evolutiva. Como já apontamos anteriormente, entretanto, é razoável atribuir o aumento de sofisticação na resposta dada pelo aluno em comparação àquela identificada no estágio inicial, ao ambiente mobilizador criado pela intervenção e à possibilidade do aluno ter lido o Texto I. A concepção de A1 sobre método no segundo momento do estágio intermediário foi então considerada **adequada sem referência**.

Quadro 8 - Mapa de episódio II: relação do erro com o método científico.

(Continua)

Aspecto da NdC	Contexto	Duração	Falante	Comentário
Pluralismo metodológico	O pesquisador fez comentários sobre a teoria do flogisto que, no século XVII, asseverava que os processos de combustão eram causados pela emissão de uma substância com esse nome. Apesar da existência do flogisto jamais ter sido comprovada, a teoria ajudou a aumentar a compreensão do homem sobre o fenômeno da combustão. O flogisto seria então um exemplo de que modelos equivocados podem contribuir para o progresso. Em seguida, o pesquisador afirmou que o objetivo daquela aula era discutir qual modelo epistemológico melhor representaria uma ciência em que as contribuições de teorias equivocadas, como a do flogisto, fossem destacadas.	32:00 – 35:55	P	Bom, eu falei que a gente ia ver a relação entre erro científico e método científico. Eu queria que vocês olhassem para essa tabela e me dissessem o que é que a gente pode concluir da relação entre erro científico e método.
		36:45 – 36:50	A3	Esses métodos foram a forma como falsearam aqueles erros...
		37:04 – 37:08	P	Mas é “falsearam” mesmo o nome? “Falsearam os erros”?
		37:15 – 37:22	A3	Mostraram que eles não se encaixam dentro do que eles se propõem, do que as teorias se propõem. Por exemplo, o placebo é....
		37:22 – 37:40	P	Todo mundo sabe o que é o efeito placebo? (Todos respondem que sim). “Efeito do observador” é intuitivo, né? Um cientista vai fazer uma medição e o fato dele estar observando enviesando o resultado, de alguma maneira ele interfere.
		37:53 - 38:40	A2	Pelo que eu entendi, a tabela ela traz a ideia que são erros que se percebem e aí métodos para evitar os erros, se afastar desses erros. E aí geram métodos que podem ser mais potentes, já que você tá minimizando aquele erro ou fato até mesmo tirando ele da equação. Então, você cria um método mais poderoso para chegar num resultado mais limpo. Ai, perceber esses erros é também a chave. Então é importante que alguém perceba de que há o placebo... ali, a questão de viés de gênero e cultural.
		38:53 – 38:53	P	A1 concorda?
		38:54 – 39:01	A2	Pelo que eu entendi é justamente isso. Você reconhece o erro, que o erro existe, sabe identificar ele e aí você cria algum método pra contornar.
		39:04 – 40:00	P	A3, você continua achando, diante disso, dessa conclusão, que há um método. Parece o método se adequa à situação. Você não sabia até um determinado período o que era o efeito placebo, quando o sujeito tomava algum medicamento, o “estado de espírito” dele, ele acreditando que aquilo iria surtir um efeito, acabava dando um déficit em seu resultado. Bom, você em determinado momento percebe que seu método é insuficiente para te prevenir desse erro, e aí você propõe o teste cego clínico. Então, há uma dinâmica do erro e do método. A gente concordou que a ciência é tentativa e erro, e o método científico pode continuar

				sendo universal ou geral diante disso?
		40:01 – 41:29	A1	Dentro desses métodos aí, eu não consegui enxergar a maioria, porque tá pequena a tabela (risos). Mas aí o que acontece, não tem como você identificar concepções comuns dentro de todos esses métodos? Porque, pelo que eu entendo, essa adequação que eu falei, seria de você pegar esses, sei lá, é como se você pensasse que, como se tivesse um código base para esse método e a partir desse código base, que seria o próprio método científico, você adequa métodos específicos pra contornar erros específicos. E aí, no caso, o difícil seria chegar nesse “geralção”, né, de encontrar ele, de determinar ele. Por exemplo, é mais simples você começar - pelo menos pelo que eu vejo -, você tenta contornar erros específicos e aí, na medida que você vê que pra contornar esses erros específicos em diferentes contextos e diferentes áreas, você consegue ver que alguns padrões para contornar esses erros são comuns a todos os métodos desenvolvidos, eu acho que a partir daí você consegue extrair um método mais geral, né. Daí o método mais geral, ele simplesmente, como o próprio nome sugere, ele é geral, ele só diz respeito ao erro como um todo, não é um erro específico que tem que tá aí na tabela

Episódio 3: Perspectiva epistemológica

Nos últimos minutos da intervenção didática, na terceira e última aula de nossa sequência, iniciou-se, após encerrada a última apresentação, uma roda de discussões estimuladas por perguntas feitas pelo pesquisador. O objetivo desta atividade foi fornecer aos discentes um ambiente propício para externar suas impressões acerca dos temas discutidos ao longo da semana. Primeiramente, foi proposto que os discentes comentassem sobre qual dos dois referenciais epistemológicos julgavam mais compatíveis com o período histórico estudado. Apesar de não se relacionar de maneira direta com os aspectos de NdC aqui avaliados, este momento de pesquisa permitiu que os participantes desenvolvessem argumentos em defesa de um outro modelo epistêmico.

A3 rejeitou a ocorrência de uma revolução no período, argumentando que todas as teorias mantinham um laço com as anteriores. Disse acreditar, entretanto, que o desenvolvimento da Antiga Teoria Quântica se constitui um período de crise. Como dissemos na seção anterior, uma maneira de enxergar este capítulo da História da Ciência sob uma ótica kuhniana é considerar que os diversos modelos atômicos do período são uma evidência da crise instaurada, que só se encerraria com a revolução quântica.

Eu acho que teve aquele período de crise que você falou, mas eu ainda não consigo ver como uma revolução, uma explosão assim. Porque, você sempre estava, pelo menos nesse período, estava com uma teoria, aí chegava, tirava essa colocava outra, tirava essa colocava outra. Mas, todas as teorias a frente tinham relação com as anteriores. Então não acho que foi uma revolução mas acho que foi um período de crise. (A3)

O discente nega, portanto, que a publicação de *Sobre a Constituição* fora o coroamento de uma revolução científica, mas considera que o período de ploriferação de modelos atômicos no início do século passado pode ser lido como um período de crise. O uso do vocabulário kuhniano nos permitiria classificar sua posição como revolucionária.

Na fala de A2, podemos identificar tanto uma defesa de uma concepção descontinuista, já que, diante de uma grande ideia científica, não é possível ignorar o “*mérito do cientista que [a] propõe*” da mesma maneira que não se pode desprezar que “*há toda uma conjuntura que permite que ele possa pensar de forma nova*”. Se fosse o caso, portanto, classificaríamos sua visão como mista. Quando perguntado explicitamente, A2 descreveu sua perspectiva epistemológica da seguinte maneira:

Eu acho que é, ainda, uma mistura das duas coisas, de que tem um avanço na teoria a tal modo que não consegue explicar mais algumas coisas, e é nesse momento que a teoria vigente não consegue explicar [que] são necessárias ideias que muitas vezes são muito distantes da teoria vigente: essa questão da quantização de energia proposta por Einstein para o efeito elétrico, é muito bruto assim a separação porque energia sempre foi contínua na Mecânica Clássica, então você parar e pensar em uma coisa agora que se comporta como pacotes, falar que estes pacotes viajam... tudo vai sendo muito novo entre a teoria que você tinha ali já bem fundamentada, o eletromagnetismo, a mecânica, e aí passa-se a se olhar de outra forma, que tem o mérito do cientista que propõe, mas há também toda uma conjuntura que permite que ele possa pensar de forma nova. Aí, eu fico na dúvida assim, se eu posso dizer... eu digo que há ali um período em que há uma transformação de visão, mas não sei se revolução é a palavra já que eu também estou dizendo que há uma continuidade anterior que permite com que aquele momento chegue, que exista. (A2)

Por sua vez, A1 exibiu uma visão marcadamente evolucionária, criticando a posição continuísta de Koyré, para quem uma “*revolução bem preparada não deixaria de ser uma revolução*”. Para o discente, o termo não estaria suficientemente bem definido, não haveria critérios rígidos para identificar a ocorrência de uma revolução na História da Ciência e, por esse motivo, uma perspectiva evolutiva se apresentava como mais coerente e menos problemática.

Pra mim, ao menos para mim, essa [a visão evolucionária] é uma maneira muito mais clara de se descrever os acontecimentos porque, como eu disse, pra mim revolução parece ser uma coisa tão subjetiva que, sei lá, não teria nem como você usar ela em um discurso sem estabelecer algum tipo de limite, sendo que esse limite teria que ser restabelecido de novo se você já passasse a tentar descrever uma outra situação. Agora, quando você olha por essa ótica evolutiva, e você já imagina que os modelos de Bohr e Nicholson eles meios que compartilhavam um ancestral em comum, e aí eles se desenvolveram de maneiras semelhantes em alguns aspectos mas bem diferentes em um do outro e, a partir de seleções naturais no meio científico, ou seja, através de experimentação, previsões etc., uma teoria foi adotada em detrimento da outra justamente porque ela, naquele momento, descrevia melhor aquilo que estava sendo observado. Eu acho que, pra mim, isso descreve bem melhor o que aconteceu do que uma ótica de revolução. (A1)

Neste momento de pesquisa, os discentes conseguiram desenvolver argumentos defendendo um modelo de ciência evolutivo, revolucionário ou misto. Percebe-se que houve incorporação de alguns conceitos das epistemologias de Kuhn e Popper, que foram articulados com suas visões pessoais do conhecimento científico. Fica claro que, quando perguntados de maneira explícita sobre qual modelo epistêmico julgam mais coerente, os alunos apresentam

uma maior facilidade em articular os elementos conceituais das epistemologias (seleção natural, ancestral comum, revolução, crise etc.) do que quando se espera que estes elementos emergjam naturalmente de respostas a perguntas sobre aspectos da NdC.

Quadro 9 - Mapa de episódio III: Perspectiva epistemológica

Aspecto da NdC	Contexto	Duração	Falante	Comentário
Não se aplica	Relembrando alguns pontos centrais do episódio histórico estudado, o pesquisador questiona: “Vocês acham que nesse período foi uma revolução científica o que aconteceu, diante dessas ideias que a gente viu de Thomas Kuhn, dessas epistemologias de ruptura? Você acha que ocorreu uma ruptura nesse período, em algum momento ali ou não, ou foi mais um processo?”	32:58 – 33:25	A3	Eu acho que teve aquele período de crise que você falou, mas eu ainda não consigo ver como uma revolução, uma explosão assim. Porque, tipo assim, você sempre estava, pelo menos nesse período, estava com uma teoria, aí chegava, tirava essa colocava outra, tirava essa colocava outra. Mas tipo assim, todas as teorias a frente tinham relação com as anteriores. Entao não acho que foi uma revolução mas acho que foi um período de crise.
		33:26 – 33:56	P	Bom, olhando por essa perspectiva, ruptura toda teoria sempre vai ter relação com sua antecessora, então a gente vai ficar proibido de usar o termo “revolução”. Mas será que algumas ideias não são tão ousadas – mesmo você identificando que tem, né, uma influência, nada sai do nada – mas será que não há ideias tão ousadas que de fato voe pode dizer “houve uma ruptura nesse momento”? Vocês concordam que não foi uma revolução, que não houve uma, que foi mais um processo contínuo?
		33:57 – 35:26	A2	Eu acho que é, ainda, uma mistura das duas coisas, de que tem um avanço na teoria a tal modo que não consegue explicar mais algumas coisas, e é nesse momento que a teoria vigente não consegue explicar (que) são necessárias ideias que muitas vezes são muito distantes da teoria vigente: essa questão da quantização de energia proposta por Einstein pro efeito elétrico, é muito bruto assim a separação porque energia sempre foi contínua na Mecânica Clássica, então você para e pensar em uma coisa agora que se comporta como pacotes, falar que estes pacotes viajam... tudo vai sendo muito novo entre a teoria que você tinha ali já bem fundamentada, o eletromagnetismo, a mecânica, e aí passa-se a se olhar de outra forma, que tem o mérito do cientista que propõe mas há também toda uma conjuntura que permite que ele possa pensar de forma nova. Aí, eu fico na dúvida assim, se eu posso dizer... eu digo que há ali um período em que há uma transformação de visão, mas não sei se revolução é a palavra já que eu também estou dizendo que há uma continuidade anterior que permite com que aquele momento chegue, que exista.
		35:27 – 35:32	A3	Aí pode ser o que ele falou na outra aula, sobre revolução bem preparada, né?
		32:32 – 32:32	A2	Isso, isso.
		32:32 – 36:51	A1	Eu fiquei pensando nesse, nessa expressão, né, de que a revolução bem preparada não deixa de ser uma revolução e isso só tornou as coisas bem mais nebulosas pra poder entender o que seria então uma revolução. Porque se você usa isso como um argumento, você vai cair sempre nessa subjetividade: “ah, então o que é que... qual o limite que você define algo como sendo simplesmente um processo do que de fato uma quebra, né”. Porque, eu posso ficar fazendo esse argumento retroativamente até dizer que qualquer tipo de mudança seja então uma revolução porque “ah, se houve uma preparação de um

			determinado acontecimento pro outro, isso não deixa de ser uma revolução e tal”. Eu não vejo como não cair num profundo relativismo da palavra, então eu não concordo com essa afirmação não, não acho que isso seja um argumento muito, sei lá, eficiente, porque, para mim, você vai tá sempre caindo nessa subjetividade, nessa relativização.
	36:53 - 36:58	P	Então você acha que há de fatos revoluções? Eu não entendi.
	36:58 – 37:09	A1	É justamente isso: pelo fato de eu não conseguir enxergar como você define revolução a partir desta perspectiva, eu não vejo ela existindo. É isso.
	37:11 – 40:12	P	O Kuhn dá algumas pistas, né? Uma delas é que, entre paradigmas distintos, as palavras não tem o mesmo significado. A falou da questão da luz não ser contínua para Einstein ou para Bohr. Isso é um indício, talvez seja um indício de que você tem paradigmas diferentes ali, né, já que você tem propriedades distintas sendo atribuídas para o mesmo ente físico, digamos assim. Outra coisa, a questão da incomensurabilidade, de falar línguas diferentes, o A3 acabou de mostrar que enquanto o elétron estava orbitando, tudo bem, a eletrodinâmica clássica estava explicando. Agora, quando há transição, você não pode usar nenhuma linguagem à época, você não pode usar a linguagem de Maxwell, digamos assim, para explicar o que acontece entre uma órbita e outra. Há essa supressão linguística, você não tem o que dizer. Eu não estou dizendo que eu concordo que foi uma revolução, só estou dizendo: “não são indícios de que há uma mudança das águas ali, de que a coisa está mudando de direção, não são esses ingredientes de que o Kuhn falava?”. Isso sob a ótica da revolução científica. E se a gente olhar pela ótica da evolução, como é que entra aí o átomo de Nicholson, o átomo de Bohr. Eu tinha dito que a quantização do momento angular acontece com Nicholson, mas há, associada ao átomo, a quantização de energia antes, duas tentativas, Arnold Sommerfeld e Arthur Haas. Como é que vocês enxergam, contrapondo à ideia de revolução. Você (A1) discordou, você acha que não há uma univocidade do termo, o termo não está bastante claro, portanto seria melhor não utilizar. Então seria uma evolução, ou seja, houve uma seleção natural nesse período? Em 1913, a comunidade científica operou uma seleção natural, colocou na balança o modelo de Nicholson, o modelo de Bohr – seriam duas, duas conjecturas de como o mundo funciona (...). O meio ambiente, que é a comunidade consegue fazer seleções naturais (...). O que é que você acha dessa outra maneira de ver o desenvolvimento da antiga teoria quântica?
	40:12 – 41:20	A1	Pra mim, ao menos para mim, essa é uma maneira muito mais clara de se descrever os acontecimentos porque, como eu disse, pra mim revolução parece ser uma coisa tão subjetiva que, sei lá, não teria nem como você usar ela em um discurso sem estabelecer algum tipo de limite, sendo que esse limite teria que ser restabelecido de novo se você já passasse a tenta descrever uma outra situação. Agora, quando você olha por essa ótica evolutiva, e você já imagina que os modelos de Bohr e Nicholson eles meios que compartilhavam um ancestral em comum, e aí eles se desenvolveram de maneiras semelhantes em alguns aspectos mas bem diferentes em um do outro e, a partir de seleções naturais no meio científico, ou seja, através de experimentação, previsões etc., uma teoria foi adotada em detrimento da outra justamente porque ela, naquele momento, descrevia melhor aquilo que estava sendo observado. Eu acho que, pra mim, isso descreve bem melhor o que aconteceu do que uma ótica de revolução.

Episódio 4: Contribuições de Nicholson

O segundo questionamento do último dia de intervenção referiu-se às contribuições dadas por Nicholson ao átomo de Bohr. A finalidade deste momento de pesquisa era investigar as concepções dos discentes sobre o tema pluralismo teórico. Ao reconhecer que Nicholson desempenhou um papel central para o desenvolvimento da Antiga Teoria Quântica, os discentes estariam asseverando a possibilidade de que teorias equivocadas possam explicar aspectos dos fenômenos naturais e produzir progresso.

Todos os enunciados dos alunos orbitaram os mesmos aspectos epistêmicos do fazer científico. Em primeiro lugar, a compreensão de que o átomo de Bohr foi um modelo limitado, que enfrentou dificuldades e questionamentos está em acordo com a imagem de uma ciência mutável, em constante desenvolvimento. Em segundo lugar, conceber que uma grande ideia física como o átomo de Bohr foi o produto de um esforço coletivo, incluindo cientistas pouco conhecidos que deram contribuições para o campo de pesquisa, é uma maneira de se afastar de uma visão comumente difundida de ciência construída por alguns poucos gênios isolados, isto é, uma visão elitista e individualista de ciência (GIL - PÉREZ, 2001). Além disso, uma ciência tentativa e plural emerge da compreensão de que uma teoria equivocada pôde ter propiciado efetivo progresso científico.

A2 considerou que a maior contribuição de Nicholson foi o fato de ter sido um dos primeiros a viabilizar o casamento da física teórica com a espectroscopia. O seu método de trabalho, por assim dizer, a busca por identificar regularidades dos dados espectrais com regularidades na matéria, teria sido o aspecto de sua obra que mais fortemente inspirou o físico dinamarquês.

Eu acho que a maior influência foi justamente esse olhar para espectroscopia, quando (Bohr) percebeu que haveria ali um caminho que ele não tinha pensando antes. As apresentações deixaram isso explícito, que antes ele não pensava em termos de analisar espectros dos elementos e, após conhecer Nicholson e sua obra, ele começa a ter esse interesse e percebe que a teoria dele teria como ligar-se com a série de Balmer. (A2)

A1 defendeu que Nicholson havia influenciado o modelo atômico de Bohr e que isso poderia ser provado pela mera constatação de que a obra do astrofísico fora citada em *Sobre a Constituição*. Indagado acerca da magnitude desta influência, se o tratamento dado a Nicholson em livros-didáticos seria compatível com o papel desempenhado por ele na física, o discente argumentou que a “invisibilização” deste cientista estaria associada a uma tendência dos

materiais didáticos em retratar a ciência por um ponto de vista revolucionário:

Se você olha para a história de como a ciência é ensinada nas escolas, você vê que a ciência é ensinada de maneira revolucionária, a ciência é ensinada sempre desse jeito, pelo menos na maioria dos casos. Você sempre tem... somente são apresentados para os alunos cientistas e ideias muito pontuais, (...)geniais, justamente isso. Geniais! Parece que o cara tirou aquilo do nada e foi literalmente uma revolução. “Poxa, ele pensou aquilo tudo sozinho!”. A ciência é ensinada nas escolas desse jeito, e a partir dessa perspectiva, aí sim Nicholson não tem importância alguma, até porque eu nunca tinha ouvido falar de Nicholson até então. Mas, se você olha para o próprio trabalho de Bohr e o cara cita Nicholson, se ele faz referência às ideias dele, não tem como dizer que ele não foi influenciado de alguma forma, apesar de que isso não é ensinado pra gente nas escolas. (A1)

Como discutido no Capítulo 2, não consideramos que uma perspectiva revolucionária implique necessariamente na supressão de figuras menores. A perspectiva de Scerri (2017), de que uma historiografia evolutiva coroaria os erros e tropeços da ciência e, assim, imprimiria uma imagem mais fidedigna de trabalho científico antagoniza, nos parece, não com uma visão kuhniana do progresso, mas com uma leitura equivocada das revoluções científicas propostas por Thomas Kuhn. A ideia de Kuhn sobre os períodos de ciência normal, como vimos, era bem próxima de um modelo darwinista de crescimento do conhecimento. Ali, o desenvolvimento ocorria de maneira estável contínua e cumulativa, e não por rupturas. Como não há registros de que Kuhn alguma vez considerou os postulados quânticos de Bohr uma revolução científica, é possível argumentar, de um ponto de vista legitimamente kuhniano, que a proliferação de modelos atômicos no período foi o resultado das dificuldades em encontrar uma solução para a estabilidade da eletrosfera; nesse sentido, tal período histórico exibiria traços característicos – improvisação, inovação, novos modelos e paradigmas concorrentes - do momento de crise que antecedeu a revolução quântica. Naturalmente, também é legítima a interpretação de que o modelo de Bohr foi uma espécie de “micro-revolução” que antecedeu a ruptura levada a cabo por Heisenberg e Schroedinger mais de uma década depois; as evidências de incomensurabilidade entre a teoria de Bohr e o eletromagnetismo clássico são pungentes. Seja como for, importa-nos notar que não só A1 problematiza metodologias didáticas tradicionais como as categoriza segundo um dos referências epistemológicos estudados.

A3, por sua vez, também reconheceu as contribuições dadas por Nicholson ao passo em que teceu críticas a maneira truncada como os modelos atômicos são abordados em grande parte dos livros didáticos.

[...] na escola a gente aprende: primeiro a gente tem o átomo da bola de bilhar, depois você tem o átomo do pudim, depois Rutherford-Bohr e, no caso tipo assim, nunca mostra o processo de como foi criado, parece que sempre... durante cem anos tinha um átomo e aí, do nada, alguém falou assim “não, não é esse átomo não. É esse daqui!”. Mas eu não sei se Nicholson devia ter tanta relevância quanto a pessoa que... no caso, o Bohr... porque tipo assim, o Bohr, ele... no caso [as] duas principais contribuições foi tanto a do... foi a da espectrometria e a do momento angular. Então, tipo, outras pessoas também deram contribuições muito importantes, então eu não sei se, sei lá, merecia um capítulo inteiro só pra falar sobre Nicholson, mas eu acho que seria importante [que] você falasse de onde foi que Bohr tirou algumas ideias. (A3)

Nesta etapa da pesquisa, todos os discentes expressaram falas que podem ser interpretadas como problematizadoras de uma visão individualista e elitista da ciência, reconhecendo a importância de teorias equivocadas para o progresso e a necessidade de se estudá-las na sala de aula, o que nos leva a considerar todas as concepções quanto ao tema pluralismo teórico como **adequadas sem referência**, já que reconhecem o papel de teorias equivocadas como integrativas do processo de desenvolvimento técnico e teórico das disciplinas científicas. Cumpre notar, entretanto, que conquanto A1 faça uma crítica mais incisiva a uma perspectiva que ele considera revolucionária, as falas de A2 e A3 são mais moderadas e relativizam, ainda que por razões pragmáticas, as contribuições dadas por Nicholson. A3 questiona se Nicholson deveria ter um lugar de destaque, já que outras figuras também deram contribuições significativas para o desenvolvimento do período. Em uma fala posterior, afirma que não “*mereceria um capítulo inteiro no Ensino Médio para estudar Nicholson*”. Também A2 faz a ressalva de que, tanto no nível médio quanto no superior, em que pese a maior fidedignidade de uma narrativa que revele figuras menores, é preciso estar atento aos limites de tempo impostos por uma carga horária apertada.

[...] Até aqui no ensino superior não existe muito essa progressão mesmo da história, de que houve um cientista que propôs isso, outro que fez assim, e aí vai se colidindo aquelas teorias até que vem outro e faz algo misturado. Não é assim que a gente aprende até mesmo aqui no superior. Você vai vendo “olha, chegamos até aqui, aí esse deu essa contribuição aqui”. Então tem todo um espaço aqui que não é contado, então já está nesse sistema de suprimir muitas informações, e tem a questão do tempo, né, porque se a gente fosse contar também com muitos detalhes, quantos anos duraria um curso de Física? E no Ensino Médio também, como é que você acomoda tanta informação, já não dá pra dar muita coisa. (A2)

As opiniões de A2 e A3 poderiam ser vistas como um contra-argumento a posição de Scerri (2017). Como se dissessem ao historiador maltês que a faca tem dois gumes: uma visão

evolutiva, excessivamente integradora, ao dar igual destaque a todas teorias que contribuíram para um campo de pesquisa, não estaria erroneamente esvaziando o impacto de ideias revolucionárias?

A discussão das contribuições dadas por Nicholso para o átomo de Bohr fomentou uma discussão sobre uma visão elitista e individualista da ciência, que encontra expressão na maneira como os conteúdos de física são lecionados, tanto em nível médio quanto superior. Apesar de apontarem para a necessidade de se ter uma visão mais ampla de episódios relevantes da HC, os discentes ressaltaram que tal ampliação pode encontrar dificuldades concernentes aos estreitos limites de tempo das disciplinas.

Quadro 10 – Mapa de episódio IV: Contribuições de Nicholson.

(Continua)

Aspecto da NdC	Contexto	Duração	Falante	Comentário
Pluralismo teórico	O pesquisador comenta: “A gente viu que não é um ponto pacífico se Nicholson de fato foi uma contribuição essencial para Bohr. Alguns historiadores afirmam isso, mas outros, - o biógrafo de Bohr, Abraham Pais – diz que não é bem assim, e o Leon Rosenfeld rejeita completamente [...]Qual impressão que vocês tiveram, que as contribuições de Nicholson foram de fato significativas?”	54:22 – 55:07	A2	Eu acho que a maior influência foi justamente esse olhar para espectroscopia. Quando ele percebeu que haveria ali um caminho que ele não tinha pensando antes. As apresentações deixaram isso explícito, que antes ele não pensava em termos de analisar espectros dos elementos e, após conhecer Nicholson e sua obra ele começa a ter esse interesse e percebe que a teoria dele teria como ligar-se com a série de Balmer. Então, eu acho que esse ponto é o principal assim. Acho que foi uma influência para que ele pensasse a partir da espectroscopia.
		55:10- 55:12	P	Você acha que Bohr chegaria ao modelo dele independentemente?
		55:15 – 55:16	A2	Essa é difícil, né (risos)
		55:22 – 55:44	A1	É provável porque... Se, por exemplo, ele – além do próprio Nicholson – ele teve influências de Balmer e de outras pessoas que trabalhavam com a espectroscopia, então acho que seria algo inevitável, né? Tipo, é aquela máxima, né, se não fosse ele que tivesse feito, outra pessoa o faria.
		55:45 – 55:57	P	Isso corrobora a ideia evolutiva, né, um organismo que está se desenvolvendo e em algum momento vai se produzir uma adaptação. E você achou o quê sobre a influência de Nicholson?
		55:57 – 56:04	A1	Eu acho que não tem como dizer que não foi influenciado. Se ele (Bohr) mesmo citou o cara, como que você diz que não foi influenciado?
		56:05 – 56:55	P	Mas é isso, foi influenciado... Deixa eu reformular a pergunta: a influência que Nicholson deu ao modelo de Bohr é compatível com o tratamento que ele recebe, que a gente percebe em livros-texto, porque a gente pode chegar a conclusão – apesar de aqui estar afirmando que ele foi influente e tal – a gente pode chegar a conclusão que talvez sim, que talvez seja compatível, que talvez não seja necessário falar do modelo de Nicholson, que da maneira como tá já é uma representação sintética e adequada da Antiga Teoria Quântica O que é que vocês veem? Ou acham que a influência de Nicholson foi muito maior que a representação que ele recebe em livros-texto e artigos, no imaginário geral?
		56:56 – 57:17	A1	Se você olha para a história de como a ciência é ensinada nas escolas, você vê que a ciência é ensinada de maneira revolucionária, a ciência é ensinada sempre desse jeito, pelo menos na maioria dos casos. Você sempre tem... somente são apresentados para os alunos cientistas e ideias muito pontuais...

	57:17 – 57:17	A2	Geniais!
	57:17 – 57:56	A1	...geniais, justamente isso. Geniais! Parece que o cara tirou aquilo do nada e foi literalmente uma revolução. “Poxa, ele pensou aquilo tudo sozinho!”. A ciência é ensinada nas escolas desse jeito, e a partir dessa perspectiva, aí sim Nicholson não tem importância alguma, até porque eu nunca tinha ouvido falar de Nicholson até então. Mas, se você olha para o próprio trabalho de Bohr e o cara cita Nicholson, se ele faz referência às ideias dele, não tem como dizer que ele não foi influenciado de alguma forma, apesar de que isso não é ensinado pra gente nas escolas.
	57:58 – 58:00	P	A3 concorda?
	58:00 - 58:02	A3	Eu tô pensando sobre a representação de Nicholson...
	58:02 – 58:41	P	O que ele (A1) falou, uma das coisas interessantes que ele falou foi (que) você tem uma pressuposição epistemológica implícita nas escolas, que seria de ruptura, de revoluções. A partir dessa pressuposição, a ciência acontece dessa maneira (com) desenvolvimentos pontuais, espaçados, e aí de fato Nicholson não tem importância, né? Então você concorda com essa fala de A2 que há de fato essa visão subjacente no Ensino Médio, que é onde a gente vê o modelo de Bohr?
	58:42 – 59:51	A3	Concordo com essa parte por causa do... porque, assim, na escola a gente aprende: primeiro a gente tem o átomo da bola de bilhar, depois você tem o átomo do pudim, depois Rutherford-Bohr e, no caso tipo assim, nunca mostra o processo de como foi criado, parece que sempre... tipo, durante cem anos tinha um átomo e aí, do nada, alguém falou assim “não, não é esse átomo não. É esse daqui!”. Mas eu não sei se Nicholson devia ter tanta relevância quanto a pessoa que... no caso, o Bohr... porque tipo assim, o Bohr, ele... no caso (as) duas principais contribuições foi tanto a do... foi a da espectrometria e tal e a do momento angular. Então, tipo, outras pessoas também deram contribuições muito importantes, então eu não sei se, sei lá, merecia um capítulo inteiro só pra falar sobre Nicholson, mas eu acho que seria importante (que) você falasse de onde foi que Bohr tirou algumas ideias.
	59:52 – 59:53	A2	Porque ele não é nem citado, né!?
	59:53 – 01:00:04	A3	É isso (inaudível) ele não ser nem citado, eu acho que isso... porque tanto que Bohr tirou coisas de Nicholson também, mas não acho, tipo, que mereceria um capítulo inteiro no Ensino Médio só pra estudar Nicholson.

		01:00:04 – 01:00:15	A1	Na verdade todas essas teorias transitórias, né, entre, sei lá, uma grande teoria e outra... existem essas teorias transitórias, tudo isso é suprimido no ensino.
		01:00:16 – 01:00:50	A2	A maneira como a história é contada é muito diferente de como ela realmente parece ter sido. Não tem a (inaudível) de como ela realmente foi. Até aqui no ensino superior não existe muito essa progressão mesmo da história, de que houve um cientista que propôs isso, outro que fez assim, e aí vai se colidindo aquelas teorias até que vem outro e faz algo misturado. Não é assim que a gente aprende até mesmo aqui no superior. Você vai vendo “olha, chegamos até aqui, aí esse deu essa contribuição aqui”. Então tem todo um espaço aqui que não é contado, então já está nesse sistema de suprimir muitas informações, e tem a questão do tempo, né, porque se a gente fosse contar também com muitos detalhes, quantos anos duraria um curso de Física? E no Ensino Médio também, como é que você acomoda tanta informação, já não dá pra dar muita coisa. São muitas variáveis envolvidas e aí termina que existe também essa questão dessa vertente epistemológica do ensino já trazer que são revoluções: vem um gênio aqui propõe isso e aí mudou a forma de pensar e todo mundo aceitou, e não teve nenhuma contestação, e aí veio outro gênio que inclui alguma coisa...

Episódio 5: Acomodação ou predição por teorias equivocadas

Os discentes foram também questionados acerca da possibilidade de duas hipóteses explicarem coerentemente o mesmo conjunto de dados. Sobre esse tópico, apenas A1 expressou-se de maneira a exibir elementos suficientes para permitir uma categorização.

Comparando com a resposta dada pelo aluno para o mesmo tema no estágio inicial, pôde-se perceber uma maior sofisticação expressa em sua fala. Se em sua resposta inicial o discente levava em consideração apenas a circunstância de que cientistas imersos em contextos distintos podem interpretar os dados de maneiras diferentes, agora incorpora à sua resposta a ideia de que cada modelo, enquanto descritor de aspectos limitados da natureza, podem ser corretos sob uma perspectiva, mas não por outra, o que explicaria o fato de que hipóteses erradas podem eventualmente incorrer em predições bem-sucedidas.

Eu acho que tem a ver com a pergunta que você acabou de fazer pra ela, se um mesmo fenômeno pode ser descrito por modelos diferentes, e eu vejo que sim, tanto é que isso acontece. Tudo depende das limitações que cada modelo vai ter. Por exemplo, dentro dos aspectos que dado modelo aborda, ele pode fazer predições até um certo limite, mas se você tenta passar desse limite, esse modelo já começa a ser falho, que é, por exemplo, o próprio átomo de Nicholson e se você olha, por exemplo, a Mecânica Clássica, aí é completamente possível um fenômeno ser descrito por mais de um modelo, né? Agora, justamente por causa disso, um modelo, ele tá errado a partir de uma certa perspectiva, mas ainda assim ele consegue prever coisas dentro da perspectiva da qual ele foi criado. Eu não vejo como isso seja uma contradição, entendeu? Tudo tem a ver da forma que você entende que é o modelo científico. (A1)

É possível que a maior riqueza percebida na maneira como expressa o pluralismo teórico seja devido às discussões recentes sobre o papel do erro científico, conjectura que se torna mais forte se considerarmos que usa, em sua fala, o caso de Nicholson como um exemplo. Para formular essa imagem de uma ciência teoricamente plural, o discente não fez uso explícitos das ideias, termos e conceitos presentes nos referenciais estudados, razão pela qual mantemos a classificação do estágio anterior, **adequada sem referência**.

Quadro 11 - Mapa de episódio V: acomodação de dados por mais de uma teoria/predição de hipóteses equivocadas.

Aspecto da NdC	Contexto	Duração	Falante	Comentário
Pluralismo teórico		01:07:52 – 01:07:56	P	Você acha que pode ter dois modelos corretos para explicar o mesmo fenômeno?
		01:07:56 – 01:08:19	A2	Eles podem ter aspectos corretos, mas diferentes, né? E que aí vão em algum momento culminar em alguma outra teoria, em um outro modelo que vão levar esses aspectos que tao corretos, que estão mais factíveis com experimentos, com a teoria mesmo.
		01:08:19 – 01:09:24	P	A gente viu que um modelo diferente, um modelo errado explica... Até aí acho não há nenhum grande sobressalto. Agora o que chama a atenção é a parte da predição, pelo menos para mim. Quando você vê que um modelo equivocado pode fazer uma predição correta, e como há uma certa insistência dos filósofos da ciência de que uma teoria bem feita tem que ser capaz de fazer predições, como é que vocês veem isso, de um modelo além de poder acomodar, (poder) fazer predição, no caso de Nicholson, prever a existência de uma linha, o comprimento de onda que ela tinha, quando ela é encontrada a taxa de erro é fisicamente desprezível. Por que que a ciência existe de tal maneira a permitir que isso ocorra. Por que é que modelos equivocados podem fazer predições corretas?
		01:09:24 – 01:10:28	A1	Eu acho que tem a ver com a pergunta que você acabou de fazer pra ela, se um mesmo fenômeno pode ser descrito por modelos diferentes, e eu vejo que sim, tanto é que isso acontece. Tudo depende das limitações que cada modelo vai ter. Por exemplo, dentro dos aspectos que dado modelo aborda, ele pode fazer predições até um certo limite, mas se você tenta passar desse limite, esse modelo já começa a ser falho, que é, por exemplo, o próprio átomo de Nicholson e se você olha, por exemplo, a Mecânica Clássica, aí é completamente possível um fenômeno ser descrito por mais de um modelo, né? Agora, justamente por causa disso, um modelo, ele tá errado a partir de uma certa perspectiva, mas ainda assim ele consegue prever coisas dentro da perspectiva da qual ele foi criado. Eu não vejo como isso seja uma contradição, entendeu? Tudo tem a ver da forma que você entende que é o modelo científico.

Episódio 6: Confiabilidade

Finalmente, a última pergunta motivadora da discussão final referia-se a possibilidade de se utilizar a falibilidade da ciência, isto é, o cometimento de erros, como um argumento em defesa da confiabilidade da ciência.

É possível perceber que a resposta de A3 ao tema confiabilidade se tornou mais sofisticada quando comparada com aquela expressa no estágio inicial. Agora, o discente atribui o fato de que a ciência possui mecanismos para corrigir seus erros como um aspecto definidor de confiabilidade. Além disso, o aluno relacionou a correção do método científico à identificação e remediação do erro, o que consideramos como um aspecto central para compreensão do papel epistêmico do erro científico. Como não houve efetiva incorporação de nenhuma das epistemologias, sua concepção é considerada **adequada sem referência**.

Eu acho que você pode usar na medida em que a gente confia de que quando esse erro aparece, a gente vai tentar corrigir ele, a gente vai tentar achar uma explicação pra ele. A ciência não seria confiável se o erro aparecesse e eu falo assim “não, a minha teoria tá certa, o fenômeno novo que tá errado, o fenômeno que tem que se adaptar a minha teoria”. Então, tipo assim, se o erro aparece, é porque significa que outra teoria tem que aparecer ou sua teoria tem que abarcar mais fenômenos. Então, o erro, ele é a principal, eu acho que ele é uma ótima forma de falar que a ciência é confiável porque depois, assim que esse fenômeno novo aparecer eu vou precisar corrigir o meu método. (A3)

Quanto à fala de A1, podemos argumentar que houve um distanciamento do empirismo expresso na fala observada no estágio inicial e uma aproximação de uma visão racionalista crítica. Se antes o discente atribuía à confiabilidade da ciência à adequação das “visões de mundo” dos cientistas aos “fenômenos” (que achamos justo interpretar como “dados”, “experimento” ou algo correlato), agora o aluno advoga que a ciência é fiável na medida em que cientistas reconhecem a falibilidade de suas teorias e as submetem a “*provas que vão tentar comprovar se (...) está errado ou não*”.

Pra mim, é justamente o reconhecimento do erro e autocorreção dele que dá a ciência a confiabilidade de que ela precisa porque se o erro... o erro vai existir porque somos humanos e somos suscetíveis ao erro. Quem faz ciência são humanos. Então, a partir do momento que você reconhece que é possível que você erre dentro da sua teoria, dentro das suas afirmações, e que você, por mais que você não queira, mas que você vai ter que se suceder a provas que vão tentar comprovar se você tá errado ou não, eu acho que a confiabilidade está justamente nisso. E quando você suprime o erro dentro de uma visão de ciência, você na verdade tá matando o que é a ciência em si, ao

menos da forma como a gente concebe a ciência hoje em dia. Então, pra mim, o erro é fundamental na confiabilidade e ele é fundamental também para que se ensine a ciência. (A1)

Apesar de não haver menções explícitas à comunidade científica, é razoável pensar que o discente considerasse que estas “provas” seriam dirigidas pelos pares do formulador da hipótese, o que está de acordo com o que aqui consideramos uma compreensão adequada deste aspecto da NdC. Além de adequada, parece-nos, a concepção expressa por A1 apresenta elementos marcadamente popperianos, uma vez que recorre a uma “racionalidade crítica” - sustentada na ideia de que, na ciência, conjecturas teóricas são escrutinadas coletivamente através de testes severos – para defender a credibilidade do conhecimento científico. Com efeito, a passagem “*você vai ter que se suceder a provas que vão tentar comprovar se você tá errado ou não*” pode ser lida como uma alusão à falseabilidade. Dito isso, consideramos a visão de A1 neste estágio da pesquisa como **evolutiva** para o tema confiabilidade. Além disso, é importante notar que o discente asseverou sua posição expressa anteriormente, sobre a importância de se incluir o erro científico no ensino de física.

A2, por sua vez, descreveu uma trajetória parecida, saindo de uma visão em que atribuía a credibilidade científica ao simples fato de que, de um ponto de vista estatístico, a ciência acerta mais que erra, para uma concepção em que reconhece que os erros são parte da ciência, que se mostra uma atividade confiável na medida em que sabe “lidar” com esses erros.

Eu acredito que o erro faz parte mesmo do processo científico e a grande questão é saber lidar com ele, saber – como também A3 falou – explicar o que é que tá errado. [Por exemplo, se] uma teoria, ela não conseguiu explicar, então [deve-se perguntar] o que é que tá errado? Aí volta, olha-se de novo aquela teoria, buscam-se outras explicações e assim ela vai avançando. Mas, tem sempre um fundamento de conectar aquilo que você já sabe com o que você está descobrindo por meio de uma explicação lógica e recorrentes experimentos que vão fundamentando justamente aquilo que você tá construindo racionalmente, teoricamente, lápis e papel. E aí o experimento vem ou para corroborar isso ou pra derrubar, então eu acho que o erro faz parte. Realmente, a ciência é uma grande tentativa e erro mas que tem, tem que ter aí [um olhar direcionado].(A2)

O argumento dado pelo discente em favor da fiabilidade da ciência está, segundo nossos critérios, mais próxima de uma concepção evolucionária, já que há uma ênfase na racionalidade, na conexão da teoria com os experimentos, na sucessão de experimentos e, por fim, na corroboração ou refutação de uma hipótese. Diante do exposto, consideraremos a concepção do aluno como adequada e com traços **evolutivos**.

Quadro 12 - Mapa de episódio VI: confiabilidade científica.

Aspecto da NdC	Contexto	Duração	Falante	Comentário
Confiabilidade de científica	Pra finalizar, a gente discutiu nessa intervenção, nesses três dias, sobre o erro científico, a relação do erro com o progresso da ciência. Vocês acham que o erro ainda é um “calcanhar de Aquiles” pra ciência. Vocês acham que a confiabilidade do que a ciência produz, que está sendo muito questionada atualmente, você acha que o fato da ciência ser vulnerável ao erro contribui para que ela seja colocada no canto e questionada? A gente pode utilizar o erro científico para defender a ciência? É possível utilizar a circunstância de que o conhecimento científico é vulnerável a erro para defender a confiabilidade da ciência ou isto é contraditório, isso que acabei de falar?	01:14:56 – 01:15:55	A3	Eu acho que você pode usar na medida em que a gente confia de que quando esse erro aparece, a gente vai tentar corrigir ele, a gente vai tentar achar uma explicação pra ele, tipo. A ciência não seria confiável se o erro aparecesse e eu falo assim “não, a minha teoria tá certa, o fenômeno novo que tá errado, o fenômeno que tem que se adaptar a minha teoria”. Então, tipo assim, se o erro aparece, é porque significa que outra teoria tem que aparecer ou sua teoria tem que abarcar mais fenômenos. Então, o erro, ele é a principal, eu acho que ele é uma ótima forma de falar que a ciência é confiável porque depois, assim que esse fenômeno novo aparecer eu vou precisar corrigir o meu método.
		01:15:55 - 01:15:59	P	Você tá fazendo uma analogia àquela tabela?
		01:16:00 – 01:16:00	A3	Sim!
		01:16:01 – 01:16:57	A1	Eu concordo totalmente. Pra mim, é justamente o reconhecimento do erro e autocorreção dele que dá a ciência a confiabilidade de que ela precisa porque se o erro... o erro vai existir porque somos humanos e somos suscetíveis ao erro. Quem faz ciência são humanos. Então, a partir do momento que você reconhece que é possível que você erre dentro da sua teoria, dentro das suas afirmações, e que você, por mais que você não queira, mas que você vai ter que se suceder a provas que vão tentar comprovar se você tá errado ou não, eu acho que a confiabilidade está justamente nisso. E quando você suprime o erro dentro de uma visão de ciência, você na verdade tá matando o que é a ciência em si, ao menos da forma como a gente concebe a ciência hoje em dia né? Então, pra mim, o erro é fundamental na confiabilidade e ele é fundamental também para que se ensine a ciência.
		01:16:58 – 01:17:25	P	Perfeito! Além desse mecanismo de auto correção que você citou, de dispor, de deixar vulnerável a prova, tem a questão que A3 comentou no primeiro dia que é o escrutínio da comunidade. Quando você erra, você publica seu erro, tem que mostrar o que você está produzindo e aí nesse momento você tem diversos olhares contrastante que são possíveis fontes de diagnóstico de seu erro
		01:17:25 – 01:18:22	A2	Eu acredito que o erro faz parte mesmo do processo científico e a grande questão é saber lidar com ele, saber – como também A3 falou – explicar o que é que tá errado. (Por exemplo, se) uma teoria, ela não conseguiu explicar, então (deve-se perguntar) o que é que tá errado? Aí volta, olha-se de novo aquela teoria, buscam-se outras explicações e assim ela vai avançando. Mas, tem sempre um fundamento de conectar aquilo que você já sabe com o que você está descobrindo por meio de uma explicação lógica e recorrentes experimentos que vão fundamentando justamente aquilo que você tá construindo racionalmente, teoricamente, lápis e

				papel. E aí o experimento vem ou para corroborar isso ou pra derrubar, então eu acho que o erro faz parte. Realmente, a ciência é uma grande tentativa e erro mas que tem, tem que ter aí...
		01:18:22 – 01:18:22	P	Um olhar direcionado.
		01:18:23 – 01:18:23	A3	Isso!

4.6.3 – Estágio final

Nesta subsecção, apresentaremos e discutiremos as respostas escritas dadas pelos discentes no último estágio da pesquisa. A última etapa da investigação consistiu na aplicação de um questionário, entregue no final da última aula da sequência didática, com o intuito de avaliar as concepções de NdC dos discentes ao final da proposta.

Pluralismo metodológico

A pergunta sobre o método científico visou observar o nível de compreensão dos discentes acerca do pluralismo metodológico característico da ciência. A resposta de A1 no estágio diferiu consideravelmente daquela dada no estágio inicial. Em ambas, o discente argumenta que, conquanto o método tradicional (observação, formulação de hipótese, testagem, modificação/validação, elaboração de teoria) talvez não seja o único, esta é a melhor maneira de investigar os fenômenos naturais. Entretanto, além desta formulação dada também durante a entrevista, agora o discente incorporou à sua resposta a asserção de que este método é, ele mesmo, mutável, afirmando que como esse “*método sofreu alterações ao longo da história até chegar onde está, (...) não é errado se pensar que ele ainda passará por alterações em momentos futuros*”. Reconhecemos no excerto elementos marcadamente popperianos, a saber, a compreensão de que a ciência evolui tentativamente incorporando mudanças ao seu método de investigação. Desse modo, consideraremos sua fala neste estágio da pesquisa como **evolutiva**.

Pode não ser o único método, mas são as etapas mais gerais da melhor forma que encontramos de fazer ciência até então. Esse próprio método sofreu alterações ao longo da história até chegar onde está, logo não é errado se pensar que ele ainda passará por alterações em momentos futuros. (A1)

Quanto a ao discente A2, como já havia apresentado, na entrevista, uma concepção **adequada**, porém sem incorporação de algum referencial epistemológico, era esperado que ao fim da intervenção o aluno usasse alguns dos conceitos estudados da Filosofia da Ciência para qualificar sua resposta, o que não aconteceu. A concepção analisada no estágio final mostra as mesmas qualidades encontradas na entrevista, a saber, problematização da anterioridade da experimentação em relação às teorias e reconhecimento da pluralidade metodológica como característica da ciência.

Não concordo que o método científico seja único e tão linear como é comumente divulgado. Há a necessidade de formulação de hipóteses e de testes, porém essa formulação não necessariamente sucede a observação, assim como a observação não é feita sem antes uma primeira hipótese do que é ou não esperado. Penso que a ciência é feita através de procedimentos científicos, tais quais como análises, repetições, aferição de erros, construção de modelos, etc. (A2)

Em sua resposta escrita, A3 foi mais lacônico e simplista que nas falas em que discutiu o método científico nos estágios anteriores da pesquisa. Tanto na entrevista quanto em discussões durante as aulas, o discente problematizara a rigidez e singularidade do método científico destacando a dimensão humana do trabalho científico, o que nos levou a considerar sua visão como adequada sem referência. No questionário, entretanto, o discente limitou-se a apontar aspectos da lógica formal, a dedução e a indução, como uma evidência da pluralidade de métodos, o que nos faz considerar a resposta nesta etapa como **não problematizada**.

Existem outros métodos que são adaptáveis para cada área científica, como o método dedutivo ou indutivo. (A3)

Pluralismo teórico

Os alunos também foram perguntados se acreditavam que mais de uma teoria pode explicar o mesmo conjunto de informações. Não foi percebida evolução na fala de A1 em comparação às respostas para o mesmo tema em estágios anteriores da pesquisa. Pelo contrário; no estágio inicial o aluno apontava a influência de fatores subjetivos, como o contexto em que o cientista está inserido, como causa de interpretações divergentes e, no estágio intermediário, destacava os limites de validade de teorias concorrentes para apontar que mesmo hipóteses equivocadas podem ser coerentes em algum nível. No estágio derradeiro, entretanto, o aluno limitou-se a reconhecer a possibilidade de interpretações dissonantes, sem discutir causas nem relacionar o pluralismo com o erro científico. Sua concepção neste estágio é, então, categorizada como **não problematizada**, já que, apesar de negar que a ciência seja neutra, não há uma efetiva problematização desta neutralidade. Mais uma vez, se mostra explícita a tendência em construir respostas escritas de uma maneira muito mais sintética que as orais.

Sim, tanto é que um único fenômeno pode ser modelado de diferentes formas por diferentes cientistas em um mesmo período da história, como foi o

exemplo estudado na intervenção dos modelos atômicos de Bohr e Nicholson.
(A1)

Pelos mesmos motivos expostos acima, a resposta dada por A2 mantém a concepção **não problematizada** identificada para este discente no primeiro estágio da pesquisa:

Acredito que sim, o mesmo conjunto de fatos pode resultar em conclusões diferentes, e isto por conta dos diferentes pressupostos adotados, método de análise dos dados, erros não identificados em diferentes abordagens, correlações importantes não identificadas, etc. A óptica geométrica, por exemplo, pode ser explicada tanto pela luz como onda, como pela luz como partícula. (A2)

A resposta de A3, por sua vez, apesar de não fazer menção à possibilidade de que teorias equivocadas acomodem corretamente dados experimentais, o que era uma das qualidades esperadas para esta pergunta, destaca a influência dos fatores externos na prática científica, sendo então categorizada como **adequada sem referência**.

É possível, pois a ciência também é feita por interpretações e fatores externos ao método como influencia, posição sócio-econômica e afins: por exemplo, as teorias da evolução de Lamarck e Darwin. Os dois propuseram que haveria uma evolução das espécies, mas ela se daria de maneira diferente em cada teoria. (A3)

Confiabilidade

A última pergunta do questionário pede que os alunos desenvolvam um argumento em defesa da confiabilidade da ciência diante de visões céticas que tendem a enxergar no cometimento de erro uma evidência da fragilidade dos enunciados científicos. Com uma resposta explicitamente **evolutiva**, A1 argumentou que a confiabilidade reside precisamente no fato de que a ciência dispõe de ferramentas para corrigir seus erros, notadamente, a submissão de seus resultados a testes severos que podem reformular a teoria original ou descartá-la. Ainda segundo o discente, este processo é garantidor da evolução do conhecimento científico.

A confiabilidade da ciência está em justamente reconhecer seus erros e os utilizar como um instrumento de autocorreção. Dessa forma, para que algo seja bem estabelecido cientificamente, isso significa que tal teoria teve de passar por severos testes e se manteve confiável diante deles. Caso não o tivesse feito, ela seria descartada ou reformulada, contribuindo para a evolução da ciência. Ou seja, o que se é aceito, é porque adquiriu status suficiente para tal, e se não o fosse, evoluiria de alguma forma para que se tornasse. (A1)

Sobre este tema, o discente possuía uma visão que consideramos como não problematizada no início da pesquisa, cuja evolução foi observada durante a estágio intermediário, como evidencia o Quadro 13, e confirmada no estágio final. É possível perceber uma qualificação de seu argumento após a participação na proposta. A referência à capacidade da ciência em reconhecer seus erros, a menção a testes severos e a descrição do desenvolvimento científico como um processo evolutivo, podem ter sido potencializados com as discussões que ocorreram nas aulas.

Similarmente, A2 deu uma descrição satisfatória de como a fiabilidade da ciência é atingida na medida em que o trabalho de um cientista é avaliado criticamente por outros. Um traço de sua fala que identificamos como popperiano – e, portanto, **evolutivo** segundo nossos parâmetros de análise – é a crença de que a confiabilidade de uma teoria cresce junto com o número de tentativas de refutação a que foi submetida. Desse modo, sua visão nesta etapa é considerada como **evolutiva** para o tema confiabilidade. Se considerarmos que, no estágio inicial, o discente atribuía a fiabilidade da ciência a “probabilidade de acertos muito alta”, torna-se razoável argumentar que a qualificação de sua defesa da ciência foi influenciada pela sua participação nas aulas.

O conhecimento científico é sujeito a modificações, pois tem por objetivo descrever a realidade, porém, devido a limitações teóricas e experimentais essas descrições não são 100% acuradas. Ainda assim, devido a maneira como se estrutura, o conhecimento científico tem confiabilidade na medida que prevê e explica coerentemente fenômenos naturais, passa pelo escrutínio da comunidade científica e pelos avanços teóricos e experimentais (tecnológicos). As objeções a um determinado corpo teórico têm também sua importância, pois pode demonstrar falhas na teoria vigente ou torna-la ainda mais confiável, se esta conseguir responder as objeções de maneira satisfatória. (A2)

Finalmente, também reconhecendo a dinâmica de severas avaliações bilaterais na ciência, A3 apresenta uma concepção adequada da confiabilidade, sem, entretanto, fazer uso explícito de elementos que nos permitam categoriza-lo epistemologicamente. Segue, portanto, sua concepção, categorizada como **adequada sem referência**.

A ciência é confiável justamente por ser sujeita a correções. A possibilidade de contestação de teorias e modelos permite que qualquer um possa fazer essa contestação, desde que essa pessoa também coloque a sua contestação a prova. (A3)

Além dos três aspectos de NdC que são o objeto central de nossa análise, os discentes também foram questionados diretamente (Questão 1 – Apêndice B) se acreditavam que o erro científico seria importante para o conhecimento científico. As respostas dadas foram as seguintes:

O erro é essencial para a construção do conhecimento científico. A ciência é feita por humanos e humanos são suscetíveis ao erro, logo é inevitável que se cometa erros nessa área. A questão é que o próprio método científico prevê essa situação e a trata de maneira autocorretiva. Assim, o conhecimento científico está baseado na melhoria, aperfeiçoamento, correção de hipóteses de teorias incorretas a priori (A1)

Sim, o erro científico deve ser divulgado a fim de conceder um entendimento mais completo do que é e de como funciona a ciência. De maneira mais fundamental, o erro esclarece o tópico estudado pois aumenta o conhecimento sobre como não é possível explicar determinado fenômeno, além de possibilitar a consciência de raciocínios equivocados. (A2)

O erro científico é importante para a ciência, na medida que cada teoria e modelo, mesmo que errado, dá a comunidade novas ideias, interpretações, além do fator de autocorreção dos métodos. (A3)

Foi possível classificar as respostas dos discentes segundo os níveis de aprendizagem do erro científico proposto por Allchin (2012), apresentados no Capítulo 2. Como A1 mostrou compreender que erros fazem parte do desenvolvimento da ciência (Nível 1) e que podem ser identificados e remediados por um processo de autocorreção (Nível 2), concluímos que este aluno atingiu, no mínimo, dois dos níveis de aprendizagem do papel epistêmico do erro científico.

A2 aludiu à importância de se publicizar os erros cometidos a fim de se aumentar o entendimento sobre um determinado tópico, evidenciando uma compreensão do papel da comunidade científica no processo de autocorreção da ciência (Nível 3), além de demonstrar compreender que, ao fim e ao cabo, um enunciado científico equivocado é um conhecimento negativo, isto é, o conhecimento do erro produz a consciência do que não fazer, de qual método não seguir, de que maneira não realizar um experimento etc. O discente reconhece, portanto, que hipóteses equivocadas podem ser produtivas (Nível 4). Além disso, há um implícito reconhecimento de que os erros são inerentes ao trabalho científico (Nível 1).

Em uma resposta mais curta, A3 apenas atribui ao erro uma função no progresso científico, o que é suficiente para presumirmos que atingiu o Nível 1.

Não foram observadas nas respostas ideias relativas ao último nível de aprendizagem do papel do erro (Nível 5), a saber, “compreender que os processos que desembocam em erro científico ou em grandes descobertas, não raro, são os mesmos”.

4.6.4 – Avaliação da proposta

Nesta secção avaliaremos criticamente a nossa proposta didática, analisando quais lições metodológicas podem ser extraídas de seus resultados. Tentaremos construir uma visão global da evolução das concepções dos discentes ao longo dos estágios de nossa proposta de intervenção. Alguns dos resultados já foram comentados nas secções anteriores, mas serão aqui revisitados em favor de uma visão mais geral. A efetividade desta proposta deve ser uma medida do nível de alcance dos objetivos de aprendizagem, a saber, a compreensão, por parte dos discentes, de aspectos da NdC associados ao erro científico. O Quadro 13 apresenta uma síntese da evolução dos alunos ao longo dos três estágios da sequência didática. Uma primeira conclusão que pode ser tirada dos dados é que a evolução da concepção dos três temas não ocorreu de maneira homogênea. Como evidenciado, o tema confiabilidade foi o único que apresentou efetiva progressão de compreensão para todos os três participantes.

No estágio inicial, A1 atribuía a confiabilidade a um processo de autocorreção “previsto pelo próprio método científico”. Esta autocorreção, em suas palavras, consistia no fato de que, na ciência, diferente do que ocorre em atividades como a religião, era preciso adequar a visão de mundo aos dados. Essa visão empirista do discente foi problematizada no primeiro episódio do estágio intermediário e é possível que o debate com a opinião de A2 tenha influenciado no refinamento das respostas dadas por A1 em momentos posteriores. No episódio V, o discente formulou um argumento mais sofisticado para defender a fiabilidade da ciência em face do cometimento de erros, foi capaz de fazer menção aos testes severos a que hipóteses são submetidas, o que nos levou a concluir que o aluno incorporara ao seu repertório conceitual ao menos parte do vocabulário popperiano ou evolucionário. Nesse caso em específico, não só o discente apresentou ao final da pesquisa uma visão de NdC considerada adequada, como o fez fazendo uso de conceitos da Filosofia da Ciência, o que é precisamente o objetivo de aprendizagem desta proposta.

Quadro 13 - Evolução das concepções de NdC dos participantes da pesquisa.

Aluno	Tema	Concepções no estágio inicial	Concepções no estágio intermediário					Concepções no estágio final
			Episódio I	Episódio II	Episódio IV ⁵²	Episódio V	Episódio VI	
A1	Pluralismo metodológico	Não problematizada	Não problematizada	Adequada sem referência				Evolutiva
	Pluralismo teórico	Adequada sem referência			Adequada sem referência	Adequada sem referência		Não problematizada
	Confiabilidade	Não problematizada					Evolutiva	Evolutiva
A2	Pluralismo metodológico	Adequada sem referência		Adequada sem referência				Adequada sem referência
	Pluralismo teórico	Não problematizada			Adequada sem referência	----- -		Não problematizada
	Confiabilidade	Não problematizada	Adequada sem referência				Evolutiva	Evolutiva
A3	Pluralismo metodológico	Adequada sem referência	Adequada sem referência	-----				Não problematizada
	Pluralismo teórico	Não problematizada			Adequada sem referência	----- ---		Adequada sem referência
	Confiabilidade	Não problematizada					Adequada sem referência	Adequada sem referência

⁵² Como dissemos, o episódio III (perspectiva epistemológica), por não se referir a nenhum dos aspectos da NdC que são nosso objeto central de análise, não foi incluído neste quadro, destinado a conferir uma imagem da evolução das concepções daqueles temas.

Uma evolução similar pôde ser percebida em A2. No início da pesquisa, o discente argumentou, em linhas gerais, que a ciência era confiável porque, comparativamente, as taxas de erro são muito menores que as de acerto. Conquanto verdadeiro, certamente trata-se de um argumento que poderia ser melhorado. E isso pareceu ocorrer já nos primeiros minutos da sequência, durante o primeiro episódio. Se opondo à visão de método rígida e universal defendida por A1, A2 argumentou que a autocorreção da ciência se devia muito mais à comunidade científica que ao método. Não é possível defender que, com apenas alguns minutos de intervenção, alguma influência tenha sido operada a ponto de produzir um argumento tão mais qualificado que o apresentado na fase anterior. Antes, nos parece que ao instituir um ambiente dinâmico, propício ao debate entre posições antagônicas, estimula-se que o discente formule argumentos mais sofisticados para defender sua posição ante as colocações do “adversário”. O discente apresentou uma visão que consideramos como evolutiva no estágio intermediário, que foi preservada na etapa derradeira. Quanto ao discente A3, não foi percebida, nas suas respostas para o tema confiabilidade, incorporação de nenhum dos referenciais epistêmicos estudados. Houve, entretanto, uma pequena evolução de sua visão sobre o tema, uma vez que, no último estágio da pesquisa, o discente passa a considerar que a fiabilidade da ciência deriva da sujeição dos produtos científicos à correção, aspecto associado à coletividade que não foi mencionado no estágio inicial.

Quanto ao tema pluralismo teórico, em sua resposta no estágio inicial, A1 afirmou que o contexto em que o pesquisador está inserido influencia a maneira como ele “enxerga o fenômeno”, podendo, portanto, haver duas explicações igualmente coerentes para o mesmo conjunto de dados. Ressaltou que estas interpretações dissonantes, entretanto, deveriam passar pelo crivo do método científico. Argumentamos que esta resposta era compatível com a visão de ciência que adotamos nesta pesquisa. Durante o estágio intermediário, ao comentar sobre o trabalho de Nicholson (episódio IV), defendeu um ensino de ciências que levasse em conta não apenas descobertas pontuais, mas o processo que viabilizou-lhes. Pouco depois (episódio V), afirmou que o fato de que teorias equivocadas podem acomodar e prever a ocorrência de fenômenos naturais se explica pela circunstância de que teorias possuem limites explicativos, domínios de validade. Apesar de ter formulado concepções adequadas durante os dois primeiros estágios da investigação, o questionário final foi respondido de maneira lacônica, sem exibir as qualidades observadas nos estágios anteriores, razão pela qual pareceu haver uma “involução” da qualidade de sua fala no estágio derradeiro.

Quanto as concepções de A2 sobre pluralismo teórico, este apresentou uma visão não problematizada no estágio inicial, que se reafirmou no final. No episódio IV, entretanto, esboçou uma crítica às metodologias de ensino tradicionais, que estariam fundamentadas numa

visão elitista segundo a qual o progresso depende de apenas alguns poucos gênios. Consideremos esta visão como um reconhecimento da pluralidade teórica da ciência.

A3, por sua vez, iniciou a intervenção apresentando, na entrevista, uma forte crítica à neutralidade da ciência, apontando que a autoridade de cientistas e interesses econômicos seriam proeminentes na escolha entre hipóteses rivais. Apesar de coerente, não vimos em sua visão um balanceamento entre aspectos externos e internos, e por esse motivo consideramos sua visão, àquela altura, não problematizada. No episódio IV, o discente problematizou a maneira tradicional como se dá o ensino de modelos atômicos no ensino médio, sugerindo que uma visão mais processual e menos truncada, que revelasse aspectos geralmente inexplorados da gênese do modelo atômico de Bohr, poderia ser vantajosa. Ao final da pesquisa, pôde-se perceber uma melhoria, ainda que tímida, de sua posição inicial, traduzida no fato de que o aluno reduziu a intensidade da crítica à neutralidade científica, apontando que a ciência “*também é feita de influência e fatores externos ao método*”.

Quanto ao tema método científico, com exceção de A1, não foram observadas efetivas mudanças nas concepções dos alunos. A2 manteve a sua concepção adequada identificada no estágio inicial da entrevista, não incorporando na resposta final os referenciais epistemológicos estudados. As concepções de A3, como já discutimos, quando expressas oralmente foram mais completas que aquelas encontradas no questionário final, o que explicaria a aparente “involução” de sua visão relativa a este tema. Quanto a A1 apesar de ter mantido, em parte, sua crença em um método rígido e universal - o que está de acordo com resultados encontrados por outros pesquisadores que relatam as dificuldades em modificar concepções empírico-indutivistas enraizadas em graduandos de ciências naturais (TEIXEIRA et al., 2001) – foi possível perceber uma incorporação a sua resposta de alguns aspectos conceituais popperianos.

Potencialidades

Dos três aspectos da NdC avaliados nesta proposta, o tema “confiabilidade científica” foi o que apresentou melhores resultados. Diante da prevalência de respostas evolutivas para este aspecto, é possível argumentar que um referencial epistemológico evolucionário seja adequado para se discutir a origem da fiabilidade dos enunciados científicos. A analogia darwinista parece de fato destacar aspectos como a coletividade e a severidade das seleções de hipóteses, condicionando a confiabilidade da ciência tanto à dimensão humana e social quanto à dimensão técnica e conceitual, o que contribui para uma melhor compreensão de como a ciência angaria confiança a despeito dos erros cometidos. Em linhas gerais, para este tema, os discentes tanto evidenciaram compreensão de alguma dimensão do papel epistêmico do erro

científico, como incorporaram traços de um dos referenciais de Filosofia da Ciência estudados, de modo que podemos afirmar que ao menos parte dos objetivos de aprendizagem da proposta foi alcançado.

Houve dois momentos da intervenção didática em que discussões frutíferas, não diretamente relacionadas aos temas de NdC investigados, tomaram corpo. No episódio III, os discentes foram perguntados qual modelo epistêmico seria mais apropriado para descrever o episódio histórico estudado. Um dos participantes, A1, defendeu que o período apresentava características evolutivas; por exemplo, argumentou que poderíamos considerar que os modelos de Nicholson e Bohr seriam variantes que partilhariam um ancestral comum, e que uma visão evolucionária seria mais apropriada para caracterizar o conhecimento científico. Distintamente, A2 e A3 reconheceram no episódio histórico tanto elementos que corroboram uma analogia selecionista quanto traços que o aproxima da visão kuhniana. Tanto A2 quanto A3 se afastaram da ideia de que uma revolução científica tenha ocorrido no período. Entretanto, ambos fizeram uso do vocabulário kuhniano: A3 argumentou que o episódio exibía características de um período de crise, enquanto A2 asseverou que as ideias emergentes de Einstein representavam um rompimento com a Física Clássica. Percebeu-se que a filosofia da ciência foi mais substancialmente evidenciada em suas falas neste episódio da pesquisa, ou seja, quando os participantes foram diretamente inquiridos a respeito de sua “preferência” epistemológica. A “incorporação indireta” da filosofia da ciência, observada em suas respostas dadas aos temas específicos de NdC, foi notadamente mais tímida. A razão para isso é que fazer uso do arcabouço conceitual de uma teoria do conhecimento para responder a uma pergunta sobre o funcionamento da empresa científica demanda do discente uma capacidade de articulação mais complexa do que a necessária para responder a questão sobre a sua “preferência”. Ao instituímos como um dos objetivos de aprendizagem a incorporação dos referenciais epistemológicos estudados às respostas sobre NdC, estávamos cientes de que os resultados obtidos deveriam ser compatíveis com o curto tempo destinado à apresentação e discussão destas teorias do conhecimento. Importava-nos, não a observação de respostas sofisticadas, que exibissem amplo domínio das filosofias de Popper e Kuhn, mas, antes, a constatação de que esta incorporação é possível mesmo em uma sequência didática curta, o que nos autoriza a intuir que resultados mais robustos podem emergir de uma versão ampliada e melhorada desta proposta.

No episódio IV, o objetivo era destacar as visões sobre pluralismo teórico dos discentes ao perguntá-los sobre qual importância atribuíam a John William Nicholson no desenvolvimento do período. Entretanto, outras discussões emergiram, sobre o currículo e ementa de cursos de física tanto em nível médio quanto superior. A1 argumentou que haveria uma visão

revolucionária do conhecimento científico subjacente à maneira como o átomo de Bohr é ensinado nas escolas, uma perspectiva que, segundo ele, tendia a omitir contribuições relevantes como a de Nicholson. Os demais participantes concordaram que seria didaticamente vantajoso a discussão de modelos alternativos como o de Nicholson, mas atentaram para o fato de que os currículos já são sobrecarregados com conteúdos, com pouco espaço para adições. Tratando-se de professores em formação, consideramos notável que um dos subprodutos de uma proposta que investigue as contribuições de teorias equivocadas para o progresso seja a reflexão acerca das vantagens e dificuldades de se levar discussões sobre o erro científico para sala de aula. Além disso, neste episódio da pesquisa, ao fazerem críticas à maneira tradicionalmente truncada de se lecionar o átomo de Bohr, os discentes acabaram problematizando uma visão elitista e individualista da ciência e uma visão ahistórica e aproblemática do conhecimento científico.

Outro potencial associado a nossa proposta diz respeito a sua compatibilização com disciplinas que façam uso de uma abordagem contextual. No caso da disciplina onde a sequência foi aplicada, os conteúdos relativos à óptica e física moderna são abordado de uma maneira historicamente estruturada, seguindo a cronologia da gênese e desenvolvimento dos conceitos e leis físicas estudadas. Os estudos sobre o desenvolvimento da espectroscopia e sua relação com o desenvolvimento de modelos atômicos se encaixou de maneira suave a esta cronologia. Outro ponto de compatibilidade foi o uso, na primeira aula da sequência, de um experimento demonstrativo para estimular a discussão do tema, uma metodologia com a qual os discentes já haviam se habituado ao longo do semestre.

Limites

Primeiramente, é importante destacar a decisão metodológica relativa ao fato de que o próprio autor deste trabalho conduziu a aplicação da sequência didática e posterior análise dos resultados. A controvérsia em relação a este tipo de decisão diz respeito à possibilidade de interferência nos resultados das pesquisas, especialmente quando se leva em consideração as crenças dos pesquisadores acerca da ciência e das práticas em sala de aula. Naturalmente, os resultados desta pesquisa devem ser vistos à luz dessa controvérsia (PENA 2015).

Algumas decisões metodológicas podem ser melhoradas em aplicações futuras. Como já discutimos, via de regra, as concepções expressas oralmente no estágio intermediário foram mais bem elaboradas do que aquelas escritas no questionário final. Assim, para um mesmo tema, houve “involuções”: discentes que apresentaram uma visão adequada no estágio intermediário deram uma resposta não problematizada no estágio seguinte. Mesmo fazendo uso de uma adaptação do questionário desenvolvido por Porra et al. (2011), que visou justamente

diminuir as dificuldades apresentadas pelo VNOS-C, identificamos no nosso questionário adaptado algumas limitações que as autoras atribuem ao VNOS-C, notadamente, o fato de que os discentes “acabam tentando responder [as questões] rapidamente, sem muita preocupação com o que estão escrevendo” (PORRA et. al, 2011).

Ainda sobre o questionário final, durante o processo de análise de dados ficou claro que a posição da questão “Você considera o erro importante para o conhecimento científico? Por quê?” como primeira do questionário não se mostrou apropriada: esta deveria ser a última pergunta, e não a primeira. Esta questão tem um caráter genérico e sua resposta pode conter elementos das outras três perguntas, como se, na última resposta a ser dada, o discente pudesse sintetizar de maneira geral o que entende por papel epistêmico do erro científico.

É importante destacar também que, se por um lado o número reduzido de alunos foi suficiente para observar alguns resultados positivos que sinalizam para a viabilidade da proposta, por outro é indiscutível que, em se tratando de uma proposta de intervenção alicerçada no debate, nas discussões, em interações discursivas como metodologia de aprendizagem, uma quantidade maior de alunos criaria condições para que os aspectos de NdC analisados fossem problematizados de uma maneira mais profunda e insistente. É possível que, com um maior número de alunos e conseqüente maior dinâmica na sala de aula, momentos como o evidenciado no episódio I (quando A3 problematizou a visão rígida de método de A1) sejam mais frequentes.

Além disso, acreditamos ser factível produzir uma versão ampliada desta proposta, com um maior tempo de intervenção, em que o episódio histórico não se atenha apenas as contribuições dadas por Nicholson, mas que investigue de maneira mais profunda o período de recepção da teoria atômica de Bohr, destacando as limitações da teoria em seus anos iniciais, as críticas recebidas e os diversos modelos alternativos. Esta abordagem ampliada pode tanto incluir os modelos de Hantaro Nagaoka e Jean Perrin, como aqueles que emergiram como uma resposta clássica à investida quântica do físico dinamarquês. Com um maior tempo de intervenção, os referenciais epistemológicos podem ser apresentados de maneira mais densa. Além disso, pode ser uma oportunidade de se discutir de maneira mais insistente os aspectos da NdC que foram objeto deste estudo, bem como incluir outros que foram tangencialmente trabalhados em nossa pesquisa, tais como a mutabilidade, a anterioridade da teoria em relação à observação, as relações da ciência com tecnologia e sociedade, o papel da experimentação, entre outros. Dessa forma, é possível que um tempo de intervenção maior tanto amplifique as possibilidades didáticas aqui diagnosticadas, como permita mitigar as limitações apresentadas, pois, como assevera Teixeira e colaboradores (2012), apesar de não haver um laço de causalidade entre tempo de intervenção e qualidade da pesquisa, é razoável afirmar que quanto maior o tempo de intervenção maiores as possibilidades da produção de efeitos a serem investigados.

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa, discutimos o papel desempenhado por teorias equivocadas e por figuras menores para o desenvolvimento da ciência. Estudamos como levar a problemática da relação entre erro e progresso científico para sala de aula na forma de uma sequência didática, que foi desenvolvida, implementada e avaliada. Partimos de uma hipótese que consideramos razoável, e que é compartilhada por alguns notáveis historiadores da ciência, a de que o processo de confecção de uma das mais importantes obras da história da Física, *Sobre a Constituição de Átomos e Moléculas*, de Niels Bohr, foi nuclearmente influenciado pela teoria atômica de um cientista desconhecido, o astrofísico inglês John William Nicholson.

Observou-se, a partir do levantamento bibliográfico realizado e apresentado na Introdução, que a ausência de menções ao nome de Nicholson evidenciada na maioria dos materiais didáticos (sejam de física ou química, no ensino básico ou superior) que versam sobre a arquitetura intelectual do período hoje conhecido como Antiga Teoria Quântica, estava associada a visões de ciência que poderiam ser consideradas como “inadequadas” ou “ingênuas” por defensores de uma Natureza da Ciência descrita em função de tópicos consensuais. A sub-representação histórica de Nicholson seria então apenas um sintoma de uma imagem tradicional de ciência que tende a suprimir o erro, a tentatividade, a coletividade, o papel do imprevisto e da criatividade.

O início do século passado foi marcado por um período de tensão entre uma Física Clássica que parecia dar sinais de ter encontrado o seu limite de validade no mundo microscópico e uma ascendente Teoria Quântica, que carecia de base conceitual sólida, mas se mostrava cada vez mais promissora. O panorama era de efervescência intelectual, com rápidos avanços experimentais e muitos modelos explicativos da matéria sendo propostos e concorrendo entre si. É contra este pano de fundo de um debate científico intenso que as teorias atômicas de Nicholson e Bohr emergem. Em períodos históricos em que há uma concorrência entre hipóteses rivais, algumas características da empresa científica podem ser didaticamente ilustradas, como por exemplo, a pluralidade de metodologias usadas por cientistas em suas investigações, a circunstância de que hipóteses diferentes podem explicar as mesmas evidências experimentais, e os processos de avaliação conduzidos pela comunidade científica pelos quais uma hipótese precisa passar para ser aceita por esta comunidade.

Argumentamos que estes traços epistêmicos da ciência poderiam ser amplificados através das lentes de referenciais da filosofia da ciência contemporânea, mais especificamente, das teorias do conhecimento de Thomas Kuhn e Karl Popper. As obras destes dois filósofos são os fundamentos das epistemologias, respectivamente, revolucionária e evolucionária, as quais,

a partir de uma visão intencionalmente dicotômica, puderam estimular, na sala de aula, um debate sobre a tensão racionalismo *versus* relativismo. Através deste prisma epistemológico direcionado para nosso episódio histórico, foi possível projetar tanto a dimensão humana, subjetiva e coletiva da ciência, quanto seus aspectos lógicos, técnicos e procedimentais.

Para discutir o papel do erro científico, uma sequência didática foi implementada em uma disciplina do curso de Física da Universidade Federal da Bahia, com o objetivo de investigar a evolução da compreensão de aspectos da NdC associados ao erro científico. A proposta didática contou com a participação ativa dos discentes, que tanto se envolveram nos debates, como fizeram apresentações dos conteúdos trabalhados, instituindo, assim, um ambiente de interação discursiva que viabilizou o registro e coleta de dados.

A análise destes dados nos permitiu concluir que uma abordagem historiográfica em que se protagonize as contribuições dadas por figuras menores para o desenvolvimento da ciência tem o potencial de auxiliar na compreensão de aspectos da ciência associados ao erro científico. De acordo com os resultados, o tema confiabilidade foi o que melhor foi compreendido pelos discentes durante a proposta. A compreensão dos temas pluralismo teórico e pluralismo metodológico, por outro lado, se deu de maneira parcial e menos evidente. Pôde-se perceber também que os discentes incorporaram ao seu vocabulário alguns dos elementos conceituais das epistemologias estudadas, fato que se mostrou mais evidente quando foram diretamente perguntados sobre qual modelo epistemológico melhor descreveria o progresso da ciência. O uso destes conceitos para responder a questões sobre a Natureza da Ciência, entretanto, foi consideravelmente mais tímido e se concentrou no tema “confiabilidade científica”. Os dados sugerem, portanto, que a discussão de traços da ciência como a coletividade, o escrutínio de hipótese, os processos de testagem, a intercomunicação entre cientistas, enfim, aspectos fiadores da confiabilidade da ciência, pode encontrar uma rota pedagógica frutífera em uma fundamentação evolucionária.

Novas aplicações desta intervenção poderão apresentar melhores resultados na medida em que: um maior número de aspecto da NdC da ciência seja contemplado; um maior tempo de intervenção seja utilizado; e uma quantidade maior de alunos e conseqüente maior robustez de dados se faça disponível. Além disso, a avaliação crítica da proposta ora apresentada no capítulo anterior permitiu identificar decisões metodológicas iniciais que se mostraram equivocadas e que deverão ser revisitadas em versões futuras.

Em suma, o fato de que aprendemos com os nossos erros é uma circunstância promissora para o ensino de ciências!

REFERÊNCIAS

- ABRANTES, Paulo. O Programa de uma Epistemologia Evolutiva. **Revista de Filosofia, Curitiba**, v. 16 n.18, p. 11-55, jan./jun. 2004.
- AGUIAR, Túlio Roberto X. de. Tentativa e Erro: O que isto pode nos Ensinar sobre o Conhecimento Científico? **Cognitio**, São Paulo, v. 12, n. 1, p. 11-19, jan./jun. 2011.
- ALLCHIN, Douglas. Teaching the Nature of Science through Scientific Errors. **Science Education** Vol. XX, No. X, pp. 1–23 (2012).
- ARIZA, Rafael Porlán; HARRES, João B. S. A epistemologia evolucionista de Stephen Toulmin e o ensino de ciência. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 19, n. especial: p: 70-83, jun. 2002.
- BACHELARD, Gaston. **A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.
- BAILY, Charles. Early atomic models – from mechanical to quantum (1904–1913). **The European Physical Journal H**. EDP Sciences, Springer-Verlag, 2012.
- BAGDONAS, Alexandre. **Controvérsias envolvendo a natureza da ciência em sequências didáticas sobre cosmologia**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2015.
- BASSO, A. C.; PEDUZZI, L. O. Q. O átomo de Bohr em livros didáticos de física: interagindo com autores. In: **ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM ENSINO DE CIÊNCIAS, IV**. Bauru: 2003.
- BASSO, A. C. **O átomo de Bohr no nível médio: uma análise sob o referencial lakatosiano**. Dissertação de Mestrado. Florianópolis -SC, Brasil: 2004.
- BEJARANO, Nelson Rui; ADURIZ-BRAVO, Augustín; BONFIM, Carolina S. Natureza da Ciência (NOS): para além do consenso. **Ciênc. Educ.**, Bauru, v. 25, n. 4, p. 967-982, 2019.
- BOGDAN, Robert; BIKLEN, Sari. **Investigação qualitativa em educação**. Portugal: Porto, 1994.
- BOHR, Niels. **Niels Bohr – Session III**. (Entrevista concedida a Thomas Kuhn, Leon Rosenfeld, Aage Petersen e Erik Rudinger), 1962. Disponível em <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4517-3>
- BOHR, Niels. The Rutherford Memorandum (1912). In: ROSENFELD, Leon (editor). **Niels Bohr Collected Works**. V.2 Amsterdam: North – Holland Publishing Company, 1981.
- BOHR, Niels. **Sobre a constituição de átomos e moléculas**. Reimpressão das memórias de 1913 publicadas na Philosophical Magazine com introdução de L. ROSENFELD. Trad. Egídio Namorado. Lisboa: Calouste Gulbenkian, 3ª ed., 1989.

BRADIE, Michael. **Assessing Evolutionary Epistemology**. *Biology & Philosophy*, 1: 401–459, 1986.

BRAGA, Marco; GUERRA, Andreia; REIS, Jose. R. The Role of Historical-Philosophical Controversies in Teaching Sciences: The Debate Between Biot and Ampère. **Sci & Educ**. 21:921–934, 2012.

BRAGA, J. P.; FILGUEIRAS, C. A. L. O centenário da teoria de Bohr. **Quim. Nova**, Vol. 36, No. 7, 1073-1077, 2013.

CEDRAN, D. P.; LINO A.; Neves, M. C. D. y KIOURANIS, N. M. M. (2017). A natureza da Ciência e o erro: reflexões sobre o conto “Ótima é a Água” por alunos de Ensino Médio. Góndola, **Enseñ Aprend Cienc**, 12(1),43-56. doi: 10.14483/udistrital.jour.gdla.2017.v12n1.a3.

CLARK, Imogen. The Gatekeepers of Modern Physics Periodicals and Peer Review in 1920s Britain. **Isis**, Vol. 106, No. 1, pp. 70-93, 2015.

CONDÉ, Mauro Lúcio L. **Um Papel para a História: o Problema da Historicidade da Ciência**. Curitiba: Ed. UFPR, 2017.

CONDÉ, Mauro Lúcio L. Mutações no Estilo de Pensamento: Ludwig Fleck e o Modelo Biológico na Historiografia da Ciência. **Revista de Filosofia Moderna e Contemporânea**, Brasília, v.6, n.1, p. 155-186, jul. 2018

COSTA, Conceição Sousa **O erro no processo de ensino-aprendizagem de ciências no nível fundamental**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, 2009.

DARRIGOL, Oliver et al. (eds.), **Niels Bohr, 1913–2013**. Progress in Mathematical Physics, vol 68, Springer International Publishing Switzerland 2016

DARWIN, Charles. 1964 [1859]. **On the Origins of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life** (Londres: John Murray). Reimpresso (Cambridge, MA: Harvard University Press).

DAY, Charles. A Tale of Two Pappers. **Physics Today**. <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.5.010324/full/> Acesso em 09/03/2020.

DE CARO, Mario; MACARTHUR, David. Introduction: the nature of naturalism. In: **Naturalism in question**. Cambridge, Mass: Harvard University Press, 2004. p. 1–17.

DIAS, Elizabeth A. A dimensão histórica e social da ciência em Popper. **Argumentos**, ano 10, n. 19 - Fortaleza, jan./jun. 2018.

FERREIRA, Marcello; SILVA, André Luís S. da; VERDEAUX, Maria de F. da Silva. Progresso e não determinismo científicos, a partir de conceitos-chave da epistemologia de Thomas Kuhn. **Conjectura: Filos. Educ.**, Caxias do Sul, v. 23, n. 2, p. 244-266, maio/ago. 2018.

FERNÁNDEZ, I.; GIL-PÉREZ, D.; CARRASCOSA, J.; CACHAPUZ, A.; PRAIA, J. **Visiones deformadas de la ciencia transmitidas por la enseñanza. Enseñanza de las Ciencias**, v. 20, n. 3, p. 477-488, 2002.

BASTOS FILHO, Jenner. B. Pode-se progredir com fundamentos inconsistentes? (O caso do átomo de Bohr). **Cad. Bras. Ens. Fís.**, v.20, n.3: p. 312-335, dez. 2003.

FISCHLER, Helmut; LICHTFELDT, Michael. Modern physics and students' conceptions. **International Journal of Science Education**, 14:2, 181-190, 1992.

FORATO, ThaísC. M. **A natureza da ciência como saber escolar: um estudo de caso a partir da história da luz**. Tese de Doutorado, Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, 2009.

FORMAN, Paul. Weimar culture, casuality, and quantum theory, 1918-1927: Adaptation of German physicists and mathematicians to a hostile intelectual environment. **Historical Studies in the Physical Sciences** vol. 3, p. 1-115, 1971.

GAGO, Selma; ELENA, Santiago F.; FLORES, Ricardo; SANJUÁN, Rafael. Extremely High Mutation Rate of a Hammerhead Viroid. **Science**, vol. 323(5919), pp. 1308–1308, 2009.

GIL-PÉREZ, D.; MONTOR, I. F.; ALÍS, J. C.; CACHAPUZ, A.; PRAIA, J. Uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 125-154, 2001.

HEILBRON, John L. **A History of Atomic Models from the Discovery of the Electron to the Begining of Quantum Mechanics**. Dissertation, University of California, Berkeley, 1964.

HEILBRON, J. L.; KUHN, T. The Genesis of the Bohr Atom. **Historical Studies in the Physical Sciences**, v.1, pp. 211-290, 1969.

HEILBRON, J. L. J. J. Thomson and the Bohr atom. **Physics Today**, v. 30, n. 4, 1977.

HEILBRON, J. L. Rutherford-Bohr atom. **American Journal of Physics**, v. 49, n. 3, p. 223-231, mar. 1981.

HENRIQUE, Alexandre B. **Discutindo a natureza da ciência a partir de episódios da cosmologia**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, 2011.

HENTSCHEL, Klaus; GREENBERGER, Daniel; WEINERT, Friedel. **Compendium of Quantum Physics: concepts, experiments, history and philosophy**. Springer-Verlag, 2009.

HERMANN, Armin. **Fruhgeschichte der Quantentheorie 1899-1913**. Mosbach 1969.

HIROSIGE, Tetu; NISIO Sigeko. Formation of Bohr's theory of atomic constitution. In: **Japanese Studies in the History of Science**, nr. 3, p. 6-28, 1964.

HOYER, Ulrich. Über die Rolle der Stabilitätsbertrachtungen in der Entwicklung der Bohrschen Atomtheorie. **Archive for History of Exact Science**, n. 10, p. 177-206, 1973.

IRZIK, G.; NOLA, R. A family resemblance approach to the nature of Science for Science education. **Science & Education**, v. 20, p. 591-607, 2011.

JAMMER, Max. **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**. McGraw-Hill, New York, 1966.

JEONG, Y; YIN, M; DATTA, T. **Quantization of the Atom plus Attempting to Answer heilbron & Kuhn**. 5. Bohr N (2009) XXXVII. I., 2013.

KALKANIS, P. Hadzidak; STRAVOU, D. An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts, **Sci. Educ.** 87, 257 2003.

KRAGH, Helge. Resisting the Bohr Atom: The Early British Opposition. **Physics in Perspective**, 13, 4-35, 2011a.

KRAGH, Helge. **Niels Bohr and the quantum atom: the Bohr model of atomic structure 1913-1925**. Oxford U. P., Oxford UK, 2012.

KUHN, Thomas. **Theory change as structure-change: comments on the Sneed formalism**. *Erkennis*, v. 10, p. 179-199, 1976.

KUHN, Thomas. **A Tensão Essencial**. Lisboa, Edições 70, 1977.

KUHN, Thomas.: **A estrutura das revoluções científicas**. Tradução de Beatriz V. Boeira e Nelson Boeira, São Paulo: Perspectiva, 1982.

KUHN, Thomas. **O caminho desde A estrutura**. Trad. Cezar Mortari. São Paulo: UNESP, 2006.

LEDERMAN, Norman G. Student's and teacher's conceptions of the nature of science: a review of the research. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 29, n. 4, p. 331-359, 1992.

LEDERMAN, Norman G. Nature of Science: past, present, and future. In: S Abell and N Lederman (Eds), **Handbook of research on science education**. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates pp. 831-880, 2007.

LEWONTIN, R. C. The Units of Selection. **Annual Review of Ecology and Systematics** 1: 1-18, 1970.

LIVIO, Mario. **Tolices Brilhantes: de Darwin a Einstein, os grandes erros dos maiores cientistas**. Trad. Catharina Pinheiro. Rio de Janeiro: Record, 2017.

LOPES, C. V. M. **Modelos atômicos no início do século XX: da física clássica a introdução a física quântica**. Tese (Doutorado em História da Ciência) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2009.

LORENZ, Konrad:, **Behind the Mirror**, Methuen, London, 1977.

LORENZ, KONRAD. **A Demolição do Homem**. Trad. Horst Wertig, São Paulo: Editora Brasiliense, 1986.

MARTINS, André Ferrer P. M. Natureza da Ciência no ensino de ciências: uma proposta baseada em “temas” e “questões”. **Cad. Bras. Ens. Fis.**, vol. 32, n. 3 (2015).

MARTINS, Roberto, A. Sobre o papel da história da ciência no ensino. **Boletim da Sociedade Brasileira de História da Ciência**. 9: 3-5, 1990.

MARTINS, Roberto, A. Seria possível uma história da ciência totalmente neutra, sem qualquer aspecto whig? **Boletim de Hist. e Fil. da Biologia**, 4(3), 4-7, 2010.

MARTINS, Roberto. A. **A teoria quântica, da Conferência de Solvay ao átomo de Bohr**. Palestra apresentada na VIII Semana de Física da Unb, 2013.

MCCOMAS, W. F.; ALMAZROA, H.; CLOUGH, M. P. The nature of Science in Science education: An introduction. **Science & Education**, v. 7, n. 6, p. 511-532, 1998.

MCCORMARCH, Russel. The Atomic Theory of John William Nicholson. **Archive for History of Exact Sciences**, v.3, pp.161-184, 1966.

MEHRA, Jagdish; RECHENBERG, Helmut. **The Historical Development of Quantum Theory**. V1, pt1. Springer-Verlag, 1982.

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

MOURA, Cristiano B. **Discutindo a natureza da ciência no ensino médio: um caminho a partir do desenvolvimento dos modelos atômicos**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro – RJ, Brasil: 2014.

NAGAOKA, Hantaro. Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity. **Philosophical Magazine** [6] 7 (41, May 1904): 445-455.

NICHOLSON, John W. The Constitution of Solar Corona. I.: Protofluorine. **Monthly Notices of Royal Astronomical Society** 72, 139-150, dez. 1911.

NICHOLSON, John W. The Constitution of Solar Corona II.: **Monthly Notices of Royal Astronomical Society** 72, 677-692, jun. 1912.

NICHOLSON, John W. The Constitution of Solar Corona III. **Monthly Notices of Royal Astronomical Society** 72, 729-739, set. 1912b.

OLIVEIRA, Amélia de Jesus. **Duhem e Kuhn: Continuismo e Descontinuismo na História da ciência**. Tese de Doutorado. Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, UNICAMP, 2012.
PAIS, Abraham. **Niels Bohr's Times, in Physics, Philosophy and Polity**. Clarendon Press. Oxford, 1991.

PEDUZZI, L. O.Q.; BASSO, A. C. Para o ensino do átomo de Bohr no nível médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 4, p. 545-557, 2005.

PENA, Fábio Luís A. **Concepções sobre a Natureza da Ciência: a trajetória de estudantes da disciplina Evolução dos Conceitos da Física ministrada na Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC**. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia, 2015.

PENNA, Marcos. **A investigação da estrutura da matéria no início do século XX: Niels Bohr e a busca de explicações para a estabilidade do átomo**. Dissertação (Mestrado em História da Ciência) – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2009.

PINTO, Neuza Betoni. **O erro como estratégia didática**. Campinas: Papyrus, 2002.

POPPER, Karl. **Objective knowledge: an evolutionary approach**. Oxford: The Clarendon Press, 1972.

POPPER, Karl R. **Conjecturas e Refutações**. *Unb (ed.)*, 1994.

PORRA, Angélica Cristina; SALES, Nilva Lúcia Lombardi; SILVA, Cibelle Celestino. Concepções de natureza da ciência: adaptação de um instrumento para aplicação em alunos de licenciatura de universidades públicas brasileiras. **Anais. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências - ABRAPEC**, 2011. Disponível em: http://abrapecnet.org.br/atas_enpec/viiienpec/resumos/R0206-1.pdf

PUMFREY, S. History of Science in the National Science Curriculum: A critical review of resources and their aims. **British Journal for the History of Science**, v. 24, n. 1, p. 61-78, 1991.

RAMÍREZ, Jorge E. M.; BADILLO, Rómulo G.; MIRANDA, Royman P. El modelo semicuántico de Bohn em los libros de texto. **Ciência & Educação**, v. 16, n. 3, p. 611-629, 2010.

ROCHA, J. F. M. (org.) et al. **Origens e Evolução das Ideias da Física**. 2ª. Ed. Salvador: EDUFBA, 2015.

ROSENFELD, Léon. “Prefácio” In: BOHR, Niels. **On the Constitution of Atoms and Molecules**. W.E. Benjamin, New York, 1963.

ROSENFELD, Léon; RUDINGER, Erik. The decisive years, 1911-1918. In Stefan Rozental, **Niels Bohr: His Life and Work as Seen by His Friends and Colleagues**, pp. 38-73. Amsterdam, 1968.

ROSENFELD, Léon. Men and ideas in the history of atomic theory. **Archive for history of exact sciences**, vol. 7, nº 2, 1971.

RUTHERFORD, E. The Scattering of α and β particles by Matter and the Structure of the Atom. **Philosophical Magazine**, série 6, v. 21, pp.669-688, maio 1911

SAITO, Fumikazu. “Continuidade” e “Descontinuidade”: o processo da construção do conhecimento científico na história da ciência. **Revista da FAEEBA – Educação e Contemporaneidade**, Salvador, v. 22, nº 39, p. 183-194, jan/jul. 2013.

SCERRI, Eric. **A Tale of Seven Scientists and a New Philosophy of Science**. Oxford University Press, 2016.

SENECHAL, Marjorie. **I Died for Beauty: Dorothy Wrinch and the cultures of science**. Oxford University Press, 2013.

SILVEIRA, Fernando L. da. A Metodologia dos Programas de Pesquisa: a Epistemologia de Imre Lakatos. **Cad. Cat. Ens. Fis.**, v.13,n3: p.219-230, dez.1996.

SILVEIRA, F. L.; PEDUZZI, L. O. Q. Três episódios de descoberta científica: da caricatura empirista a uma outra história. **Cad. Bras. Ens. Fís.**, v. 23, n. 1: p. 26-52, abr. 2006.

TEIXEIRA, E. S.; EL-HANI, C. N.; FREIRE JR, O. Concepções de Estudantes de Física sobre a Natureza a Ciência e sua Transformação por uma Abordagem Contextual do Ensino de Ciências. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 1, n. 3, p. 111-123, 2001.

TEIXEIRA, E. S.; GRECA, I.; FREIRE, O. The History and Philosophy of Science in Physics Teaching: a research synthesis of didactic interventions. **Science and Education**, v. 21, n. 6, p. 771-796, 2012a.

TEIXEIRA, E. S.; GRECA, I.; FREIRE, O. Uma Revisão Sistemática das Pesquisas Publicadas no Brasil sobre o Uso Didático de História e Filosofia da Ciência no Ensino de Física. In: PEDUZZI, L. O. Q.; MARTINS, A. F. P.; FERREIRA, J. M. H. (Orgs.). **Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino**. Natal: EDUFERN, 2012b. cap.1 p. 9-40.

THAGARD, Paul. **Computational Philosophy of Science**. MIT Press/Bradford Books, Cambridge, MA, 1988.

THOMSON, Joseph J. On the Origin of Spectra and Planck's Law. **Phil. Mag.** 37 (1919), 419-446.

THOMSON, Joseph, J. Cathode Rays. **Philosophical Magazine**, 44, 293, 1987.

VASCONCELOS, Stephanie S.; FORATO, Thaís C. M. Niels Bohr, espectroscopia e alguns modelos atômicos no começo do século XX: um episódio histórico para a formação de professores. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 35, n. 3, p. 851-887, dez. 2018.

VIDEIRA, Antônio Augusto P. Boltzmann. Darwin e as Leis do Pensamento. **Revista Portuguesa de Filosofia**, vol. 61, T. 61, Fasc. 1, Espaço - Tempo - Evolução: Albert Einstein e Pierre Teilhard de Chardin (Jan. - Mar., 2005), pp. 225-245

VIDEIRA, Antônio Augusto P. Breves considerações sobre a natureza do método científico. In: SILVA, Cibelle. C. (Org.) **Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino**. P. 24-40, São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.

VOLLMER, Gerhard. **New Arguments in Evolutionary Epistemology**. Ludus Vitalis, vol. XII, num. 21, pp. 197-212, 2004.

WILSON, Wihelm. John William Nicholson. **Biographical Memoirs of Fellows of The Royal Society**, v.2, pp.209-214, nov. 1956.

ZABALA, A. V. **Lá Práctica Educativa: Cómo Enseñar**. Barcelona: Graó, 2000.

APÊNDICES

Apêndice A

Roteiro da entrevista

- Como você diferenciaria ciência de religião ou filosofia?
- O que é um experimento?
- O desenvolvimento do conhecimento científico requer experimentos? Justifique sua opinião com exemplo.
- Quando uma teoria é aceita, a sua sobrevivência depende do quê?
- Evidência contrária à teoria implica em sua refutação?
- O que é erro científico?
- O que faz uma hipótese ser considerada errada?
- Na prática científica, como os erros são descobertos?
- Como hipóteses científicas concorrentes são selecionadas?
- O que é uma predição científica?
- Predições são uma prova da correção da teoria?
- Teorias erradas podem prever fenômenos corretamente?
- A ciência segue um método? Como você o caracterizaria?
- Um mesmo conjunto de dados pode sustentar duas teorias diferentes?
- Qual o papel da intercomunicação entre cientistas para o progresso científico?
- A ciência é uma atividade sujeita a erros, mesmo pelas mentes mais brilhantes. Por que então a ciência deveria ser considerada confiável?
- Como a ciência se desenvolve, por evoluções ou por revoluções?

Apêndice B

Questionário final

Aluno (a): _____

QUESTÃO 1 – Você considera o erro importante para o conhecimento científico?

Por quê?

QUESTÃO 2 - Após os cientistas terem desenvolvido uma teoria científica (por exemplo, a teoria quântica, a teoria atômica, a teoria da evolução), essa teoria pode ser modificada depois? Se você acredita que as teorias científicas permanecem inalteradas ao longo dos anos, justifique sua resposta com alguns exemplos. Se você acredita que as teorias científicas são modificadas, explique por que isso acontece.

QUESTÃO 3 – É comum a divulgação do método científico composto das seguintes etapas: observação de fenômenos naturais, formulação de hipóteses, teste das hipóteses através de experimentos, modificação da hipótese em caso de falha nos testes ou, em caso de validação desta, a elaboração de uma teoria. Em sua opinião esse é o único método de fazer ciência? Justifique a sua resposta seja ela afirmativa ou não.

Questão 4 - Um tema muito discutido atualmente é o aquecimento global. Apesar de muitas mudanças no clima já serem sentidas por todos ainda não existe um consenso entre os cientistas sobre as causas dessas mudanças. Um grupo defende que tais mudanças são consequências da interferência do homem na natureza e outro grupo acredita que este é um processo natural e que aconteceria independente da interferência humana. Em sua opinião, é possível que cientistas cheguem a conclusões diferentes a partir de um mesmo conjunto de informações? Justifique sua resposta com algum exemplo.

QUESTÃO 5 –

Texto I –

Cientistas do CERN 'quebram a velocidade da luz'

“Os cientistas disseram na quinta-feira que registraram partículas viajando mais rápido que a luz - uma descoberta que pode derrubar uma das leis fundamentais do universo de Einstein. Antonio Ereditato, porta-voz do grupo internacional de pesquisadores, disse que as medidas tomadas ao longo de três anos mostraram que os neutrinos bombeados do CERN, perto de Genebra, para Gran Sasso, na Itália, chegaram 60 nanossegundos mais rápido do que a luz teria feito. "Temos grande confiança em nossos resultados. Verificamos e verificamos novamente qualquer coisa que possa ter distorcido nossas medidas, mas não encontramos nada", afirmou. "Agora queremos que os colegas os verifiquem de forma independente". Se confirmada, a descoberta minaria a teoria da relatividade especial de Albert Einstein, de 1905, que diz que a velocidade da luz é uma "constante cósmica" e que nada no universo pode viajar mais rápido. (...)" (The Telegraph)

Texto II -

Obrigado por publicar ... o experimento recente sobre neutrinos que lança dúvidas sobre todo o quadro teórico moderno da física. É um lembrete de que mesmo os mais bem-sucedidos dentre nós são limitados e sujeitos a erros. E espero que essas notícias possam inspirar um pouco de humildade naqueles que afirmam, em nome da ciência, que as teorias que preveem a calamidade causada pelas mudanças climáticas provocadas pelo homem são fatos estabelecidos e não sujeitos a debate. (PRESCOTT, 2011 apud ALLCHIN, 2012)

O Texto II reproduz uma carta enviada ao editor de um grande jornal norte americano e revela uma visão cética da confiabilidade do conhecimento científico. Hoje é sabido que os resultados do experimento aludido no primeiro texto estavam fundamentados em erros de observação. Não fosse o caso, ou seja, fossem os dados legítimos, com quais argumentos você defenderia a confiabilidade do conhecimento científico diante deste tipo de questionamento?

Apêndice C

Textos de apoio

Texto I – O progresso da ciência: revolução ou evolução?

Estritamente falando, epistemologia é o ramo da filosofia que estuda a produção e o desenvolvimento do conhecimento científico. Exemplos de questões com que a epistemologia se ocupa são: Quais são as condições necessárias e suficientes do conhecimento? Quais suas fontes? Quais são suas estruturas e limites? Em outras palavras, a epistemologia é um olhar em direção aos fundamentos, à validade e à consistência lógica do conhecimento científico. Nesse texto, apresentaremos, de maneira resumida, os pontos centrais de duas concepções epistemológicas do conhecimento científico, uma que considera que o progresso científico ocorre por meio de *revoluções científicas*, a que chamaremos de **epistemologia de ruptura ou revolucionária**; e outra que compreende o desenvolvimento da ciência como análogo à evolução gradativa dos organismos vivos, a que nos referiremos como **epistemologia evolutiva ou evolucionária**.

Epistemologia evolutiva

Uma epistemologia evolucionária pode ser identificada com uma tentativa de responder questões como as que colocamos acima a partir de um ponto de vista evolutivo. O filósofo norte-americano John Dewey (1859-1952) foi o primeiro a explorar as contribuições do darwinismo para a epistemologia. A ideia geral explorada por Dewey era a de que não só a espécie humana enquanto organismo biológico era um produto da seleção natural, mas também o conhecimento humano o era. Após Dewey, diversos pensadores refletiram sobre um modelo evolucionário para o desenvolvimento do conhecimento científico: Ludwig Boltzmann, Donald Campbell, Konrad Lorenz, Karl Popper, Daniel Dennet, Richard Dawkins, David Hull etc. Um ponto de intersecção entre as concepções epistêmicas destes pensadores é a de que as teorias científicas são o produto de um processo de seleção natural, razão pela qual esta maneira de conceber o crescimento do conhecimento é chamada de **selecionismo**.

Segundo Aguiar (2011, p. 12), três condições são necessárias para um modelo evolutivo de solução de problemas: *um mecanismo para introduzir variações*, que poderíamos identificar com a pluralidade de teorias científicas que se propõe a interpretar um mesmo conjunto de dados; *um processo consistente de seleção*, que encontra paralelo com o severo escrutínio da

comunidade científica e *um mecanismo para preservar e reproduzir as variações selecionadas*, que pode ser identificado com as diversas atividades sociais responsáveis por transmitir a cultura científica, entre as quais a mais complexa certamente é a educação científica. Analogamente, Lewontin (1970), considera que o mecanismo de seleção natural é caracterizado como um esquema constituído por três princípios. O de *variação*; a seleção natural requer que haja variação fenotípica⁵³ entre os membros de uma população. O de *hereditariedade*; requer que a variação seja transmitida hereditariamente. E o de *aptidão*; requer que a seleção esteja relacionada aos potenciais de reprodutibilidade dos membros de uma população. Apesar de a seleção natural não ser o único processo da teoria evolutiva, ele assumirá um papel central nas epistemologias evolucionárias.

Em *A Lógica da Pesquisa Científica*, Sir Karl Popper nos apresenta uma teoria do crescimento do saber a partir da tentativa e da eliminação do erro. A tese popperiana para o conhecimento, a que ele chamou de racionalismo crítico, era, então, baseada em **conjecturas e refutações**: hipóteses e teorias são formuladas sem uma instrução anterior do meio em que se originam, concorrem entre si num processo que seleciona as mais aptas, que sobrevivem aos processos de refutação. O aprendizado humano e a evolução das espécies estariam conectados pela circunstância de que ambos dependem de ciclos de tentativa e erro para incorporar conhecimento. A quantidade de ciclos de tentativa e erro nas atividades científicas pode ser associada à taxa de mutação de uma espécie:

O método do genoma - perpetuamente fazendo experimentos, opondo seus resultados à realidade e preservando o que é apto - difere daquele adotado pelo homem em suas buscas científicas por conhecimento em apenas um aspecto, e nem sequer um vital, a saber, o de que genomas aprendem unicamente de seus sucessos, enquanto o homem aprende também de seu fracasso. (LORENZ, 1977, p. 24).

Um estudo de 2009 (figura I) concluiu que a taxa de mutação de um organismo é inversamente proporcional ao tamanho do genoma, ou seja, inversamente proporcional à totalidade da informação genética. Isso significa que quanto maior a complexidade genética (mais informação inscrita no genoma devido aos ciclos de tentativa e erro de seu passado filogenético), menor a taxa de mutação no presente. Maiores ciclos de tentativa no passado significam mais informação incorporada ao sistema, e, portanto, maior complexidade genética que, por sua vez, demanda menores ciclos de tentativa e erro. Para Popper, ‘tentativas’ podem

⁵³ Fenótipo são as características observáveis de um organismo ou população, tais como morfologia, desenvolvimento, propriedades bioquímicas ou fisiológicas e comportamento

ser “novas reações, novas formas, novos órgãos, novos modelos de comportamento, **novas hipóteses**” (POPPER 1972, p. 242 *apud* ABRANTES 2004, p. 28).

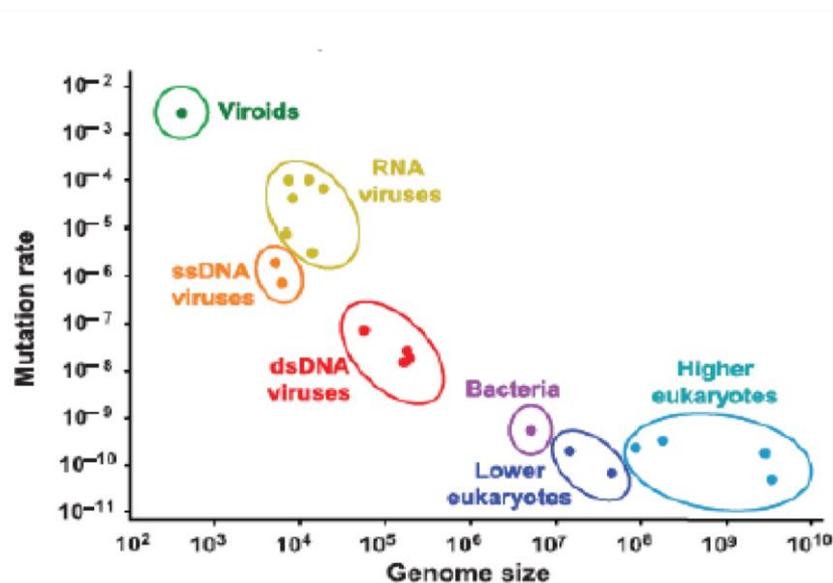


Figura 1 - Gráfico da taxa de mutação em função do tamanho do genoma para um viroide e outras entidades biológicas. No estudo, GAGO et al (2009) estimaram a taxa de mutação de um viroide - os menores e geneticamente mais simples sistemas replicadores em

Entidades mais complexas assim o são porque possuem mais informação, mais conhecimento do ambiente externo inscrito no código genético após sucessivas mutações.

A tese de Popper é marcada por críticas substanciais aos modelos de aprendizagem baseados na experiência, os modelos indutivistas por ele descritos como a *teoria do balde mental*⁵⁴. Além de apontar a ausência de justificativa lógica das generalizações indutivistas, Popper chama atenção para o fato de que os modelos empíricos de conhecimento pressupunham uma neutralidade dos órgãos do sentido, que em tese seriam capazes de acessar puramente a realidade externa. Pelo contrário, Popper afirmava que mesmo as observações mais elementares carregavam uma dose de “teoria”. Por exemplo, só sou capaz de identificar um padrão de repetição entre fenômenos sucessivos cronologicamente se, antes disso, tiver uma tendência a reconhecer semelhanças e ignorar diferenças entre eles. Essa “habilidade”, ainda que inconsciente, só pode ser anterior à experiência: “em vez de esperar passivamente que as repetições nos imponham suas regularidades, procuramos de modo ativo impor regularidades ao mundo” (POPPER 1994, p. 75-6). Nos procedimentos científicos, as observações são sempre

⁵⁴ Segundo essa concepção, nossos sistemas cognitivos seriam num primeiro momento vazios como um balde e, com o sucessivo contato com o mundo externo, “enxeríamos” o balde com conhecimento sobre como o mundo é. A implicação dessa tese é a atribuição de um alto nível de confiabilidade aos nossos instrumentos de observação (sentidos), visão que de modo algum era compartilhada por Popper.

conduzidas a partir de um ponto de vista: os interesses teóricos do cientista, o objeto de investigação, suas conjecturas e antecipações, as teorias assumidas etc:

A observação é sempre seletiva: exige um objeto, uma tarefa definida, um ponto de vista, um interesse especial, um problema. Para descrevê-la, é preciso empregar uma linguagem apropriada, implicando similaridade e classificação – que, por sua vez, implicam interesses, pontos de vista e problemas (POPPER 1994, p. 76).

Para Popper toda teoria é uma hipótese (uma conjectura teórica) que pode ser derrubada no futuro em função de sua perda de aptidão adaptativa ao meio, visto que este é passível de mudança. Por “mudança no meio”, queremos nos referir a mudanças no quadro de referência científico, incluindo, por exemplo, novos procedimentos de testagem aos quais uma teoria antes bem-sucedida se mostre inapta. Isso não deve, em absoluto, ser lido como uma rejeição popperiana ao objetivo científico da busca pela verdade. Na verdade, é justamente a busca, conduzida criticamente, por teorias explicativas verdadeiras, que confere racionalidade ao empreendimento científico. As teorias científicas nunca podem, em si, serem justificadas ou verificadas, mas é possível uma justificação lógica de preferência entre teorias rivais. Não podemos, em absoluto, afirmar a verdade da teoria preferida, mas, em oposição às suas rivais caídas pelo caminho, podemos afirmar a negação (mesmo que momentânea!) de sua falsidade, de modo que há, ao menos, a possibilidade que seja verdadeira (possibilidade negada às suas concorrentes):

O método descrito pode ser chamado método crítico. É um método de experiência e eliminação de erros, de propor teorias e submetê-las aos mais severos testes que possamos projetar. Se, em via de certas admissões limitadoras, só é considerado possível um número finito de teorias pela eliminação de todas as suas concorrentes. Normalmente – isto é, em todos os casos em que o número de teorias possíveis é infinito - este método não pode levar-nos a isolar a teoria verdadeira; nem o pode fazer qualquer outro método. Ele permanece aplicável, embora inconclusivo. (POPPER 1994, p. 27).

Em Popper, a avaliação de uma teoria é fundamentada em sua performance passada, não dizendo, em absoluto, nada sobre sua atuação futura. Ao condicionar o ganho de conhecimento a um processo de adaptação darwiniana, as epistemologias evolutivas rejeitam um conhecimento verdadeiro, já que a aptidão de um sistema cognitivo para um meio é meramente conjuntural. Segundo ABRANTES (2004):

Para o darwinismo não há adaptação ideal, absoluta, de um organismo. A adaptação de um ser vivo é sempre local, relativa a um meio ambiente particular. Se houver mudanças nas características do meio ambiente, o organismo pode não mais se revelar adaptado (p. 14).

Assim como nos organismos, a sobrevivência de uma hipótese é explicada em termos da aptidão desta ao meio, sem que este interfira ativamente no processo de produção da variedade de teorias concorrentes; **a validação ou legitimidade da teoria reside unicamente no fato de que ela sobreviveu a um processo de refutação, o que lhe confere verossimilhança local e temporária.**

A tese dos selecionistas⁵⁵ é, em última instância, a afirmação da continuidade dos mecanismos de seleção darwinistas, dos níveis mais elementares, como o genético, até os mais complexos, como o conhecimento científico. Assim, supõe-se que os processos de seleção natural ocorrem nos mais diversos sistemas de aquisição de conhecimento, independentemente do nível de complexidade. Afirmar que um sistema opera de acordo com certas regras requer, antes de qualquer coisa, que se tenha bem delimitado quais são os limites desse sistema: onde começa e onde termina. E isso, ao menos em território epistemológico, não é nada trivial. Por exemplo, podemos considerar a ciência como um sistema fechado onde regras de seleção natural são observadas. Nessa analogia, a comunidade científica é o meio seletor que preservará as hipóteses e teorias mais aptas. Mas podemos também considerar que cada hipótese concorrente é produto de um programa científico local (situado, digamos, em um laboratório em Copenhague) onde outras ideias, consideradas inaptas para publicação, foram descartadas por seleção natural. Podemos ir ainda mais longe e supor que, durante uma reunião do grupo de pesquisa em questão, cada integrante do programa operou um processo de seleção em seus cérebros antes de expor uma ideia, pré-selecionando as que julgava mais aptas a serem compartilhadas com seus pares. Selecionistas como Popper, Campbell e Dawkins compartilham a ideia de que a aquisição de conhecimento em sistemas complexos como a ciência ocorre em cascata: subsistemas mais internos pré-selecionam comportamentos que, por sua vez, são pré-selecionados por subsistemas mais externos, num movimento contínuo onde seleções naturais ocorrem dentro de outras, de modo que níveis de adaptabilidade e taxa de sobrevivência da espécie tendem a aumentar.

⁵⁵ Para se referir a epistemólogos evolutivos como Popper e Campbell, o termo é mais apropriado que “darwinista”, pois Darwin reconhecia algum grau de lamarckismo, i.e., de instrução do meio.

A ideia de uma instrução do organismo por meio de um ambiente seletor externo, compatível com o lamarckismo, é substituída pela hipótese de que os organismos são capazes de armazenar informação sobre o meio ambiente e, assim, simulá-lo internamente. Campbell utiliza o termo *seletores vicários* para se referir aos subsistemas que substituem a ação direta do meio ambiente. A seleção ocorre, assim, por delegação, vicariamente (ABRANTES, 2004). Um exemplo elucidativo dado pelo próprio Campbell (1972) é o de que a própria visão seria um seletor vicário que explorou, no passado filogenético, de maneira oportunista, a circunstância de que a opacidade de um objeto geralmente aparece associada a sua impenetrabilidade. Essa conjectura teórica (de que objetos transparentes são penetráveis e opacos, não) preveniu os organismos dotados de visão de empreitarem explorações potencialmente danosas no meio ambiente. Essa representação do ambiente (na forma de uma conjectura acerca de como o mundo é) substitui, portanto, uma instrução direta do meio (já que o organismo em questão não precisou se chocar contra uma superfície opaca para concluir sua rigidez) e permitiu ao sistema de cognição pré-selecionar comportamentos (por exemplo, trajetórias possíveis até um alimento), impondo um limite à aleatoriedade das variações (nesse caso, esse seletor vicário foi responsável especificamente por excluir todas as conjecturas em que o organismo atravessaria superfícies opacas, pré-selecionando aquelas trajetórias com maior adaptabilidade à informação incorporada). Em Popper, essas variantes que representam um modo como o mundo é são as *conjecturas*, enquanto o processo de seleção destas são as *refutações*.

Epistemologia de ruptura

Autor de *A Estrutura das Revoluções Científicas*, Thomas Kuhn nos apresenta, em seu livro de 1962, uma epistemologia, um modelo que explica o desenvolvimento do conhecimento científico. Segundo o pensador norte-americano, a ciência passa a maior parte de seu tempo se dedicando ao que ele chamou de “ciência normal”, onde cientistas operam dentro de um determinado paradigma. Para Kuhn, o paradigma determina tanto os problemas relevantes para a atividade quanto as possíveis soluções, como num jogo de quebra-cabeças, onde sabemos a forma que uma peça deve ter para se encaixar em um determinado espaço. Quando um paradigma passa a abrigar anomalias, este entra em um período de crise e é então sucedido por outro através de uma ruptura, uma revolução científica.

O pensamento de Kuhn foi fortemente influenciado pelo filósofo francês Alexandre Koyré, para quem a mecânica newtoniana foi uma revolução do pensamento humano em

relação à “física” de senso-comum, intuitiva, de Aristóteles. Essa drástica transformação no sistema de referência não pode ser explicada em termos outros que não revolucionários, dado que o caráter completamente contra-intuitivo da física clássica afasta a possibilidade de se sugerir uma influência entre os sistemas de conhecimento. Segundo Condé (2018, pp. 175-176), juntamente com Hall e Cohen, Kuhn se filia a uma tradição de “historiadores revolucionários”, influenciados pela obra de Koyré e para quem o progresso do conhecimento se estabelece via revolução. A leitura histórica de Koyré se opõe a do físico e filósofo francês Pierre Duhem, para quem a ciência moderna só foi possível devido à tradição de pensamento medieval, de onde já se podia observar os elementos que iriam ser constitutivos do que se chamou Revolução Científica. Na perspectiva duheniana da história da ciência, rupturas intelectuais súbitas são eventos muito raros e, via de regra, a ciência progride lenta e gradualmente:

O estudo das origens da estática nos levou, assim, a uma conclusão; à medida que desenvolvemos nossas pesquisas históricas mais adiante e em direções mais variadas, esta conclusão se impôs a nosso espírito com uma força crescente. Assim, ousaremos formulá-la em sua plena generalidade: a ciência mecânica e a física, de que se orgulham com razão os tempos modernos, decorrem, por uma série ininterrupta de aperfeiçoamentos pouco sensíveis, das doutrinas professadas no seio das escolas na Idade Média; as pretensas revoluções intelectuais foram, na maioria das vezes, somente evoluções lentas e longamente preparadas; as supostas renascenças, apenas reações frequentemente injustas e estereis; o respeito pela tradição é uma condição essencial do progresso científico (DUHEM, 1905, pp. III e IV *apud* OLIVEIRA, 2012, p. 19).

Para alguns adeptos da concepção descontinuista do desenvolvimento científico, a importância dos grandes gênios, a relevância da contribuição que deram para a ciência, seria desvalorizada a partir de uma visão continuísta ou evolutiva, pois, como elucida Koyré, numa famosa crítica ao trabalho de Duhem, apartada a ideia de revolução, Leonardo Da Vinci deixa de ser reconhecido por seu intelecto genial e aparece como um mero elo histórico entre a Idade Média e a Modernidade. Também Bernard Cohen critica a busca por elos entre os grandes feitos científicos, afirmando que, ao procurar insistentemente predecessores históricos de ideias científicas, o historiador parece alguém “que sente o maior prazer em reduzir os gigantes criativos da ciência ao status de pigmeu” (COHEN 1977, p. 317 *apud* OLIVEIRA 2012, p. 7).

Para Kuhn, em um dado período, uma dada comunidade científica opera segundo um conjunto de regras, valores, crenças, em suma, um sistema de referência que guia as investigações científicas. Como se sabe, para Kuhn, a ciência cresce também cumulativamente, durante os períodos de ciência normal que eram, efetivamente, os períodos em que os cientistas

mais empregavam seu tempo, procurando ampliar o domínio da teoria vigente, fortalecendo o poder explicativo dentro do paradigma. Durante os períodos de ciência normal, um paradigma fornece aos cientistas uma tradição de pesquisa que não somente determina as soluções aceitáveis para um problema, mas que também estabelece quais são os problemas relevantes para aquela área de investigação. Um período de crise, entretanto, se inicia quando o paradigma não consegue explicar novos fenômenos, mobilizando cientistas insatisfeitos com os modelos vigentes a buscarem novas explicações, totalmente apartadas do sistema de referência que conhecem. Cedo ou tarde, uma dessas explicações, i.e, um dos paradigmas concorrentes, se mostrará mais atrativa aos olhos da comunidade científica por motivos nada racionais; **a escolha se daria por razões estéticas, emocionais e até políticas e religiosas** (SAITO, 2013, p. 189). Quando um paradigma ocupa o lugar de outro, diz-se ter havido uma revolução científica e o critério utilizado por Kuhn para encontrar revoluções na história das ciências é o de incomensurabilidade: quando dois sistemas de referência sucessivos no tempo têm uma linguagem incompatível, aí está o limite entre um paradigma e o seu sucessor.

O novo paradigma substitui o anterior, que agora não é mais considerado como um guia seguro para pesquisas futuras. No capítulo X de *A estrutura*, Kuhn afirma que a mudança é tão radical que os dois paradigmas sequer podem ser comparados segundo os mesmos objetivos, padrões metodológicos e valores. Na Física, por exemplo, a mudança de significado de palavras como “simultaneidade”, “massa” e “força” é tão dramática que há uma interdição da comunicação entre cientistas operando sob diferentes paradigmas, como se vivessem, afirma Kuhn, em “mundos diferentes”. A mudança típica de paradigma não envolve uma grande infusão de novos resultados empíricos. Pelo contrário, é uma reorganização conceitual de materiais familiares, como na revolução da relatividade. Uma mudança de paradigma tipicamente altera metas, padrões, significado linguístico, práticas científicas importantes, a maneira como o conteúdo técnico e a comunidade de especialistas relevantes são organizados e a maneira como os cientistas percebem o mundo. Também não podemos reter a concepção antiga, linear e cumulativa de progresso científico, característica do pensamento iluminista; Kuhn insiste que as tentativas de mostrar que o novo paradigma contém o antigo, logicamente ou em algum limite ou sob alguma aproximação, serão culpadas de uma falácia de equívoco. A mudança de significado reflete a mudança radical na ontologia assumida do mundo. Raramente o novo paradigma resolve todos os problemas que seu antecessor aparentemente resolveu. Assim, mesmo nesse sentido, o novo paradigma falha completamente em incluir o antigo. A consequência, de acordo com Kuhn, é que as tentativas de defender o progresso científico cumulativo contínuo por meio da redução da teoria ou mesmo de uma relação de

correspondência (por exemplo, uma relação limitadora) entre uma teoria e seu antecessor devem falhar. As revoluções produzem descontinuidades. Dadas todas essas mudanças, Kuhn afirma que os dois paradigmas concorrentes são "incomensuráveis", um termo técnico que ele tentou repetidamente esclarecer. **Os apelos tradicionais a resultados empíricos e argumentos lógicos são insuficientes para resolver o debate.** A escolha entre paradigmas é devida a negociações de origem social.

O problema geral apresentado pela crítica de Kuhn à filosofia tradicional da ciência é que, embora as várias ciências tenham sido bem-sucedidas, não entendemos como elas conseguiram isso ou mesmo como caracterizar esse sucesso. As explicações no estilo do iluminismo falharam. Por exemplo, Kuhn e Feyerabend (1975), precedido por Popper, estavam entre os primeiros filósofos a expor a falência da alegação de que foi a descoberta de um método científico especial que explica esse sucesso, uma visão ainda amplamente ensinada no ensino médio hoje. E essa conclusão (que animou os pósmodernistas que consideram o progresso científico uma ilusão) deixou Kuhn e a ciência estudam a profissão com o problema de como a ciência realmente funciona. Explicar como e por que teve tanto sucesso se tornou um problema urgente para ele - novamente, um problema amplamente rejeitado por muitos estudiosos de ciências que não são filósofos.

Enquanto os empiristas lógicos e Popper haviam excluído questões relativas à descoberta científica da filosofia da ciência, em favor da teoria da confirmação ou da corroboração, Kuhn argumentava que as descobertas são estruturadas temporal e cognitivamente e que são um componente essencial de uma epistemologia da ciência. Na ciência normal kuhniana, os problemas são tão bem estruturados e as soluções quase garantidas em termos dos recursos do paradigma que os problemas se reduzem a quebracabeças. Kuhn manteve as coisas sob controle, negando que os cientistas normais busquem inovação essencial, pois, como indicado acima, grandes descobertas inesperadas ameaçam o paradigma existente e, portanto, são uma possível fonte de crise e posterior revolução. Assim, mesmo na ciência normal, Kuhn teve que admitir que grandes descobertas são desafios inesperados para o paradigma reinante. Eles são anômalos, até exógenos, no sentido de que vêm como choques de fora do sistema normal.

O trabalho de Kuhn sobre revoluções científicas levanta questões difíceis sobre se a ciência progride e, em caso afirmativo, em que consiste esse progresso. Kuhn pergunta: "Por que o progresso é um requisito reservado quase exclusivamente para as atividades que chamamos de ciência" e não para arte, teoria política ou filosofia? Os primeiros críticos o acusaram de negar o progresso científico, porque ele rejeitava a teoria da correspondência

tradicional da verdade e a ideia relacionada de progresso cumulativo em direção a uma verdade representacional esperando lá fora pela ciência. Para Kuhn, o internalista, os objetivos técnicos da ciência são gerados endogenamente e mudam com o tempo, rapidamente, durante revoluções. No entanto, um tanto paradoxalmente, Kuhn considerava as revoluções os componentes mais progressistas de seu modelo de ciência. Infelizmente, ele não foi capaz de articular completamente o que consiste esse progresso, dadas as questões de verdade, incomensurabilidade, entre outras, um problema que ainda enfrentam aqueles que rejeitam o realismo científico convergente. No entanto, o conhecimento e o sucesso na solução de problemas, incluindo a precisão preditiva, são os principais componentes de sua resposta. “[A] unidade da conquista científica é o problema resolvido ...” (p. 169). Em um recuo de suas declarações mais radicais, Kuhn respondeu aos críticos dizendo que possuímos um conjunto geral de valores científicos que nos permitem, geralmente com bastante facilidade, ordenar trabalhos científicos no tempo histórico, de acordo com o grau em que eles percebem esses valores. Um novo paradigma, ele diz, sempre deve tratar com sucesso uma anomalia séria deixada pela antiga, bem como abrir novas questões para uma investigação proveitosa.

Se houve, ao longo da História da Ciência, tantas revoluções científicas, por que o mundo teve que esperar Kuhn para vê-las, apenas em 1962? Porque, ele disse, elas são em grande parte invisíveis. Pois, após uma revolução, os vencedores reescrevem a história da ciência para parecer que o paradigma atual é a sequência brilhante, porém racional, de trabalhos anteriores. A implicação é que apenas alguém da sensibilidade histórica de Kuhn poderia perceber isso. (Os críticos céticos respondem que Kuhn inventou o problema para o qual ele tinha uma solução.) De fato, em seu grande livro sobre a história da antiga teoria quântica (Kuhn 1978), ele mudou a origem da revolução da teoria quântica em cinco anos, de Planck, em 1900, para Einstein e Ehrenfest, em 1905. Segundo ele, a historiografia revisionista dos cientistas whiggish suavizou a história real, creditando a Planck uma solução que ele na verdade rejeitou na época para um problema que ele na verdade não tinha na época - e acabaram por diminuir a contribuição, esta sim verdadeiramente radical, de Einstein. A decisão de Kuhn levanta novamente a questão de saber se os autores de uma revolução devem conscientemente romper com a tradição de pesquisa recebida.

REFERÊNCIAS

ABRANTES, Paulo. **O programa de uma epistemologia evolutiva**. Revista de Filosofia, Curitiba, v. 16, n. 18, p. 11-15, jan/jun. 2004.

LEWONTIN, R. C.. **The Units of Selection**. *Annual Review of Ecology and Systematics* 1: 1-18, 1970.

LORENZ, Konrad:, **Behind the Mirror**, Methuen, London, 1977.

POPPER, Karl. **Objective knowledge: an evolutionary approach**. Oxford: The Clarendon Press, 1972.

POPPER, KARL R. **Conjecturas e Refutações**, 1994.

SAITO, Fumikazu. **“Continuidade” e “Descontinuidade”: o processo da construção do conhecimento científico na história da ciência**. Revista da FAEEBA – Educação e Contemporaneidade, Salvador, v. 22, nº 39, p. 183-194, jan/jul. 2013.

Texto II: Evolução da espectroscopia

1 - Introdução

A experiência da decomposição de luz branca por um prisma realizada por Newton no século XVII é o mais emblemático registro que temos do estudo do espectro luminoso. A concepção newtoniana do espectro, vigoraria até o início do século XIX, quando instrumentos óticos mais sofisticados conseguem produzir imagens com maior poder de resolução, revelando evidências de subestruturas no interior do espectro solar. De maneira geral, as raízes da espectroscopia moderna podem ser identificadas com duas antigas linhas de pesquisa, a ótica física e a análise química da cor emitida por chamas, que acabaram por se desenvolver em áreas de pesquisa mais sofisticadas a partir dos trabalhos de Kirschhoff e Bunsen, no século XIX. No final daquele século, o matemático suíço Johannes Balmer encontra uma equação que, com uma enorme precisão, reproduz matematicamente os valores de comprimento das linhas do espectro do hidrogênio calculados experimentalmente por Ångström. Poucos anos depois, o físico Johannes Rydberg estende a equação de Balmer para outros elementos. A partir de então, passa a ser uma tarefa dos físicos elucidar por que razão a estrutura do átomo produz a regularidade matemática observada. No início do século XX, a espectroscopia assume papel central nas

investigações acerca da estrutura da matéria, primeiramente com o astrofísico inglês John William Nicholson, personagem central desta intervenção didática, para quem o espectro observado de nebulosas e coroas solares indicavam a existência de elementos primários, que seriam os constituintes de todos os elementos conhecidos da tabela periódica. Os trabalhos de Nicholson acabaram por influenciar a maneira como Bohr abordou o problema da estabilidade do átomo, desenvolvendo uma teoria que pôde dar uma base física a “misteriosa” regularidade do espectro visível do hidrogênio encontrada por Balmer.

2 - Newton

Em 1666, Newton se intrigava com os fenômenos cromáticos e passa a realizar uma série de experimentos fazendo incidir em um prisma triangular um feixe de luz que entra em um ambiente escuro através de um pequeno orifício feito em uma das janelas do cômodo. Constatando uma refração diferencial para as diversas cores e inclinado a sua concepção atomística da luz, Newton conceitualizou a luz branca como uma mistura heterogênea de corpúsculos de luz que estimulavam o olho humano a discernir cores devido as diferentes

refringências características desses corpúsculos. Em sua “*Nova teoria da luz e das cores*”, publicada originalmente em 1672, Newton tentava exprimir o indutivismo baconiano presente na recém-fundada Royal Society, mostrando como seu modelo corpuscular seria uma consequência inevitável dos experimentos realizados e deliberadamente omitindo a maioria de suas suposições mecanicistas. (HENTSCHEL, 2002). De fato, o físico inglês enxergou em seu experimento uma confirmação decisiva da natureza corpuscular da luz. Newton concluiu sua teoria das cores em 1671 e publicou seu primeiro trabalho sobre esse tema no ano seguinte, no *Philosophical Transactions*, através de uma carta ao Editor de Cambridge para ser comunicada à Royal Society (ROCHA, 2015):

“[...] a luz é um agregado confuso de raios constituída de todos os tipos de cores, como elas são promiscuamente lançadas das várias partes de corpos luminosos. E, como disse, de um tal agregado confuso é gerada brancura, se houver uma devida proporção dos ingredientes; mas se qualquer um predominar a luz deve inclinar-se àquela cor[...].”

Para Newton, seu experimento (*Experimentum Crucis*) refutava a concepção comum segundo a qual luz branca seria uma cor elementar e as demais suas derivadas. Newton projetou o espectro cromático como já havia feito anteriormente. Dessa vez,

entretanto, fez um segundo orifício na tela em que o espectro era projetado de modo que apenas luz de uma das cores atravessasse o segundo orifício.

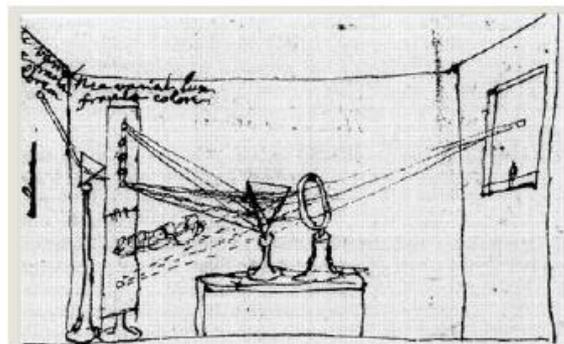


Figura 1: Uma variante do *experimentum crucis* de Newton de sua correspondência de 1721. Fonte (HENTSCHEL, 2002)

Atrás desta primeira tela, posicionara um segundo prisma e, atrás desse, uma segunda tela. Apenas a cor “selecionada” pelo segundo orifício era observada, o que o fez concluir que aquela cor não era constituída de outras mais elementares. A representação visual do espectro construída por Newton – que prevaleceu por cerca de cem anos – consistia em um “paralelogramo de luz, com limites circulares, no qual as sete cores gradualmente atizavam umas nas outras sem interrupção”.

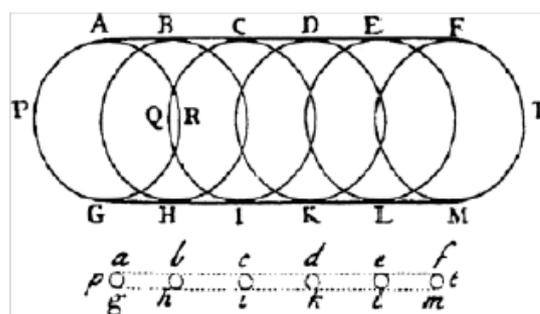


Figura 2 - A representação de Newton do espectro solar: uma superposição de círculos indicando a refração de cores primárias. O diagrama menor ilustra uma melhor separação de cores conseguida um orifício menor.

Inicialmente, em suas *Lectioe Oticae* (1670-1672), Newton havia dividido o espectro em cinco cores principais, posteriormente incrementando-o com laranja e índigo, sob o argumento de que a divisão em sete cores primárias simples era uma analogia harmônica com as sete notas musicais percebidas pelo ouvido humano. Para Newton, quão menor fosse o orifício pelo qual a luz do sol atravessa, menor seria a sobreposição entre cores adjacentes e, portanto, mas claramente se enxergaria a divisão heterogênea dos raios que compõe a luz. A incongruência do modelo newtoniano fica claro com o paralelogramo menor da Figura 2. Se as dimensões do orifício fossem suficientemente pequenas, a sobreposição dos círculos se extinguiria e deveria, então, haver “lacunas” de luz branca entre as cores contíguas. Se a redução do orifício produzia um espectro cada vez mais largo, com cores intermediárias ocupando os espaços entre as primárias, então a luz deveria ser composta por uma infinidade de corpúsculos de luz, e não apenas os sete propostos por Newton. Essa inconsistência entre a teoria e sua representação foi percebida apenas por Jean Baptiste Biot (1774-1862), em 1808. Entre os séculos 18 e 19, o esquema visual de Newton começa a sofrer críticas por defensores da teoria das três cores, que viam na escolha do número sete uma influência mística da astrologia sob o juízo de Newton.

3 - Fraunhofer

Linhas escuras no espectro solar foram primeiramente observadas em 1802 por William Hyde Wollatson. Àquela altura, Wollatson interpretou as linhas como limites entre quatro zonas coloridas, afastando-se tanto do modelo de três quanto do de sete cores. A cor vermelha era delimitada pelas linhas escuras que ele designou com A e B; verde amarelado delimitado pelas linhas B e C; azul situado entre C e D e, por fim, o violeta limitado por D e E. Outras duas linhas escuras foram observadas próximas à linha C, mas, como Wollatson não identificou nenhum matiz sendo isolado entre elas, nomeou-as com as letras minúsculas f e g. Era a primeira vez que havia sido notada uma estrutura interna no espectro além da sequência de cores do arco-íris. O uso de prismas mais sofisticados e de fendas mais estreitas permitiu a descoberta. A observação foi feita independentemente, muitos anos depois, por Fraunhofer. Joseph Fraunhofer (1787-1826) foi o primeiro a desenhar e gravar, em uma placa de cobre, uma representação do espectro solar que mereça o termo “mapa” (HENSTCHEL, 2002)



Figura 3- Selo usado em homenagem ao 200º aniversário de Fraunhofer representando sua famosa gravura de 1814 do espectro solar.

Fraunhofer contou centenas de linhas escuras no espectro solar e, assim como Wollaston, atribuiu letras para as mais proeminentes, se distanciando deste, entretanto, ao rejeitar a interpretação de que as linhas seriam limites entre cores. A descoberta do cientista alemão se popularizou internacionalmente com sucessivas reimpressões e traduções para o francês e inglês de sua obra. O interesse pelas “linhas de Fraunhofer” se intensifica durante a década de 30 alcançando um pico no final da década de 50.

4 - Kirschhoff e Bunsen

Até meados de 50, não havia muitas razões para acreditar que o espectro era “uma impressão digital” de elementos e compostos químicos. Pelo contrário, havia dados que sugeriam precisamente o contrário, por exemplo, a circunstância de que praticamente todos os espectros exibiam uma forte linha amarela. Além disso, estudos em química apontavam para uma impossibilidade em se distinguir hidrocarbonetos a partir de seus

espectros. Some-se a isso o fato de que grande parte dos físicos da época não nutriam grande interesse em problemas de composição química e, se nutrissem, não havia qualquer consenso acerca de qual seria a unidade fundamental a se correlacionar com as linhas do espectro. A estrutura da matéria era fundamentalmente um problema enfrentado por químicos, e diversos modelos atômicos, como os de Norman Lockyer e de William Prout, foram propostos ao longo do século XIX.

No meio da década de 1850, entretanto, um grande avanço tecnológico impulsionou os estudos espectroscópicos. Até então, os espectros produzidos por chama utilizavam pequenas temperaturas, uma limitação rompida pelo bico de Bunsen, um queimador de gás capaz de produzir temperaturas superiores a 1800°C. O novo instrumento permitiu uma mais detalhada comparação entre espectros de fonte distintas, um método de análise que seria explorado conjuntamente por dois cientistas, o analista químico Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899) e o físico versado em ótica Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), ambos da Universidade de Heilderberg.

A colaboração científica entre Kirchhoff e Bunsen lhes permitiu, em 1860, reproduzir o espectro dos metais alcalinos e alcalino-terrosos, incrementando no ano seguinte os recém-descobertos elementos rubídio e cézio. Segundo Hentschel (2002, p. 29), a imagem

do espectro produzido por Kirchoff e Bunsen passou a ser impressa repetidamente – aquele autor a considera a mais divulgada ilustração científica do século XIX - em todos os textos versando sobre o espectro, em catálogos de instrumentos e mesmo em pôsteres. A partir de então, há um crescimento rápido da antes tímida comunidade de espectroscopistas, o que leva a uma proliferação de espectros de outros elementos, seja utilizando o bico de Bunsen, seja fazendo uso de outros métodos.

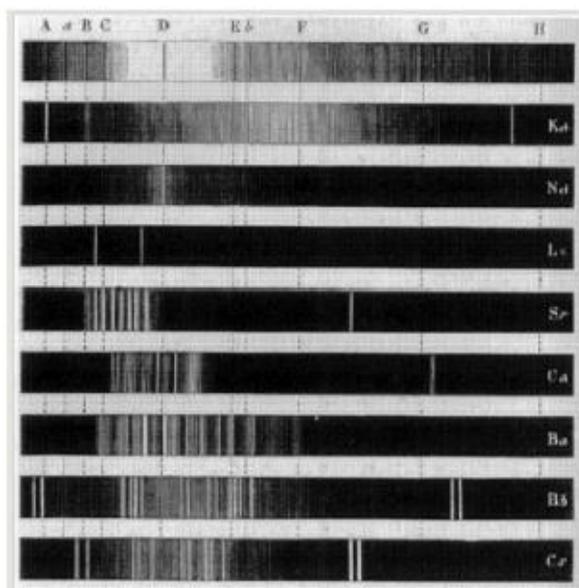


Figura 4 - Espectro produzido por Kirchoff e Bunsen para alguns elementos químicos.

A partir deste ponto, apesar de enfrentar alguma resistência inicial, a tese de Bunsen e Kirchoff, de que cada elemento possuía um ro característico, rapidamente se consolidou no cenário científico.

5 - Ângstron

O desenvolvimento da espectroscopia, a consciência de suas aplicabilidades,

demandava maior precisão dos dados, traduzida em uma maior quantidade de algarismos significativos nas medidas do espectro. Apesar do crescimento vertiginoso do interesse em análises espectroscópicas, a área de pesquisa enfrentava problemas técnicos enormes. Por exemplo, era comum que espectros de constituintes distintos fossem indistinguíveis, com linhas tão próximas que sugeriam uma superposição ao observador. Para se clarificar tais ambiguidades, eram necessárias redes de difração com um maior poder de resolução.

Dados mais precisos eram demandados também para confirmar ou refutar hipóteses correntes sobre a estrutura atômica e molecular. Além disso, os anos 1860 viram surgir a espectroscopia estelar, ou astroquímica, baseada na identificação de compostos químicos no espectro do sol e de outras estrelas. A identificação é possível quando traços do espectro terrestre de um elemento conhecido são encontrados no espectro dos astros.

A respeito das dificuldades impostas aos programas de pesquisa devido a essas limitações técnicas, William Huggins admitia que:

“A exatidão das determinações anteriores de espectros dos elementos terrestres é, na maioria dos casos, insuficiente para o trabalho moderno, tanto nas estrelas quanto no sol. [...]. O aumento do poder de resolução

comumente provoca a quebra (das linhas) em grupos [...] as linhas que outrora foram consideradas como únicas e suas supostas coincidências com as linhas terrestres, cai por terra. Por essa razão, muitas das primeiras conclusões feitas baseadas em observações tão boas quanto era possível à época com espectroscópios menos poderosos que os em uso, podem não ser mantidas diante do maior poder de resolução dos instrumentos modernos” (HENTSCHEL, p. 44)

Além das dificuldades relativas à espectroscopia celeste, uma linha de pesquisa efervescente identificava-se com a busca por regularidades matemáticas nos espectros, padrões que permitissem conjecturar sobre a estrutura da matéria, o que demandava medições precisas de comprimento de onda que permitissem estabelecer relações numéricas coerentes.

É compreensível, portanto, a ascensão do nome do até então desconhecido Ångstron no cenário científico da época, já que, com a publicação, em 1868, de seu *Atlas of the Normal Solar Spectrum*, conduziu a pesquisa em espectroscopia a um novo patamar.

Até a primeira metade da década de 1860, nenhum dos espectros produzidos possuía uma escala bem definida. Os espectros de átomos e moléculas eram geralmente apresentados juntos com o espectro solar para mapear 792 linhas, das quais identificou 5 %.

que se pudesse ter uma noção da posição das linhas de emissão/absorção na região do espectro eletromagnético.

Em um artigo publicado em 1823, Fraunhofer demonstrou que uma grade, ou rede, de linhas perfeitamente regular (até então, a dispersão era provocada por prismas) produzia um espectro através da interferência construtiva resultante da circunstância de que as diferenças entre frentes de onda seriam iguais a múltiplos inteiros de comprimento de onda. Fraunhofer nunca chegou a construir uma rede de difração, apesar de ter esboçado a sua estrutura geral. Durante a década de 1870, muito avanço ocorreu nesse sentido e, pouco a pouco, os prismas começaram a ser substituídos pelas redes.

A preferência por espectros gerados por redes de difração onde a posição das linhas era descrita em termos de comprimento de onda fez emergir a questão sobre qual unidade de medida deveria ser usada. Autores franceses preferiam o sistema métrico e utilizam frações de milímetro em suas medições, 10^{-10} m, dimensão que passou a ser chamada de Ångstron (Å) em homenagem ao físico Anders Jonas Ångström (1814–1874) que, em 1868, fazendo uso de uma rede de difração de alta qualidade, foi o primeiro a produzir um espectro onde a distância entre as posições das linhas eram diretamente proporcionais a comprimentos de onda. Angstron conseguiu

6- A equação de Balmer-Rydberg

“Me parece que o hidrogênio, mais que qualquer outra substância, está destinada a abrir novos caminhos para o conhecimento da estrutura da matéria e de suas propriedades. A esse respeito, as relações numéricas entre os comprimentos de onda das primeiras quatro linhas do espectro visível do hidrogênio deveriam atrair nossa atenção particular.” (BALMER, 1885)

Nos anos que se seguiram aos trabalhos de Kirchhoff e Bunsen, o que era perseguido com afinco pelos cientistas da época era uma relação quantitativa entre as linhas do espectro de um determinado elemento, bem como relações entre linhas de elementos distintos. O desenvolvimento de técnicas de registro de espectros de emissão e de absorção, estelares ou de átomos e moléculas terrestres, na medida em que aumentava o acesso da comunidade científica a esses dados, inflava o interesse por especulações acerca da forma do espectro. A busca por regularidades matemáticas, por uma harmonia numérica escondida entre as linhas do espectro, foi uma tônica desde as primeiras observações do espectro de linhas. O tópico permaneceu fascinante até o final do século XIX, atraindo grande interesse de cientistas de alguma maneira envolvidos com observações espectroscópicas. Apesar

disso, em 1881 Arthur Schuster declarava como as inúmeras tentativas de identificar padrões no espectro haviam falhado:

“O ambicioso objeto da espectroscopia é o estudo das vibrações de átomos e moléculas afim de obter a informação que pudermos sobre a natureza das forças que os liga... Mas não devemos esperar que tão cedo seja descoberta qualquer lei grandiosa ou mesmo de caráter muito geral, pois a constituição do que chamamos molécula é, sem dúvidas, muito complicada, e a dificuldade do problema é tão grande que, não fosse pela enorme importância dos resultados que finalmente esperamos obter, todos, exceto os mais otimistas, poderiam ser desencorajados em se empenhar em uma investigação que, após muitos anos de trabalho, poderia tornar-se infrutífera..... Enquanto isso, devemos acolher com prazer mesmo o menor passo dado na direção desejada.”

Ironicamente, não foram precisos mais que quatro após a fala de Schuster para que o professor de ensino médio suíço Johann Jakob Balmer (1825-1898) desse um grande passo em direção à elucidação da estrutura da matéria. Encorajado por um amigo a se debruçar sobre a busca por uma regularidade no espectro visível do hidrogênio, Balmer publica, em 1885, *Notiz über die Spektrallinien des Wasserstoff* (Nota sobre as

linhas do espectro do hidrogênio). Àquela altura já eram conhecidas as medidas muito precisas feitas por Ângstron (1868) das quatro linhas do espectro do hidrogênio.

Segundo Henstchel, diferentemente de físicos como Geoge Johnstone Stoney, que à época buscavam uma série harmônica que nutrisse a analogia da ótica com a acústica, Balmer deu um tratamento eminentemente geométrico ao problema. Foi justamente esse distanciamento da *Gestalt* operante que permitiu ao matemático suíço abordar a questão com um olhar completamente diferente.

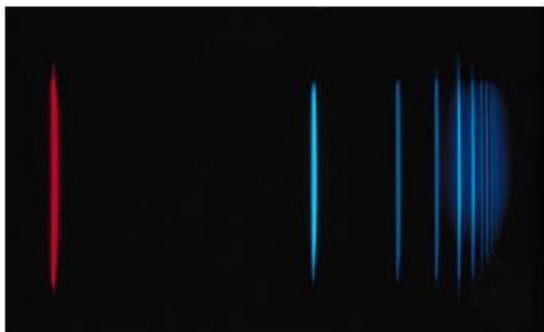


Figura 5 - A série de Balmer para o hidrogênio vista por um espectrômetro de baixa resolução. Fonte: Arthur L. Schawlow, Stanford University, and Theodore W. Hansch, Max Planck Institute for Quantum Optics

As medidas de comprimento de onda das quatro linhas do espectro visível do hidrogênio permitiam deduzir um fator comum, $3645,6\text{\AA}$, a que Balmer chamou de número fundamental do hidrogênio. Ao se multiplicar esse fator pelos coeficientes $9/5$, $4/3$, $25/21$ e $9/8$, se chegava,

respectivamente, às medidas das linhas $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$ e $H\delta$, com uma diferença de menos de $0,1\text{\AA}$ em relação aos valores encontrados por Ângstron em 1868.

According to the formula \AA ngström gives Difference			
$H\alpha$ (C-line) = $9/5 h = 6562.08$	6562.10	+0.02	
$H\beta$ (F-line) = $4/3 h = 4860.8$	4860.74	-0.06	
$H\gamma$ (near G) = $25/21 h = 4340$	4340.1	+0.1	
$H\delta$ (h-line) = $9/8 h = 4101.3$	4101.2	-0.1	

Figura 6 - Comparação entre valores encontrados por Ângstron e aqueles calculados pela fórmula de Balmer. Fonte (BALMER, 1966)

Em uma palestra intitulada *Naturforschende Gesellschaft in Basel*, dada em 25 de junho de 1884, Balmer nota que os coeficientes aludidos podem ter seus numeradores interpretados como uma sequência de quadrados perfeitos desde que se multiplique o segundo e o quarto coeficiente por $4/4$:

$$\frac{9}{5}h, \frac{4}{3}h, \frac{25}{21}h, \frac{9}{8}h$$

equivalent to

$$\frac{9}{5}h, \frac{16}{12}h, \frac{25}{21}h, \frac{36}{32}h$$

Figura 7 - Coeficientes resultantes do fator comum encontrado por Balmer para as linhas do H.

Ao perceber que os denominadores de cada coeficiente são a diferença entre seus

denominadores e o número quatro, Balmer encontrou uma equação para o comprimento das linhas do hidrogênio em função dos inteiros m e n :

$$\lambda = 3645,6 \frac{m^2}{(m^2 - n^2)}$$

Para a série de Balmer, $n=2$ e $m= 3, 4, 5, 6...$ De sua fórmula, Balmer deduziu que $6562,10 \text{ \AA}$ era o maior valor da série e todos os demais comprimentos de onda convergiam para o limite da série, $3645,6 \text{ \AA}$. Além disso, Balmer previu a existência de uma quinta linha ($m=7$), o que não tardou a ser confirmado. Finalmente, Balmer concluía seu artigo antevendo a descoberta das séries de Brackett, Paschen e Pfund:

“Nenhuma das linhas do hidrogênio que corresponda a fórmula quando $n=3, 4$ etc., e que podem ser chamadas de linhas de terceira ou quarta ordem, é encontrada em qualquer espectro conhecido; elas devem ser emitidas sob condições inteiramente novas de temperatura e pressão para que se tornem perceptíveis.”
(BALMER 1966).

Esta descoberta iniciou uma busca por fórmulas empíricas similares que se aplicariam a séries de linhas que pudessem ser identificadas na distribuição complicada de linhas que constituem os espectros de outros elementos. A maior parte desse trabalho foi feita em 1890 por Rydberg, que

considerou conveniente lidar com o recíproco do comprimento de onda das linhas em vez do seu comprimento de onda. (EISBERG, p. 136-7)

$$1/\lambda = R_h \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

onde R_h é a constante de Rydberg para o hidrogênio. Estava, assim, pavimentado o terreno científico onde os modelos atômicos do início do século XX estiveram alicerçados. O desenvolvimento da espectroscopia ao longo do século XIX foi crucial para que o “estado da arte” nos primeiros anos do século passado fornecesse uma base de dados suficiente para alavancar as investigações em estrutura da matéria. Os modelos atômicos de Nihcolson e Bohr fizeram uso, de maneiras distintas, desses dados espectrais, o que será objeto de discussão no texto seguinte.

REFERÊNCIAS

HENTSCHEL, Klaus. *Mapping the Spectrum: Techniques of Visual Representation in Research and Teaching*. Oxford University Press. New York, 2002.

ROCHA, F.J. *Origens e Evolução das Idéias da Física*. José Fernando Rocha (Org.). Salvador, EDUFBA, 2015.

BALMER, Johann Jacob, *Note on the Spectral Lines of Hydrogen*. *Annalen der Physik und Chemie* 25, 80-5 (1885) [as translated and published by Henry A. Boorse

& Lloyd Motz, *The World of the Atom*, Vol. 1 (New York: Basic Books, 1966) with omissions filled in by Carmen Giunta]

Texto III: A teoria atômica de Nicholson

Introdução

Em algum momento do ano de 1930, o astrofísico inglês John William Nicholson entrava numa das salas da Universidade de Oxford para ministrar para um público de cinco alunos a primeira aula de um curso de hidrodinâmica. Em roupas maltrapilhas e aspecto deplorável, Nicholson acendia um cigarro após o outro, apesar de ser expressamente proibido pela instituição. Em certo momento, alegando que suas gengivas coçam, arranca sua dentadura e a coloca na tribuna. A fala, naturalmente, se torna indistinguível... A impressão causada fora de tão modo negativa que, no dia seguinte, apenas dois alunos apareceriam para aula e no posterior, nenhum. Por acordo mútuo entre as partes, a disciplina foi cancelada.

O curioso relato, presente na biografia de Dorothy Wrinch⁵⁶, primeira e única esposa de Nicholson, parece descrever um cientista muito diferente daquele que falava, em 1912, na sessão reservada à espectroscopia do encontro da Associação Britânica, com a autoridade do primeiro estudioso a prever linhas espectrais de corpos celestes antes destas serem efetivamente observadas. Nicholson desenvolveu uma teoria atômica que, no início do século passado, era reconhecida pela comunidade como experimentalmente bem-sucedida e promissora. A teoria dos proto-elementos, apesar de equivocada, contribuiu para o avanço da antiga teoria quântica, sendo frequentemente reconhecida como uma fonte de inspiração importante para o átomo de Bohr. Nesse texto, investigaremos alguns aspectos do modelo atômico de Nicholson e sua relação com o modelo de Bohr. O episódio histórico suscita questões de interesse para a Natureza da Ciência, dentre as quais podemos destacar: qual o papel do erro científico para o desenvolvimento da ciência?

A visão de Nicholson sobre o átomo em 1911

A teoria atômica do físico-matemático e astrofísico inglês John William Nicholson foi proposta pela primeira vez em 1911. A partir de então, Nicholson deduz as implicações de seu modelo para a espectroscopia estelar e para a tabela periódica. O astrofísico inglês é comumente

⁵⁶ (SENECHAL, 2013)

reconhecido como o primeiro a interpretar a constante de Planck como momento angular, noção física crucial ao modelo atômico proposto por Bohr, em 1913. Esta seria, então, a grande contribuição dada por Nicholson para a edificação da antiga teoria quântica; ao tomar conhecimento de seu trabalho, no inverno de 1912, Bohr redireciona sua pesquisa e acaba por desenvolver o seu bem-sucedido modelo atômico. O objetivo deste texto é investigar a origem das ideias de Nicholson acerca da estrutura atômica de modo a podermos mensurar a magnitude de sua contribuição à Física Moderna. Se de fato a teoria de Nicholson desempenhou um sério papel motivador nos estágios iniciais do trabalho de Bohr, então suas ideias deveriam ser creditadas como essenciais para os grandes avanços teóricos na Física do primeiro quarto do século passado.

Apesar de ser lembrado como um dos primeiros a propor uma teoria atômica quântica, Nicholson pertence a uma tradição de cientistas que tentaram descrever a estrutura atômica a partir de leis clássicas. A noção de quantum de ação só aparece cerca de um ano depois de elaborada sua teoria atômica. Diferentemente de Bohr, mesmo após ter introduzido a quantização em sua teoria, Nicholson permanece considerando que a radiação atômica ocorria por meio de mecanismos descritos pela eletrodinâmica clássica.

Os passos intelectuais seguidos por Nicholson podem ser resumidos da seguinte forma: após postular que todos os elementos terrestres eram constituídos de uma classe de elementos mais simples⁵⁷ e cuja existência só poderia ocorrer na superfície de estrelas e em nebulosas, Nicholson define suas estruturas dinâmicas e as submete a testes quantitativos, notadamente, a derivação dos pesos atômicos dos elementos conhecidos àquela altura e as frequências espectrais que seriam emitidas por tais “proto-elementos”⁵⁸.

⁵⁷ Entre o final do século XIX e início do século XX, era muito comum a ideia de que os elementos terrestres seriam a evolução de formas mais simples, identificáveis em condições celestiais. O astrofísico inglês Sir Norman Lockyer (1836 – 1920) foi o primeiro, em 1897, a conjecturar que algumas linhas espectrais não identificadas eram devidas à “dissociação” do elemento químico em formas mais elementares da matéria, que ele chamou de proto-elementos. Os estudos de Lockyer surgem três anos antes da “descoberta” do elétron e são considerados (ROBOTTI e LEONE, 2000) como decisivos para o convencimento de J. J. Thomson de que o átomo era complexo e divisível. Como vimos no texto passado, o campo de pesquisa da astrofísica viveu, nas últimas décadas do século XIX, uma evolução impressionante, impulsionada pelos constantes aprimoramentos de equipamentos e traduzida na descoberta do hélio em 1868, por Jules Janssen e Norman Lockyer, fato que causou forte impressão em Nicholson.

⁵⁸ Como suas investigações abarcavam, no mínimo, três distintas áreas de conhecimento, Nicholson dividiu suas publicações entre dois grandes periódicos da época: os cálculos das frequências espectrais foram publicados na *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* enquanto a derivação dos pesos atômicos de seus protoelementos foi apresentado na *Philosophical Magazine*, em 1911, em um longo artigo intitulado *A Structural Theory of the Chemical Elements*.

Para Nicholson, os elementos terrestres exibiam uma complexidade que tornava utópica qualquer tentativa de matematizar a sua estrutura. Evidência da alta complexidade dos elementos terrestres era a de que mesmo o átomo de hidrogênio exibia um espectro com uma enorme quantidade de linhas de emissão. Apenas as formas elementares, detectáveis graças à astrofísica, permitiriam um tratamento matemático mais simples e eficiente. Em 1911, aos 30 anos de idade, Nicholson já havia produzido cerca de 25 publicações científicas, praticamente todas concernentes a tópicos em eletrodinâmica e eletromagnetismo. Ele já havia iniciado uma rota para compreensão da estrutura do átomo ao desenvolver uma teoria dos metais⁵⁹, exibindo grande interesse por questões envolvendo a natureza de corpúsculos elementares, suas massas, distribuição de cargas e propriedades dinâmicas e radioativas. Quando começou a desenvolver sua teoria atômica, portanto, Nicholson possuía uma visão definida acerca dos constituintes elétricos do átomo. De maneira resumida, Nicholson via o átomo como um sistema eletrodinâmico constituído de minúsculas partículas carregadas negativamente orbitando uma esfera de carga positiva - de dimensão ainda menor que a do elétron - a que chamou de núcleo.

Apesar da teoria de Nicholson ter sido publicado apenas alguns meses depois da exposição dos resultados dos experimentos com espalhamento de partículas alfa levado a cabo por Rutherford, e a despeito da similaridade entre os dois modelos, o astrofísico inglês asseverou que o modelo do físico de Manchester não foi uma grande influência para o seu trabalho. Nicholson considerava que o modelo atômico de Rutherford, com um núcleo simples, era apropriado para descrever os elementos primários, mas não os terrestres. Além do modelo saturniano apresentado pelo físico japonês Hantaro Nagaoka, em 1901, os trabalhos de J. J. Thomson foram uma forte fonte de inspiração para a teoria de Nicholson. Tanto Nagaoka quanto Thomson estavam preocupados em resolver conhecida instabilidade dinâmica dos anéis de elétrons.

⁵⁹ “On the Number of Electrons concerned in Metallic Conduction.” (1911)

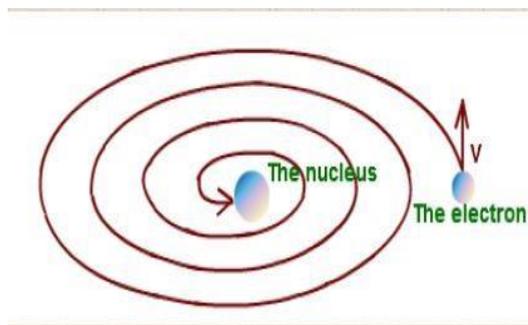


Figura 1: Representação do "colapso" do átomo previsto por Joseph Larmor em 1900. Segundo o eletromagnetismo clássico, uma partícula acelerada e carregada orbitando um núcleo de carga oposta deveria rapidamente espiralar em direção ao núcleo.

Enquanto o físico japonês parece não ter sido capaz de superar o problema da instabilidade⁶⁰, Thomson construiu um modelo eletrodinamicamente estável ao situar o anel de elétrons no interior de uma esfera de carga positiva. Os átomos primários de Nicholson eram essencialmente átomos de Thomson com a esfera positiva reduzida a uma dimensão inferior à do próprio raio do elétron⁶¹.

“Sir J. J. Thomson tratou os elétrons no átomo como girando dentro da esfera positiva, que possuía tamanho atômico. Na visão desenvolvida nesse artigo, a carga positiva existe em unidades com raio muito pequeno, mesmo quando comparado com o do elétron, e é a fonte de quase toda a massa do átomo.”
(NICHOLSON, 1911)

⁶⁰ George A. Schott (1904) apontou que o modelo de Nagaoka, diferentemente do de Thomson, era instável para vibrações no plano do anel.

⁶¹ O argumento de Nicholson para reduzir tão drasticamente o tamanho do núcleo tem como origem uma série de estudos realizados entre 1910 e 1911 onde conclui que toda a massa deve ter uma origem elétrica. De acordo com essa visão, a massa de uma esfera carregada era representada pela quantidade $\frac{2}{3} e^2 / ac^2$, onde e é a carga, a o raio e c a velocidade da luz. Se o núcleo de fato fosse responsável pela maior parte da massa do átomo, seu raio deveria ser muito menor que o do elétron.

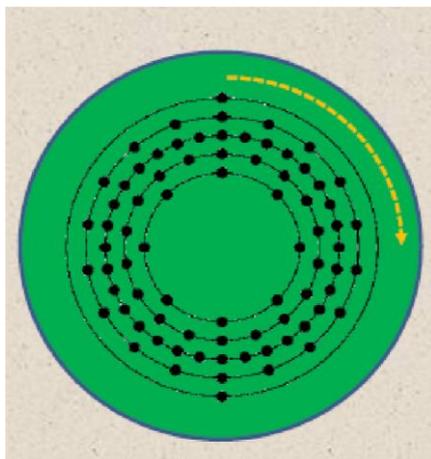


Figura 9- Modelo atômico proposto por J. J. Thomson em 1904, o átomo do "pudim de passas".

Convencido de que a infinidade de linhas espectrais (observadas mesmo no átomo de hidrogênio) era consequência dos inúmeros graus de liberdade dos elementos terrestres, Nicholson supunha que seus átomos primários possuíam apenas um anel de elétrons. Dessa maneira, o pequeno número de modos de vibração de um dado anel era essencialmente o número de graus de liberdade correspondente ao átomo primário de sua teoria. Distintamente da trajetória de Bohr, a instabilidade do modelo não era uma questão central para Nicholson porque ele poderia sempre argumentar que os seus elementos primários estavam continuamente perdendo e ganhando elétrons nas condições extremas da superfície de estrelas e nebulosas:

A instabilidade de um único átomo tem sido usada contra o modelo de Nagaoka, mas em uma massa de gás por exemplo, em que elétrons estão livres para se deslocar de átomos instáveis para estáveis, a crítica não me parece válida (...). Existem muitos fenômenos físicos que podem facilmente receber uma explicação, se átomos individuais de um corpo não podem manter estáveis todos os seus elétrons. (NICHOLSON, 1911⁶²)

De qualquer modo, Nicholson conferiu uma estabilidade eletrodinâmica ao seu átomo considerando um arranjo simétrico em que os elétrons do anel estariam separados entre intervalos angulares iguais, de modo que o vetor soma da aceleração central de todos os elétrons fosse igual a zero. Este “truque” de Nicholson teria consequências dramáticas para sua teoria,

⁶² “Constitution of Solar Corona”

uma vez que impossibilita a existência de um sistema atômico de um único elétron. Ironicamente, a aceitação da teoria de Bohr, dois anos mais tarde, estava assentada na sua capacidade de derivar os espectros dos átomos de hidrogênio e de hélio ionizado.

Derivação de pesos atômicos

A relação da teoria de Nicholson com os dados experimentais seguiu por dois caminhos distintos. Ao estabelecer teoricamente o sistema dinâmico de seus proto-elementos ele foi capaz de (i) explicar os pesos atômicos dos elementos terrestres como compostos desses elementos mais elementares, de peso conhecido; e (ii) identificar as frequências das linhas dos espectros de nebulosas e de coroas solares com as vibrações produzidas pelas configurações destes elementos primários. A derivação dos pesos atômicos foi apresentada detalhadamente por Nicholson no artigo de 1911 *A Structural Theory of Chemical Elements*, publicado na *Philosophical Magazine*.

Ao excluir a possibilidade de existência de um elemento primário com apenas um elétron no anel, o “coronium” - que possuiria dois elétrons orbitando um núcleo com carga positiva igual a duas unidades de elétron - era o átomo mais simples e mais leve da teoria de Nicholson.

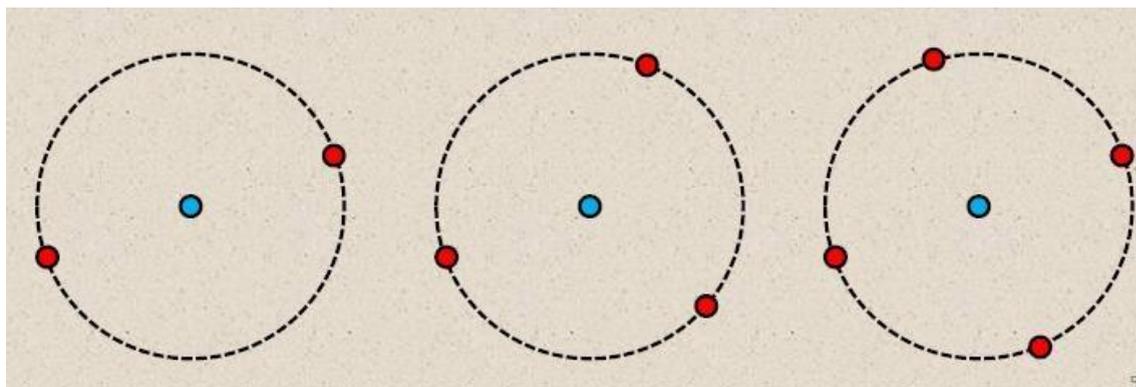


Figura 3 - Representação dos três primeiros elementos da teoria de Nicholson: coronium, hidrogênio e nebulium. Fonte (MARTINS, 2013)

Em seguida, aparecia o proto-elemento “hidrogênio”⁶³, contendo um anel de três elétrons; o “nebulium”, com quatro elétrons; e o “proto-fluor” com cinco elétrons. Os proto-elementos de Nicholson eram identificados em função da carga do núcleo; se, por exemplo, um

⁶³ Ver legenda da figura 2.

átomo com quatro unidades de carga em seu núcleo possuir menos ou mais que quatro elétrons orbitando no anel, ele continuaria sendo um “nebulium”. A ligação entre átomos primários seria a causa de existência dos diversos elementos terrestres conhecidos. A natureza da ligação foi exemplificada por Nicholson da seguinte forma: um elemento terrestre constituído por nebulium e proto-fluor seria formado por dois anéis coplanares de quatro e cinco elétrons e por dois núcleos que não fundiriam em um só. Para Nicholson, a complexidade do núcleo era essencial para dar conta dos conhecidos fenômenos radioativos. A razão para que Nicholson tenha estabelecido a existência de apenas quatro elementos primários é que ele julgou não ser necessário mais que isso para derivar os pesos atômicos constantes na tabela periódica.

element	symbol	nuclear charge	atomic weight
coronium	Cn	2e	0.51282
'hydrogen'*	H	3e	1.008
nebulium	Nu	4e	1.6281
Protofluorine	Pf	5e	2.3615

Tabela 1 - Os proto-elementos de Nicholson e seus pesos relativos hipotéticos. *Nicholson não achava que o hidrogênio primário era necessariamente o mesmo que o ordinário, mas que o último era constituído de duas ou três unidades do primeiro. A razão para

Com a suposição da distribuição uniforme da carga positiva na esfera do núcleo, com a expressão que obtinha para determinação da massa de uma esfera carregada (ver nota de rodapé 8) e atribuindo ao proto-hidrogênio o peso atômico de 1.008, Nicholson fixou, a partir de passos matemáticos que não detalharemos por fugir do escopo do trabalho, os pesos relativos de seus elementos primários. Desse ponto em diante, tudo o que o astrofísico fez foi, por tentativa e erro, combinar aritmeticamente os pesos dos elementos primários até que coincidisse com os elementos conhecidos da tabela periódica. Com esse expediente, Nicholson conseguiu identificar todos os elementos da tabela periódica como uma composição de seus três⁶⁴ átomos fundamentais:

⁶⁴ Nicholson julgava que o coronium não poderia existir na atmosfera terrestre sequer na forma ligada.

H	H	1.008	1.008
He	Nu+Pf	3.99	3.99
Li*	3Nu + 2H	6.90	6.94
Be	3Pf + 2H	9.097	9.10
B	2He + 3H	11.00	11.00
C	2He + 4H	12.00	12.00
N	2He + 6H	14.02	14.01
O	3He + 4H	15.996	16.00
F	3He + 7H	19.020	19.00
Ne	6 (Pf + H)	20.21	20.21
Na	4He + 7H	23.008	23.01

Tabela 2 – Interpretação dada por Nicholson aos doze primeiros elementos da tabela periódica em função dos seus proto-elementos. Fonte (SCERRI, 2016).

A primeira aparição pública da teoria atômica de Nicholson acontece num encontro da British Association na cidade portuária de Portsmouth, em agosto de 1911. O método de Nicholson, apesar da acurácia dos resultados, não fora recebido com muito entusiasmo pelos presentes:

A coincidência entre os valores calculados e observados é grande, conquanto a atitude geral dos presentes é de cautela em face de uma pendência de apresentação mais completa do artigo, além do fato de que um esquema completo da constituição da matéria deve, ao fim e ao cabo, dar uma explicação espectral satisfatória.⁶⁵

Nicholson já parecia antever que críticas dessa natureza seriam feitas a um modelo que não fornecesse uma boa acomodação dos dados experimentais fornecidos pela espectroscopia, razão pela qual *The Spectrum of Nebulium*, onde discutia justamente a acomodação de linhas do espectro de nebulosas com as vibrações do nebulium, foi publicado apenas dois meses depois, em novembro, na *Monthly Notices*.

Explicação e predição de linhas espectrais.

⁶⁵ Anônimo, *Nature*, 12 de outubro, 1911, p. 501.

Na comunicação feita em Porthsmouth, onde apresentou os pesos atômicos de seus proto-elementos e a derivação dos pesos dos elementos terrestres conhecidos a partir destes, Nicholson já adiantara que algumas das linhas não identificadas (que não puderam ser associadas nem ao hélio nem ao hidrogênio) do espectro de nebulosas foram atribuídas ao nebulium. Além de acomodar diversas linhas observadas, Nicholson foi capaz de prever a ocorrências de algumas linhas não identificadas, o que, naturalmente, lhe conduziu a um status de autoridade científica na área. Os resultados da identificação quantitativa desses espectros foram apresentados numa série de artigos publicados na *Monthly Notices*, que eventualmente seriam lidos por Bohr e que muito provavelmente reorientaram a direção das investigações do físico dinamarquês.

Ao ter “encolhido” a esfera positiva do modelo de Thomson, Nicholson abre mão da dimensão linear do átomo, e, portanto, lhe era impossível calcular isoladamente as frequências transversais permitidas para um de seus elementos, mesmo com a suposição de que a frequência transversal de um elétron era igual a sua frequência de rotação em torno do núcleo. Entretanto, percebeu que as razões entre as frequências de vibração permitidas para um anel com o mesmo número de elétron dependiam apenas da quantidade de elétrons no anel e da carga do núcleo, e não de parâmetros do átomo tais como raio e velocidade angular. Por tentativa e erro, passa a procurar equivalência entre as razões das frequências permitidas para o nebulium com as razões entre linhas observadas na nebulosa de Orion. Com esse expediente, consegue acomodar com grande acurácia dez das doze linhas nebulares conhecidas àquela altura. Nicholson “valida” suas conclusões desenvolvendo um cálculo da probabilidade de as correspondências serem fortuitas, levando em consideração a extensão do espectro, a largura das linhas etc., concluindo que a chance era desprezível.

Além de acomodar um grande número de dados experimentais em sua teoria, Nicholson previu, em *The Spectrum of Nebulium*, a existência de uma nova linha de 4352.9 \AA na nebulosa de Orion. Pouco tempo depois, foi observada no Observatório Lick uma linha de 4353.3 \AA , um erro de apenas 0,009%. Em seguida, Nicholson experimentou uma nova vitória para sua teoria, na forma, mais uma vez, de uma predição bem-sucedida de linha espectral, dessa vez identificada com o “proto-fluor” e com um percentual de erro ainda menor: na segunda predição (agora, um erro de apenas 0,003%), a linha observada media $6374,6 \text{ \AA}$, valor muito próximo dos cálculos do astrofísico, de $6374,8 \text{ \AA}$. Apesar dessas consideráveis vitórias, sua teoria ainda estava incompleta.

Nicholson havia fixado teoricamente o raio de seu elemento primário nebulium,

“corrigindo” a deficiência provocada pelo encolhimento do átomo de Thomson, e assim demonstrado que tais dimensões estavam em acordo com as dimensões atômicas. Mas a verificação deste resultado só seria possível experimentalmente, sem a qual a teoria de proto-elementos era apenas uma hipótese não testada. Outra incompletude de sua teoria era a inexistência de uma equação que relacionasse as configurações das frequências de vibração calculadas em anéis com diferentes números de elétrons. Essas eram as questões que intrigavam Nicholson quando, em dezembro de 1911, publica *The Constitution of the Solar Corona I.: Protofluorine*, onde, analogamente ao que fez em *The Spectrum of Nebulium*, tentaria relacionar as frequências espectrais da coroa solar com o elemento primário proto-fluor. Em junho de 1912, seria publicado *The Constitution of Solar Corona II*, onde mais uma vez o proto-fluor seria usado para interpretar linhas espectrais.

Introdução da constante de Planck

A primeira menção à constante Planck na obra de Nicholson ocorre em julho de 1912. Nicholson acreditava que ali se encontrava a resposta para correção da incompletude de sua teoria. Ao observar que seus átomos primários dividiam uma característica essencial com os osciladores de Planck, a saber, o de possuir uma frequência principal que era também uma das linhas mais fortes dos espectros atômicos de seus proto-átomos, Nicholson concluía que a constante de Planck deveria ter um significado atômico (SCERRI, 2016; MCCORMARCH 1966):

A constante da natureza, em termos de seus espectros, parece poder ter sido expressa por Planck, na sua recente teoria quântica da energia. É evidente que o modelo do átomo com que lidamos tem muitas das características essenciais de um oscilador de Planck. Eles possuem uma frequência principal $\omega/2\pi$, onde ω , é a velocidade angular dos elétrons dentro de um átomo. Não é desejável, neste trabalho, dar qualquer explicação detalhada dos princípios da teoria de Planck, mas iremos dispor de seus principais resultados. (NICHOLSON, 1911, p 148)

A forma pela qual Nicholson chegara à constante de Planck entre dezembro de 1911 e julho de 1912 foi através do cálculo da razão entre a energia potencial de uma partícula e sua frequência de rotação. O seu talento em estabelecer relações numerológicas talvez já tenha ficado claro ao longo do texto, portanto, não deve surpreender que o físico tenha descoberto que tal valor é sempre um múltiplo da constante de Planck. Primeiramente, Nicholson expressou a energia potencial do anel como sendo $mna^2\omega^2$, onde m era a massa do elétron, n o número de elétrons no anel, a o raio, e ω a velocidade angular. Utilizando os valores previamente encontrados para a velocidade angular e o raio do proto-fluor, ele calculou a razão entre energia potencial da partícula e sua frequência rotacional:

$$\frac{mna^2\omega^2}{\omega/2\pi} = 154.94 \times 10^{-27} \text{ erg seconds.}$$

Esse valor era aproximadamente 25 vezes a constante de Planck (considerando-se a acurácia experimental da determinação dos valores de carga e massa dos quais a e ω eram dependentes), cujo valor à época era 6.548×10^{-27} erg segundos. O ineditismo das ideias de Nicholson não reside, entretanto, neste tratamento da constante de Planck, uma vez que o fato dessa constante ser associada com energia não era exatamente uma novidade à época. A verdadeira contribuição de Nicholson para o desenvolvimento da teoria atômica reside no entendimento que tinha do momento angular, a saber, este deveria ser quantizado em termos do quantum elementar de ação. Para isso, reescreveu o a razão entre energia e frequência acima como:

$$2\pi mna(a\omega) = 2\pi \text{ vezes o momento angular do anel}$$

Assim como chegara à conclusão de que o átomo deveria ser um sistema saturniano independentemente e de forma alheia aos trabalhos de Rutherford, a afirmação da quantização do momento angular do elétron - noção nuclear à teoria quântica que ajudou a garantir o sucesso do átomo de Bohr – por Nicholson se deu de maneira distinta do itinerário científico de Niels Bohr. Se para o físico dinamarquês a quantização das órbitas eletrônicas foi “imposta” por meio de seus postulados quânticos, para Nicholson tal noção surge como uma derivação de sua teoria atômica peculiaríssima, baseada na mecânica clássica:

(...) ele não construiu uma teoria sobre hipóteses quânticas que ele teria considerado arbitrárias. Ao invés disso, ele estabelece sua teoria clássica para estrutura atômica, uma teoria que parecia correta mas incompleta, e nela busca o papel que a constante de Planck desempenha em sistemas atômicos com os valores numéricos precisos que apenas sua teoria poderia produzir. (MCCORMARCH, 1966 p.169)

Com a aplicação da constante de Planck a sua teoria, Nicholson chega a uma expressão a partir da qual consegue determinar as frequências espectrais de uma maneira muito mais prática que a anterior. Com este novo método de calcular as frequências espectrais, Nicholson chega ao número de vinte e uma linhas dos espectros de nebulosas e da coroa solar identificadas em função de seus proto-elementos e passa a ser tratado como uma autoridade científica tanto no campo da espectroscopia como no campo de estrutura da matéria.

Recepção e legado

Afinal de contas, qual o legado de Nicholson para a História da Ciência, qual a imagem que lhe compete no quadro geral do desenvolvimento dos primórdios da antiga teoria quântica? A de um cientista que deu sólidas contribuições ao progresso da ciência ou a de uma figura menos relevante, que derivou a maior parte de suas conclusões científicas no que hoje se sabe serem erros científicos? Recentemente⁶⁶, o renomado historiador da física John Heilbron comentou, em uma palestra na Sociedade Americana de Física, sobre como o trabalho de Nicholson com o neblium foi “espetacular” e como Bohr foi fortemente inspirado por essa pesquisa. Segundo Heilbron:

O sucesso do átomo de Nicholson incomodou Bohr. Ambos modelos pressupunham um núcleo e ambos obedeciam ao quantum; entretanto, o de Nicholson irradiava – e com acurácia sem precedentes – enquanto o de Bohr era, por assim dizer, espectroscopicamente mudo. No natal de 1912, Bohr elaborou um compromisso: seus átomos eram relativos ao estado fundamental, quando toda a energia permitida havia sido irradiada; Nicholson lidava com

⁶⁶ J. Heilbron's APS plenary lecture, March, 2013.

estágios iniciais.... Como um átomo de Nicholson alcançava seu estágio fundamental, Bohr nunca se preocupou em especificar. Ele queria meramente estabelecer a compatibilidade entre os dois modelos. O compromisso com Nicholson era deixar um legado importante para a forma definitiva da teoria. No mesmo artigo, Bohr propõe outras formulações de sua regra quântica, incluindo, com total reconhecimento da prioridade de Nicholson, a quantização do momento angular.⁶⁷

De fato, Bohr expressava grande preocupação com a maneira como sua teoria se relacionava com a de Nicholson, como evidencia uma carta enviada a seu irmão em 1912:

A teoria de Nicholson não é incompatível com a minha. Na verdade, meus cálculos seriam válidos para o estado químico final dos átomos, enquanto Nicholson lidaria com os átomos que emitem radiação quando os elétrons estão em processo de perda de energia antes de terem ocupado suas posições finais. A radiação passaria, assim, por pulsos e Nicholson estaria considerando os átomos enquanto seu conteúdo energético ainda é muito grande a ponto de emitirem luz no espectro visível. Mais tarde, a luz é emitida no ultravioleta, até que finalmente a energia que pode ser irradiada é perdida ... (Bohr para Harald)

Mesmo após a publicação de *Sobre a Constituição de átomos e Moléculas*, em 1913, a teoria de Nicholson continuou a gozar de prestígio da comunidade científica. Por exemplo, McCormack (1966, p. 183) reproduz uma fala feita por W. M. Hicks em um encontro na Austrália em 1914:

As frequências calculadas por Nicholson (em comparação com as) observadas são tão próximas e numerosas a ponto de não deixar dúvidas da exatidão da teoria.... A teoria de Nicholson se coloca sozinha como a primeira teoria satisfatória de um tipo de espectro.

⁶⁷ J. Heilbron, "Lectures in the History of Atomic Physics, 1900–1922." Em *History of Twentieth Century Physics*, C. Weiner, ed., 40–108, Academic Press, New York, 1977, p. 69.

Abraham Pais, autor da mais importante biografia de Niels Bohr, de quem foi amigo pessoal e com quem conviveu por décadas, afirma que:

Bohr não estava impressionado por Nicholson quando ele o encontrou em Cambridge em 1911 e algum tempo depois disse que todo o trabalho de Nicholson não era muito bom. Seja como for, Bohr tomou nota de suas ideias do momento angular em um momento crucial para ele... Ele também o citou no seu artigo sobre o hidrogênio. É muito provável que, à época, o trabalho de Nicholson o tenha influenciado. (PAIS, 1995, p. 41)

O historiador da ciência Helge Kragh, por sua vez, escreve que:

Não é de admirar que Bohr, ao encontrar a teoria atômica de Nicholson, achou interessante e perturbadoramente semelhante às suas próprias ideias. O átomo de Nicholson era um rival para Bohr e Nicholson era o principal crítico das ideias de Bohr sobre o átomo quântico. (KRAGH, 2012, p. 27)

Em sua tese de doutorado onde investiga os modelos atômicos do início do século XX, Cesar Lopes também assegura a importância da teoria do astrofísico inglês para o progresso da ciência:

(...) Nicholson foi desaparecendo do cenário e a trilha do átomo de Bohr, apesar dos problemas que esse modelo apresentava, levou a pesquisa da estrutura atômica da mecânica quântica. Mas essa trilha começou a ser percorrida nas estrelas, nas investigações sobre os átomos das estrelas e seus espectros, que conduziram Nicholson a propor seu modelo que foi de fundamental importância para o desenvolvimento das hipóteses de Bohr (LOPES, 2009)

Nem todos, entretanto, concordam com a relevância de Nicholson para a trajetória intelectual trilhada por Bohr. As mais duras críticas direcionadas à teoria de Nicholson partiram,

certamente, de Leon Rosenfeld, amigo íntimo de Bohr que, em um prefácio a uma edição de *Sobre a constituição de átomos e moléculas* descreve a pesquisa levada a cabo por Nicholson como uma série de precipitações e coincidências:

(...) a razão das frequências dos dois primeiros modos coincide com a de duas linhas dos espectros nebulares: isso é suficiente para Nicholson ver neste sistema um modelo do átomo neutro do "nebulium"; e, por sorte, a frequência do terceiro modo, que ele pôde então calcular, também, coincidiu com a de outra risca nebular, a qual – para tornar as coisas ainda mais dramáticas – não era conhecida quando fez a predição na sua primeira memória, mas foi realmente encontrada um pouco mais tarde. (...) Sob o ponto de vista matemático, a discussão de Nicholson das condições de estabilidade relativas às configurações anelares e dos seus modos de oscilações é um hábil e esmerado trabalho; mas a maneira pela qual tenta aplicar o modelo à análise das situações físicas choca pela sua precipitação e diletantismo, de modo que não podem deixar de considerar-se como acidente desafortunados os casos em que realmente obteve concordância entre algumas das suas frequências calculadas e as frequências das riscas espectrais observadas. (...) No terceiro artigo (...) ocorre a primeira menção a constante de Planck em conexão com o momento angular dos elétrons girantes: novamente aqui não há qualquer argumento físico, mas apenas uma exibição de numerologia. Bohr não teve contato com as investigações de Nicholson, como veremos, antes do final de 1912, quando ele já havia dado suas próprias ideias de estrutura atômica na sua forma totalmente desenvolvida.⁶⁸

Analogamente, o respeitado historiador da ciência Max Jammer defende o ineditismo das ideias de Bohr, afirmando que:

⁶⁸ L. Rosenfeld, in preface to N. Bohr, *On the Constitution of Atoms and Molecules*, W.E. Benjamin, New York, 1963, p. xii.

Deve ser lembrado que as antecipações de Nicholson de algumas das conclusões de Bohr estavam baseadas, como apontou Rosenfeld, sobre as fundamentos mais questionáveis e eventualmente falaciosos⁶⁹.

Finalmente, Russel McCormarch, autor da mais completa análise sobre a teoria atômica de Nicholson finaliza seu texto afirmando que, apesar da teoria do astrofísico ter sobrevivido à publicação do modelo de Bohr, em 1913, ia se tornando claro:

(...) com a perspectiva do tempo, que o grande ponto de influência de Nicholson sobre a física não estava em 1914 ou qualquer período depois, mas no inverno de 1912, quando Bohr leu os artigos da *Monthly Notices* (MCCORMARCH, 1966, p. 184).

Qualquer que tenha sido o impacto da obra de Nicholson sobre Bohr, fato é que o modelo do físico dinamarquês se tornou, em poucos anos, um consenso e a base para a formulação da Mecânica Quântica, cerca de uma década depois. Bohr se consagrou como um dos mais importantes físicos do século XX e sua obra de 1913 figura entre os textos mais importantes da História da Ciência. A consolidação da teoria de Bohr será o objeto de análise do próximo texto.

REFERÊNCIAS

LOPES, Cesar. *Modelos atômicos no início do século XX: da física clássica à introdução da teoria quântica*. 2009, 173 p. Tese (Doutorado). Pontifícia Universidade Católica de São Paulo. São Paulo, 2009. .

NICHOLSON, J. W. *A Structural Theory of the Chemical Elements*. *Phil. Mag.*, ser. 6, 22, 864-889, 1911

NICHOLSON, J. W. *Constitution of Solar Corona II*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 677-692, 1912

⁶⁹ M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, New York, 1966, p.73

MCCORMARCH, Russel. *The Atomic Theory of John Willian Nicholson*. Archive for History of Exact Sciences, v.3, pp. 161-184, 1966.

SCERRI, Eric. *A Tale of Seven Scientists and a New Philosophy of Science*. Oxford University Press, 2016.

Apêndice D

Sub-representação de Nicholson na história e ensino de ciência.

Como ponto de partida desta pesquisa, foi feito um mapeamento de trabalhos das áreas de Ensino, Filosofia e História das Ciências que versam sobre o período histórico de nosso interesse. O objetivo era testar a hipótese de que há uma carência em trabalhos que discutem o papel desempenhado por John William Nicholson no desenvolvimento da Antiga Teoria Quântica. Para tal, levantamos 33 trabalhos publicados até, no máximo, 20 anos, na forma de artigos acadêmicos, teses e dissertações, a partir de buscas nas bases de dados *Scielo* e *Web of Science*, que dão acesso ao acervo de revistas conceituadas na área de ensino, filosofia e história das ciências. As palavras-chave utilizadas foram: modelo atômico, problema da estabilidade do átomo, Niels Bohr, John William Nicholson, átomo de Bohr, modelo de Bohr e Antiga Teoria Quântica. Na área de educação em ciência, foram analisados não só trabalhos que fazem uso da História e Filosofia da ciência (HFC), mas também aqueles adotam uma metodologia tradicional, pro exemplo, priorizando a experimentação. Naturalmente, em trabalhos desse tipo, que tem objetivos de aprendizagem de conceitos físicos, constatou-se uma previsível inexistência e menções à figura de Nicholson. Nos sentimos autorizados a incluir essa categoria de pesquisa em nossa análise, entretanto, devido ao fato de que, mesmo nessa área de pesquisa, foram percebidas abordagens históricas, mesmo que tímidas. Os trabalhos analisados foram divididos em três eixos: *ensino de ciências sem história*, *ensino de ciências com história* e *história da ciência*. Não foi encontrado um número de trabalhos em filosofia da ciência que nos permitisse generalizar conclusões.

Além das conclusões qualitativas oriundas da análise do material, e que estarão diluídas ao longo do texto, contabilizamos, em cada um dos trabalhos levantados, a quantidade de vezes que o nome de Nicholson é mencionado, o que nos permitiu, por comparação com as menções aos “protagonistas tradicionais” do período (Einstein, Rutherford, Thomson e Planck), ter uma ideia geral da relevância dada a Nicholson nas áreas de ensino de ciências e de história das ciências. Para evidenciar a circunstância de que a questão da sub-representação de figuras menores não se restringe ao astrofísico inglês, contabilizamos também o nome do físico japonês Hantaro Nagaoka, cientista indiscutivelmente às margens da HC.

Como era de se esperar, a análise evidenciou que a sub-representação é menor na área de história que na de ensino de ciência e, dentro dessa, muito mais intensa em trabalhos que não adotam uma abordagem contextual. Ao compararmos o número de citações referenciadas a

pesquisadores que o próprio Bohr fez em *Sobre a Constituição de Átomos e Moléculas* (gráfico 2) com os dados obtidos pelo nosso levantamento (gráfico 1), fica claro que o desequilíbrio de forças presente na bibliografia secundária não se equaciona com um retrato fidedigno do período.

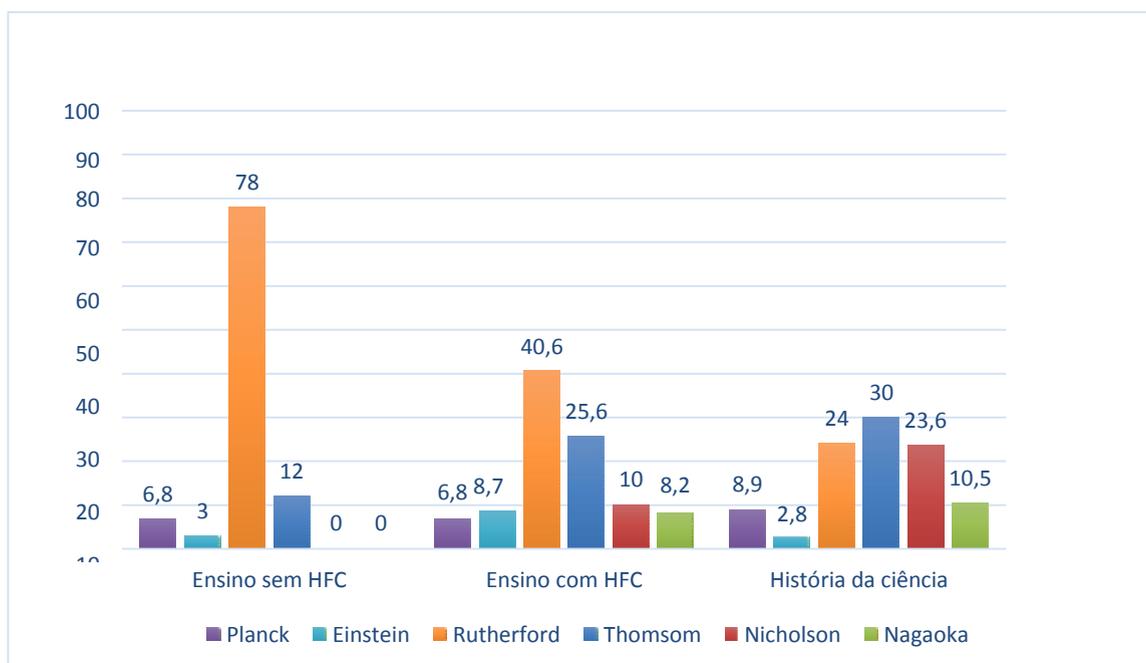


Gráfico 1 - Porcentagem de citações a cientistas do início do século XX por áreas temáticas. Fonte: o autor (2020).

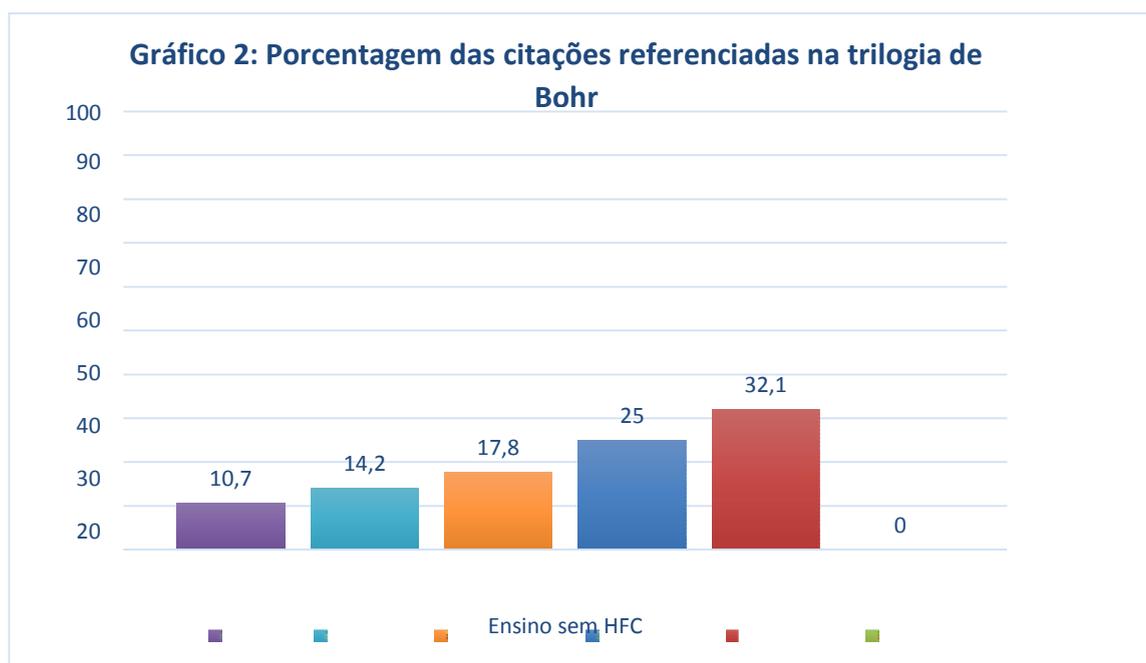


Gráfico 2 - Porcentagem das citações referenciadas na trilogia de Bohr. Fonte: o autor (2020)

No corpo do texto, daremos ênfase aos estudos que de alguma maneira se aproximam de nossa proposta ou lhe trazem contribuições mais evidentes, mostrando que há, mesmo nestes poucos trabalhos em que há algum parentesco temático com o nosso (caracterizada pela ênfase ao papel desempenhado por figuras de menor destaque ao desenvolvimento do período), lacunas que nossa dissertação pode ajudar a preencher.

a) **História da ciência**

Curiosamente, não há registros de estudos puramente históricos sobre a teoria atômica de Bohr até o ano de 1962, quando algo de relevante deve ter acontecido, já que há, nos anos seguintes, uma indiscutível proliferação de abordagens históricas do período (ROSENFELD, 1963; ROSENFELD e RUDINGER, 1968; HEILBRON, 1964; HEILBRON e KUHN, 1969; HIROSIGE e NISIO, 1964; HERMANN, 1969; FORMAN, 1971; HOYER, 1973). Se foi a morte do físico dinamarquês ou a publicação de *A Estrutura das Revoluções Científicas* (e é provável que tenham sido ambos!) o evento responsável por essa tendência em se debruçar sobre o contexto dos primórdios da Física Quântica, fato é que, naquela década, se sedimentaram narrativas que influenciariam os inúmeros trabalhos que seriam publicados sobre o tema nas décadas seguintes.

O primeiro e talvez até hoje mais importante trabalho publicado que abordou de maneira central a teoria atômica de John William Nicholson, reconhecendo sua relevância histórica e sugerindo contribuições de suas ideias para o átomo de Bohr, foi o artigo *The Atomic Theory of John William Nicholson* (MCCORMARCH, 1966), do historiador da Ciência norte americano Russel McCormarch. Em um texto riquíssimo, McCormarch discute profundamente não apenas os aspectos físicos da hipótese de Nicholson, mas revela dados biográficos que ilustram e elucidam o caráter do rápido contato que teve com Bohr quando ambos estiveram em Cambridge. São investigadas cartas escritas por Bohr na época, revelando que o físico dinamarquês não só conhecia a obra de Nicholson como acreditou que em muitos pontos era equivalente à sua. Além disso, o historiador nos apresenta as críticas feitas por Nicholson ao modelo bohriano e a gradativa perda de relevância do astrofísico inglês nos estudos sobre estrutura da matéria. O artigo de McCormarch é, sem dúvidas, o mais completo trabalho sobre a hipótese atômica de Nicholson.

O renomado historiador da ciência dinamarquês Helge Kragh, por sua vez, tem publicado, nos últimos anos, diversos trabalhos que estendem a janela histórica do período de gênese, desenvolvimento e recepção da antiga teoria quântica. Em seus trabalhos, Kragh tem

dados atenção especial à recepção da teoria e às críticas por ela sofridas nos anos iniciais (KRAGH, 2011a e KRAGH, 2012). Tanto no artigo de 2011 quanto no livro de 2012, Kragh discute alguns modelos alternativos ao átomo de Bohr, entre eles o de John William Nicholson. Referindo-se ao desenvolvimento e recepção do átomo de Bohr, Kragh (2011a), afirma que, para se compreender profundamente uma teoria científica em seu contexto histórico, demanda-se uma perspectiva histórica mais simétrica que aquelas frequentemente direcionadas ao período, uma que cubra tanto opositores quanto partidários da hipótese. Segundo o estudioso, ao negligenciar a presença dessas vozes dissonantes, estaríamos sob o risco de produzir uma narrativa incompleta e distorcida.

Neste mesmo ímpeto, destaco ainda a tese de doutorado de Lopes (2010) como um substantivo trabalho nacional que aborda a obra de Nicholson. Em seu texto sobre os modelos atômicos do início do século XX, além de dedicar um capítulo inteiro à discussão da proposta do astrofísico, antecedida por uma interessantíssima biografia do mesmo, se debruça nas críticas feitas por Nicholson ao modelo de Bohr.

Uma grande inspiração para essa dissertação é o livro do já citado historiador da ciência Eric Scerri. Em seu *A Tale of Seven Scientists* (2016), Scerri nos apresenta uma narrativa da História da Ciência a partir dos feitos de cientistas desconhecidos, a quem ele chama de “figuras menores” (além de Nicholson, Anton Van den Broek, Richard Abegg, Charles Bury, John D. Main Smith, Edmund Stoner e Charles Jenet) cujos trabalhos foram essenciais para o desenvolvimento da Química Moderna. Em todos os casos relatados, as contribuições desses cientistas consistiram no aprimoramento ou correção de suas ideias equivocadas por sucessores mais afortunados. A conclusão de Scerri é a de que categorizar aquelas teorias como simplesmente erradas em nada contribui para uma imagem coerente do progresso científico: a ciência se desenvolve por causa dos erros, e não apesar deles. Apesar das similaridades com nosso trabalho, Scerri não parece interessado nas reverberações que a sua abordagem tem para o ensino, tampouco sugere destaque para o poder didático do erro para compreensão da NdC.

a) Ensino de ciências com história.

Destacando o que seria uma insuficiência da epistemologia empirista em compreender de maneira fidedigna alguns momentos históricos da Ciência, Silveira e Peduzzi (2006) abordam três episódios de descoberta científica, um deles a formulação do modelo atômico de Bohr, advogando que, do ponto de vista didático, a Filosofia da Ciência contemporânea pode contribuir para novas formas, ainda pouco exploradas, de se compreender o funcionamento do empreendimento científico. Essa abordagem, argumentam, pode contribuir para uma História da Ciência muito “mais rica, dinâmica e complexa” (SILVEIRA e PEDUZZI, 2006, p. 26). Em outro artigo (PEDUZZI e BASSO, 2005), a ideia de se explorar a história do átomo de Bohr a partir de uma epistemologia alternativa à empirista é explorada sob a ótica lakatosiana dos programas de pesquisa. Segundo os autores, uma concepção historiográfica empirista mitigaria o papel do erro científico e da tentatividade, aspectos reconhecidos pelos mais notáveis filósofos da Ciência - tais como Thomas Kuhn, Karl Popper e Gaston Bachelard - como constitutivos do conhecimento científico. Analogamente à nossa proposta, os autores se vestem de um referencial epistemológico (conquanto no nosso caso esse referencial seja, na verdade, o contraste entre duas perspectivas epistêmicas) particular para construir uma imagem mais fidedigna da ciência. Entretanto, diferentemente do cerne deste trabalho, os autores parecem estar mais interessados nos equívocos cometidos pelos “grandes cientistas”⁷⁰, e não por aqueles em que incorrem “coadjuvantes notáveis” da HC. Consequentemente, as questões epistemológicas associadas à coletividade do trabalho científico não estão no centro daquela proposta. Talvez isso explique a razão pela qual há apenas uma citação superficial a Nicholson no texto de 2006 e nenhuma no de 2005⁷¹.

Similaridades também podem ser apontadas entre nosso trabalho e aquele desenvolvido por Moura (2014), que nos apresenta uma proposta didática de ensino de

⁷⁰ Por exemplo, para ilustrar o aspecto tentativo do conhecimento científico (em oposição à visão de que as teorias se subordinam indutivamente à experimentação), os autores (SILVEIRA E PEDUZZI, 2006) citam três episódios: a crença errônea de Galileu de que haveria uma proporcionalidade entre velocidade e distância para o movimento retilíneo com aceleração constante; o fato de que a explicação física dada por Bohr para a fórmula de Balmer-Rydberg (fator essencial para a aceitação da teoria) foi atingida apenas tangencialmente, enquanto o problema que efetivamente mobilizara os esforços do físico dinamarquês foi o problema da instabilidade eletrodinâmica dos modelos saturnianos; e, por fim, referem-se ao equívoco de se considerar a relatividade restrita de Einstein como uma resposta ao experimento de Michelson-Morley.

⁷¹ No final do texto (PEDUZZI e BASSO, 2005), os autores sugerem como um dos pontos estratégicos para o ensino do átomo de Bohr, a contextualização histórica “do eletromagnetismo maxwelliano, (d) as séries espectrais, (d) o quantum de Planck, (d) a explicação de Einstein do efeito fotoelétrico, (e do) átomo de Rutherford” (p. 556). Como mostramos, uma das ideias subjacentes a este trabalho é justamente construir uma narrativa que não se limite a esses personagens centrais.

modelos atômicos paralela a uma discussão explícita de elementos da NdC a partir de uma narrativa que introduza personagens históricos “tradicionalmente inexplorados” do final do século XIX e início do XX. Assim como em Moura (2014), é um dos objetivos de nosso trabalho, a partir de uma reconstrução histórica, conferir uma imagem científica bem mais complexa que aquela revelada tradicionalmente em livros didáticos [no caso do autor aludido, em livros de química para o ensino médio] pela mera exposição descritiva de alguns modelos atômicos. Em seu relato histórico, além dos modelos “canônicos”, o pesquisador apresenta sinteticamente as hipóteses atômicas de Jean Perrin, Hantaro Nagaoka e de John William Nicholson.

Finalmente, Vasconcelos e Forato (2018) também apresentam uma abordagem contextual do modelo atômico de Bohr que seja uma alternativa à visão tradicional “de uma história linear, elitista, neutra, ingênua e produtora de provas irrefutáveis, mediante um único método universal.” (VASCONCELOS e FORATO, 2018, p. 851). As autoras chamam a atenção para a tendência de se ensinar o átomo de Bohr fazendo referência apenas para algumas ideias (estudo de espectros luminosos, hipótese quântica de Planck, além dos modelos de Dalton, Thomson e Rutherford) como se fossem suficientes para conduzir Bohr a sua teoria do átomo quântico. Nesse sentido, propõem a discussão de modelos pouco conhecidos, como o de Nagaoka e o de Nicholson, cujos aspectos físicos essenciais discutem na narrativa a ser utilizada como material de apoio de sua proposta didática. Como se vê, a proposta das autoras guarda grande aproximação com a nossa, já que, em linhas gerais, ambas podem ser classificadas como *uma proposta de ensino do átomo de Bohr a partir do tratamento de modelos alternativos, menos conhecidos*. O afastamento da nossa abordagem com a das autoras se evidencia tanto pelo fato de que estas optam por não recorrer a um modelo epistemológico para conduzir sua narrativa quanto pela ênfase que damos ao papel epistêmico do erro científico e consequente discussão explícita de aspectos da NdC.

b) Ensino de ciências sem história

Os trabalhos da área de ensino de ciências que não utilizam uma abordagem contextual, geralmente possuem uma ênfase na experimentação, como é o caso do trabalho de Sanjuan et al (2012), apresentado como uma descrição de uma atividade experimental que consiste na determinação do comprimento de onda das linhas de emissão de átomos de hélio ionizado a partir do modelo atômico de Bohr em uma classe de estudantes de engenharia.

Trabalhos com ênfase na experimentação costumam desconsiderar a relevância de se discutir aspectos contextuais em sala de aula, como se fossem abordagem mutuamente excludentes. Há ainda trabalhos que colocam em xeque a própria eficácia pedagógica de se discutir o modelo de Bohr, já que, por estar largamente assente em concepções clássicas, se apresentaria como um obstáculo epistemológico à compreensão das noções quânticas. De fato, há autores, ainda que uma minoria, que defendem a retirada do átomo de Bohr dos currículos escolares:

Na física escolar, o assunto das teorias modernas é descrito com métodos e concepções de física clássica que, para esse fim, são insuficientes. Ao fazê-lo, todas as contradições e dificuldades desnecessárias são introduzidas na escola, dificuldades que até mesmo os físicos mais destacados da época semi-clássica na física (c. 1900-1925) tiveram que enfrentar porque ainda não haviam descoberto completamente as causas das dificuldades. (BRACHNER e FICHTNER 1974, p. 84 apud FICHTNER e LICHFELDT, 1992, p. 181)

O impasse pedagógico foi atacado de frente por McKagan et al (2008), que realizaram um estudo para responder se o ensino do modelo de Bohr se constitui num obstáculo à compreensão do modelo de Schrödinger, o que, segundo os autores, seria uma asserção aceita por diversos educadores⁷². Os autores desenvolveram um currículo de física moderna para um curso de engenharia onde outros modelos atômicos (Demócrito, Thomson, Rutherford, De Broglie, Schrodinger) seriam explicitamente discutidos, apresentando-se seu contexto histórico, suas limitações e como um modelo mais recente conseguiu superar o anterior. Ao fim do estudo, os pesquisadores concluíram que contrastar o modelo de Bohr a outros modelos (anteriores ou posteriores) é um componente chave para que os currículos que abordem Física Moderna ajudem os estudantes a contextualizar o modelo de Bohr apropriadamente e, então, superá-lo. Os mesmos autores relataram ainda que encontraram suporte para sua conclusão em outros dois estudos (MÜLLER e WIESNER, 2002; KALKANIS e STRAVROU, 2003), onde a ênfase na discussão de modelos contrastantes conduziu à compreensão do átomo da mecânica quântica.

⁷² Ver Fischler e Lichtfeldt (1992), para mais argumentos para retirada do modelo de Bohr dos currículos de cursos de física moderna.

c) No livro didático

Ramírez et al (2010) analisaram dezessete livros-texto que abordam o átomo de Bohr (dez para o ensino universitário e sete para o ensino médio) e concluíram que os modelos são, na maioria das vezes, apresentados já elaborados, sem referências aos problemas que lhes originaram. Alertam, ainda, para o fato de que as controvérsias e dificuldades enfrentadas pela pesquisa em estrutura da matéria na época são ignoradas. As abordagens da maioria dos livros, portanto, não são suficientes para superar visões de senso comum sobre as ciências. Os autores categorizaram cinco blocos de “visões ianedequadas” encontradas nos livros didáticos (RAMÍREZ et al, 2010, p. 622-3):

- a) uma imagem aproblemática e ahistórica, já que não são evidenciados os problemas que estimularam a elaboração do modelo de Bohr, as dificuldades que o modelo enfrentou, suas limitações, a oposição de modelos alternativos, tampouco seu processo regressivo até o abandono;
- b) uma imagem rígida da ciência, marginalizando aspectos como a criatividade, a imaginação e a dúvida; os cientistas que abordaram o problema são nomeados isoladamente, sem que se evidencie a relação que tiveram um com o outro, denotando uma imagem acumulativa do crescimento do conhecimento, além de uma ênfase exacerbada em aspectos experimentais;
- c) uma visão positivista da ciência, já que não se estabelece como a teoria se consolidou, como se deu sua corroboração;
- d) visão simplista, já que apenas são mostrados aspectos que os autores do livro julgam essenciais; não são abordados pontos da teoria que garantiram a vitória do modelo ante a crítica de opositores.

A forma como o átomo de Bohr é abordada em livros didáticos também é avaliada por Basso e Peduzzi (2003), nesse caso para a disciplina de física no ensino médio. Os autores avaliaram que há uma ênfase numa perspectiva empírico-indutivista do conhecimento, como se o modelo de Bohr fosse uma resposta a uma situação experimental específica, a adequação da equação de Balmer-Rydberg. Em sua análise, perceberam que, dos cinco livros avaliados, apenas dois apresentaram adequadas contextualização histórica e orientação epistemológica. Esse estudo serviu de matéria-prima para a já aludida dissertação de Basso (2004).

Conclusões

A sub-representação de Nicholson pôde ser constatada em todas as áreas temáticas analisadas. Na categoria ensino com história, apesar desta tendência ser explícita, percebeu-se, em alguns trabalhos da área, a compreensão de que, a fim de se afastar de visões sobre a Ciência consideradas simplistas, é imperativa a necessidade de se reconstruir historicamente episódios cruciais da HC, seja sob referenciais da filosofia contemporânea (BASSO, 2004), seja a partir de narrativas que considerem o papel de “figuras tradicionalmente excluídas” (VASCONCELOS e FORATO, 2018 e MOURA, 2014). Ao condicionar uma narrativa de erros científicos cometidos por “figuras menores” a um referencial epistemológico, nosso trabalho sintetiza aquelas abordagens num só movimento.

A análise dos estudos sobre a maneira como o período é retratado em livros didáticos revelou uma confluência no diagnóstico de que há uma predominância empírico-indutivista, o que pode conduzir a visões “inadequadas” ou “ingênuas” sobre a forma como a Ciência se comporta e desenvolve. Foi possível concluir que, dentre os aspectos considerados como problemáticos na abordagem do período- seja em livros de química ou física, tanto no nível médio quanto universitário – dois aspectos ignorados nos relatos oficiais foram recorrentemente mencionados: a crítica, a controvérsia e os limite da teoria, assim como a menção a modelos alternativos; e a cooperação e interrelação entre os membros da comunidade científica da época. Tais aspectos se equacionam perfeitamente com as lacunas que nossa narrativa se dirige para ajudar a preencher.

Apresentamos neste capítulo trabalhos que advogam a evidência experimental de que a discussão de modelos contrastantes é pedagogicamente eficiente, o que, de fato, está coadunado com a lição epistemológica que atribuímos ao erro científico. A compreensão do sucesso e conseqüentemente da própria teoria de Bohr pode ser mais eficientemente alcançada se discutirmos os limites do seu maior opositor àquela altura, o modelo atômico de John William Nicholson. Braga e colaboradores (2012) nota como a concorrência entre hipóteses rivais é um aspecto do empreendimento científico ausente em livros-texto. A mesma autora afirma que a análise dessas controvérsias, atenta às fundamentações filosóficas que as causou, é fundamental para compreensão do desenvolvimento da ciência e, conseqüentemente, para educação em ciências. (Niaz 2009, pp. 60-62 *apud* Braga et al 2012). Para o físico e historiador da ciência Roberto Martins, a controvérsia científica:

Serve para contrabalançar os aspectos puramente teóricos de uma aula, complementando-a com o estudo de aspectos sociais, culturais e humanos. Informações (preferencialmente bem fundamentadas) sobre a vida dos cientistas, a evolução de instituições, o ambiente cultural de uma época, as concepções alternativas do mesmo período, as controvérsias e dificuldade de aceitação de novas ideias, tudo isso pode contribuir para dar uma nova visão da ciência e dos cientistas, dando maior motivação para o estudo (MARTINS, 1990, p. 3).

Quanto aos trabalhos de abordagem exclusivamente histórica, foi possível concluir que, apesar de haver, nos últimos anos, a publicação de alguns trabalhos que tentam reequilibrar a distribuição de “forças” entre os cientistas do período (KRAGH, 2011a; JEONG e DATTA, 2013; LOPES, 2009 e PENNA, 2009), ainda há, mesmo numa área sensível a estas questões, uma predominância nas narrativas dos “grandes cientistas”.

Por fim, quase inexistem trabalhos sobre as implicações filosóficas do átomo de Bohr, sobre quais lições epistemológicas se pode extrair do episódio. O único artigo encontrado (FILHO, 2003) se ocupa de discutir como uma hipótese “frágil” como a de Bohr pode conduzir ao avanço científico. E, como era de se esperar, não há qualquer menção a Nicholson em trabalhos em ensino que distam da abordagem contextual.

ANEXOS

Anexo A

Termo de consentimento livre e esclarecido

Eu, Sairon Santos Ressurreição, pretendo realizar uma pesquisa acadêmica que visa analisar as concepções sobre natureza da ciência dos estudantes da disciplina Conceitos de Física da UFBA, semestre 2019.2, assim como investigar quais elementos de uma sequência didática contribuem para a evolução de tais concepções. A pesquisa envolverá a gravação em áudio e/ou vídeo das aulas da disciplina em questão, nas quais algumas "falas" serão gravadas e transcritas para análise, com vistas a investigar a transformação/evolução das concepções dos estudantes sobre a natureza da ciência ao longo da intervenção didática. A pesquisa utilizará como dados: entrevistas com os estudantes, as discussões do conteúdo durante a aplicação da sequência e as respostas dadas a um questionário. Apenas o pesquisador responsável terá acesso ao conteúdo filmado e os arquivos serão de uso exclusivo para fins da pesquisa. Não serão, portanto, utilizados para avaliação das condutas dos estudantes, nem divulgadas, em hipótese alguma, para público externo ou interno. Os resultados da pesquisa serão publicados em encontros científicos e revista especializada contendo, eventualmente, citações anônimas e utilizando nomes fictícios (pseudônimos) para os estudantes, que terão, assim, sua identidade preservada, e estarão disponíveis a todos, ao final do estudo. Além disso, a participação dos estudantes na pesquisa não envolverá qualquer despesa para os mesmos. Os dados coletados serão usados somente para a pesquisa mencionada acima. A participação dos estudantes na pesquisa é de caráter livre e voluntário, não havendo nenhum tipo de obrigatoriedade para participar e nenhum tipo de penalidade para quem não participe e os estudantes não serão obrigados a fazer qualquer atividade que extrapole suas tarefas escolares comuns, além do que não se fará qualquer vinculação entre as respostas dadas e a identidade pessoal dos respondentes. Além do mais, aqueles que consentirem participar podem, em qualquer fase da pesquisa, retirar seu consentimento sem nenhuma penalidade. As pesquisas em educação pretendem auxiliar os pesquisadores e educadores a compreenderem melhor os processos educativos dos estudantes, visando sempre seu aperfeiçoamento. Se você concorda em participar, por favor, forneça seu nome e assine este termo no campo indicado abaixo. Isso será considerado prova de sua concordância. Este termo constará de duas vias, uma que ficará de posse do pesquisador e outra de posse do participante. Agradeço a atenção e estou à disposição para maiores esclarecimentos que julgue necessário sobre a metodologia.

Salvador, 30 de outubro de 2019.

Atenciosamente, Sairon Santos Ressurreição (Mestrando do PPEFHC-UFBA)

Nome do participante:

Assinatura:

Pseudônimo: _____

Assinatura do responsável pela pesquisa.

Anexo B

Programa da disciplina Conceitos de Física D

	UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA PRO-REITORIA DE ENSINO DE GRADUAÇÃO
---	--

FORMULÁRIO PARA CRIAÇÃO OU ALTERAÇÃO DE COMPONENTE CURRICULAR

(Resolução CEG/UFBA nº 05/2003)

Código e nome do componente curricular: FIS C52 – CONCEITOS DE FÍSICA D	Departamento: Física do Estado Sólido	Carga Horária: T 34 P 34 E 00
Modalidade: Disciplina	Função: Básica	Natureza: <u>Bacharelado:</u> Optativa <u>Licenciatura:</u> Optativa
Pré-requisito: FIS C77 – Conceitos de Física C	Módulos de alunos: 30	
Ementa: Estudo, de forma contextualizada, dos conceitos, fenômenos e leis físicas relacionados à óptica e à física moderna. Usando recursos da história da ciência, estuda-se o desenvolvimento da óptica e da física moderna desde a Antiguidade até o século XIX. O estudo contextualizado do assunto é apoiado por experimentos demonstrativos. Apresentam-se aplicações tecnológicas da óptica e da física moderna.		
Conteúdo programático: Luz e Eletromagnetismo (As aulas são acompanhadas de experimentos qualitativos ou quantitativos referentes aos assuntos seguintes)		
<ul style="list-style-type: none"> a) o problema da <i>natureza da luz</i>. A dicotomia/dualidade onda-corpúsculo. b) os primórdios da Óptica. As concepções dos gregos antigos sobre o mecanismo da visão. c) o fenômeno de propagação retilínea da luz. A câmara escura. Os fenômenos de reflexão e de refração, na Antiguidade. As contribuições de Cláudio Ptolomeu. d) as contribuições dos árabes à Óptica. Al Hazen e a Óptica no século XI. e) as contribuições de Hariot, Snell, Descartes, Fermat e Newton à lei da refração da luz. Os princípios de Heron e de Fermat como precursores do princípio da <i>ação mínima</i>. f) as leis de reflexão e de refração e suas relações com os modelos ondulatório e corpuscular da luz, no século XVII. O modelo de Newton para explicar os fenômenos luminosos. O modelo ondulatório de Hooke, Pardiès e Huygens. 		

- g) a primeira determinação experimental da velocidade da luz e a importância da descoberta de Roemer.
- h) a possibilidade de índice de refração negativo.
- i) o fenômeno das cores, segundo Newton. Aspectos históricos da física do arco-íris, da Antiguidade até nossos dias.
- j) as cores do espectro e as cores dos pigmentos. A visão em cores dos mamíferos e aves.
- k) o contexto da descoberta do fenômeno da difração da luz por Grimaldi. Newton e o fenômeno da difração.
- l) Boyle, Hooke e Newton e as cores produzidas por corpos transparentes finos. Os anéis de Newton. A explicação de Newton para o fenômeno dos anéis coloridos.
- m) a ideia do éter e suas relações com o desenvolvimento da Física.
- n) a importância dos experimentos sobre interferência de luz de Thomas Young, do início do século XIX.
- o) o princípio da interferência e suas aplicações. A explicação das cores das películas finas por Young.
- p) a importância das descobertas de Fresnel para o estudo dos fenômenos de difração e interferência.
- q) a descoberta do fenômeno da dupla refração, por Bartolinus. Huygens e a descoberta do fenômeno da polarização da luz.
- r) a descoberta experimental da polarização por reflexão e a explicação teórica dada por Malus, com base no modelo corpuscular da luz. As diversas maneiras de se obter luz polarizada.
- s) Young, Fresnel e Arago e a interpretação dos resultados da experiência da superposição dos raios de luz emergentes da calcita.
- t) a importância das redes de difração (unidimensional, bidimensional e tridimensional) no desenvolvimento da Óptica e da Física Quântica. A medida do comprimento de onda da luz.
- u) o modelo ondulatório, de Maxwell, e a incorporação da Óptica ao Eletromagnetismo.
- v) as experiências de Hertz e suas relações com os modelos ondulatório e corpuscular da luz.
- w) o Interferômetro de Michelson. O experimento de Michelson-Morley e o contexto em que foi realizado.

Luz e Física Moderna

(As aulas são acompanhadas de experimentos qualitativos ou quantitativos referentes aos assuntos seguintes)

- a) o problema da dicotomia e/ou dualidade onda-corpúsculo e sua relação com o surgimento da Mecânica Quântica.
- b) o contexto histórico em que se deu a descoberta de Planck. O *quantum de ação* de Planck e o resgate do modelo corpuscular da luz feito por Einstein. Experiências demonstrativas de como medir a constante de Stefan-Boltzmann e a constante de Planck.
- c) a descoberta do efeito fotoelétrico e a importância da explicação teórica do mesmo. Experiências demonstrativas.
- d) as contribuições de Laue e de Bragg à difração de raios-x por um cristal - simulação da experiência (demonstrativa) de difração de raios-x, utilizando micro-ondas.
- e) a determinação experimental do número de Avogadro usando técnicas de difração de raios-x, simuladas numa experiência com micro-ondas.
- f) Louis de Broglie e as ondas de matéria.
- g) a realização experimental por Davinson & Germer das ideias de L. de Broglie, através da difração de elétrons por um cristal. Analogia com a experiência de difração de raios-x.
- h) a importância da experiência de Geoffrey I. Taylor com fótons – simulação da experiência de Taylor (1909).
- i) as contribuições de Schrödinger para a Mecânica Quântica e o contexto em que se deram suas descobertas.

- j) a interpretação de Born da *função de onda*.
- k) as experiências com polarizadores e o conceito de vetor de estado
- l) as experiências modernas com objetos quânticos simples.

Parte Prática – Experimentos envolvendo:

1. A observação de imagens em câmaras escuras com orifícios de diâmetros diferentes e também a observação do padrão de difração produzido por um feixe de luz (laser) incidindo em uma fenda (ou orifício) de largura ajustável, para discutir ambos os resultados com base nos princípios da óptica geométrica e da ótica ondulatória.
2. A determinação do diâmetro do Sol, a partir da medida da altura que um lápis deve alcançar para o desaparecimento completo de sua sombra, quando o mesmo é levantado lentamente de uma folha de papel ofício, no chão, com o Sol a pino.
3. A demonstração da igualdade dos ângulos de incidência e reflexão, usando uma escala angular, um feixe de luz (laser) e uma superfície refletora.

4. A observação da reflexão da luz usando uma placa de vidro ligeiramente escurecido (~ 40 cm x 50 cm), colocada exatamente na metade da distância entre dois copos de vidro, tendo no centro de um copo uma vela acesa e, no outro, uma vela não acesa (com o copo cheio de água), para a demonstração da lei da reflexão, a partir da medida da distância da vela à placa.
5. A observação e comparação da imagem da ponta de um lápis que toca uma superfície metálica polida com a imagem da ponta de um lápis que toca o espelho plano de vidro.
6. A incidência de um feixe fino de luz sobre um espelho, marcando com um lápis de ponta fina as trajetórias do feixe incidente e refletido, para descobrir em qual superfície do espelho os raios de luz são fortemente refletidos.
7. A observação do número e tipos de imagens formadas por dois espelhos planos ortogonais e também a 120° .
8. A observação das imagens de uma mão direita em um espelho plano e, em seguida, a observação de um lápis colocado paralelamente (e depois perpendicularmente) ao espelho, para discutir a “troca da direita pela esquerda”.
9. A observação da imagem de um objeto através de um periscópio rudimentar (dois espelhos paralelos, inclinados a 45° em relação à horizontal) seguida da descrição da experiência através de um diagrama de raios, visando à localização e orientação da mesma, repetindo a experiência com o visor inferior girado de 90° em torno de um eixo vertical que passa pelos dois espelhos.
10. A observação do exterior da sala de aula, à noite, através do vidro de uma janela, comparando o resultado com a observação feita durante o dia.
11. A comparação das imagens obtidas por reflexão de um feixe de luz visível e de um feixe de micro-ondas por superfícies semelhantes à de uma caçarola de alumínio.
12. A verificação para diversos ângulos de incidência, de que a razão entre o seno do ângulo de incidência e o seno do ângulo de refração é uma constante, fazendo-se uso de um bloco maciço semicilíndrico de acrílico (ou vidro), uma escala angular e um feixe de luz laser.
13. A determinação do índice de refração do acrílico (ou vidro), fazendo-se incidir um feixe de luz (laser) em um bloco maciço de acrílico (ou vidro) para medir o ângulo de incidência (θ_i), segundo o qual ocorre a reflexão total.
14. A determinação do índice de refração do vidro a partir da medida do deslocamento linear do feixe luminoso (laser), do ângulo de incidência e da espessura da placa, ao passar através de uma lâmina de vidro de faces paralelas.
15. A determinação do índice de refração do meio responsável pela reflexão total, ao se fazer um feixe de luz (laser) incidir na superfície curva de um recipiente semicilíndrico com água e depois sem água.
16. A medida da profundidade aparente em que se encontra uma moeda colocada no fundo de um recipiente de acrílico, cheio de água, para comparar com as previsões teóricas da lei da refração.
17. A medida do índice de refração do vidro de um prisma usando o método do desvio mínimo, fazendo incidir um feixe de luz produzido por um laser sobre uma das faces de um prisma, sem usar o espectrômetro.
18. O problema da braquistócrona (ou da curva de decida mais rápida), usando uma peça de madeira (110 cm x 38 cm, por exemplo), na qual são feitos dois caminhos (trilhos) diferentes, por onde rolam duas esferas metálicas, para discutir a relação entre a Óptica e o princípio de mínima ação.
19. A demonstração de que a cicloide tem a propriedade de ser tautócrona, usando a mesma peça do item anterior.
20. A observação do efeito da mistura de feixes de luz (processo de coloração aditivo), a partir da decomposição da luz branca (lâmpada de tungstênio), usando um prisma e do subsequente uso de outro prisma (igual) para a sua recomposição.
21. A observação do efeito da mistura de feixes de luz (processo de coloração aditivo), superpondo um feixe de luz monocromática vermelha e um feixe de luz monocromática verde para obter o amarelo.

22. A observação do efeito da mistura de pigmentos, usando tintas de pigmentos vermelhos e de pigmentos verdes.
23. A observação do efeito da mistura de pigmentos cianos e de pigmentos amarelos.
24. A investigação da cor de um objeto, em uma sala escura, colocando sobre a faixa vermelha do espectro da luz branca – obtido com o prisma -, tiras de papel cartão: a) azul e b) vermelho.
25. O estudo da luz amarela (monocromática e não monocromática), comparando o efeito da luz amarela emergente de uma lâmpada de tungstênio (coberta com filtro amarelo) com o efeito da luz amarela emergente de uma lâmpada de sódio (coberta com um filtro amarelo), quando a mesma incide sobre tiras de papel cartão azul, vermelho, verde e amarelo.
26. O espectro da chama da vela, fazendo uso do espectrômetro (com prisma).
27. O *efeito pós-imagem*, fixando o olhar durante 30 segundo sobre um objeto verde (um classificador escolar, por exemplo) e, em seguida, olhando para uma parede branca. O mesmo com objetos de cor azul, de cor vermelha e de cor amarela.
28. O enunciado na *Questão 16*, do seu livro *Óptica*, de Isaac Newton.
29. A observação e explicação do efeito visual observado ao se fazer girar o “disco de Newton”.
30. Tentativas de acertar o dedo indicador (dirigido para cima) de uma mão com o indicador da outra, movendo este do alto para baixo (com um olho fechado).
31. A observação das cores em lâminas transparentes delgadas, a exemplo de películas de água com sabão (sustentada por uma espira (argola) de arame, mantida na vertical, após ser retirada da água-sabão), quando vistas por meio de luz nela refletida ou por meio de luz por ela transmitida.
32. O fenômeno produzido em uma lâmina de mica, a partir da reflexão da luz produzida por uma lâmpada com filamento de tungstênio, fazendo uso do espectroscópio com um prisma.
33. A observação do fenômeno produzido pela reflexão da luz de uma lâmpada com filamento tungstênio ao incidir em uma lâmina de vidro (uma bem fina e outra com 2 mm de espessura), fazendo uso do espectroscópio com um prisma.
34. A observação, em um anteparo, do fenômeno produzido pela incidência da luz de um laser, em uma lâmina de mica (0,01 mm de espessura, aproximadamente).
35. A observação, em um anteparo, do fenômeno produzido pela incidência da luz de um laser em uma lâmina de vidro, de microscópio.
36. A observação, em um anteparo, do fenômeno produzido pela incidência da luz de um laser em uma placa quadrada de vidro, com 2 mm de espessura; repetir a experiência anterior com a placa girada de 90° em torno de um eixo perpendicular ao plano da placa.
37. A observação dos “anéis de Newton” pressionando, com um lápis, duas lâminas de vidro superpostas, colocadas em cima de uma mesa, iluminando-as com luz de uma lâmpada de mercúrio.
38. A observação da luz de uma lâmpada de tungstênio (15W?), a uma distância de cerca de 5 m, através da fenda entre dois dedos; repetir a experiência com uma fenda com largura menor que 0,5 mm.
39. A observação de figuras de difração produzidas por um feixe de luz proveniente de um laser, quando esse feixe incide (e é parcialmente obstruído) nas bordas de uma lâmina de barbear, colocada perpendicularmente ao feixe, a meia distância entre a fonte e o anteparo.
40. O mesmo para o caso de incidência em uma fenda retangular (bem estreita - largura desprezível), colocada perpendicularmente ao feixe de luz, a meia distância entre a fonte e o anteparo, medindo a largura do máximo central após situar a fenda a 2 m do anteparo.
41. O mesmo para uma agulha de costura e depois para um palito, colocados perpendicularmente ao feixe de luz.
42. A observação da figura de difração produzida por um feixe de luz (laser) quando o mesmo incide nas bordas da porta da sala, com o laser a uma distância de cerca de 4m da porta, colocando o anteparo, primeiro, próximo à porta (a aproximadamente 1 m) e, depois, distante da porta (aproximadamente 5m).
43. O mesmo para o caso em que o feixe de luz (laser), de diâmetro maior que 5 mm, incide em um orifício circular, com diâmetro de 1 mm e, depois, com diâmetro de 5 mm, para uma distância fonte-anteparo de cerca de 10 m.

44. A observação de figura de difração produzidas por um feixe de luz (laser), de diâmetro maior que 5 mm, quando o mesmo incide em disco (moeda de 1 centavo) e, repetindo a experiência, incide em um orifício circular de diâmetro igual ao da moeda de 1 centavo, colocados cada um à mesma distância do anteparo.
45. A observação de figura de difração produzidas por um feixe de luz (laser), de diâmetro maior que 7 mm, quando o mesmo incide em um lápis com diâmetro de 7 mm, com adistância lápis-anteparo de aproximadamente 5 m.
46. A observação de figuras de difração produzida por um feixe de luz proveniente de uma lâmpada incandescente (fonte extensa) contida numa “caixa de luz” de uma bancada óptica (na ausência de uma “fenda-fonte”), quando o feixe incide em uma fenda retangular (largura menor que 1 mm).
47. A observação do fenômeno de difração de micro-ondas ($\lambda = 2,8$ cm) para o caso de um feixe incidindo em fenda de 2 cm, de 5 cm e de 7 cm de largura.
48. A observação da trajetória retilínea de um feixe de luz (laser) em uma sala escura.
49. A obseração de figuras de difração produzidas por um feixe de luz proveniente de uma lâmpada de tungstênio (ou um laser) quando o mesmo incide na parte pontiaguda de 4 um lápis.
50. A observação das figuras de difração produzidas por um feixe de luz de uma lâmpada de tungstênio, quando o mesmo incide em um fio de cabelo com a distância anteparo-fio de cabelo de 10 cm, de 60 cm e de 200 cm; e distância fonte-anteparo de 4 m, aproximadamente.
51. O princípio de Babinet, mostrando que a figura de difração produzida por uma abertura feita num anteparo é a mesma que a produzida por seu complemento (obstáculo com a mesma largura da abertura) em qualquer ponto situado fora da região central.
52. Um feixe de luz laser, incidindo sobre duas fendas (largura desprezível), colocadas a meia distância entre a fonte e o anteparo (experiência da *fenda dupla de Young*), para determinar a distância entre as fendas a partir da medida da distância que vai das fendas ao anteparo e da distância entre dois máximos consecutivos, supondo o comprimento de onda da luz conhecido.
53. A observação do que ocorre com as franjas de interferência produzidas na experiência da dupla fenda de Young, usando luz produzida por um laser, ao se fechar uma das fendas.
54. A observação, em um anteparo, do que ocorre ao se incidir um feixe de luz laser sobre um orifício e depois sobre dois orifícios vizinhos (separação de aproximadamente 2 mm), feitos com um alfinete em uma barreira opaca, com o anteparo a uma distância de cerca de 5 m da fonte.
55. O desaparecimento das franjas de interferência produzidas na experiência da dupla fenda de Young, usando luz produzida por uma lâmpada de tungstênio (de uma bancada óptica), ao se aumentar gradativamente a largura da fenda-fonte.
56. A observação do efeito da superposição de dois feixes de luz, produzidos por lasers iguais, colocados lado a lado.
57. A observação da polarização de ondas numa corda (onda transversal), usando uma corda suficientemente comprida (e esticada) e uma grade com as hastes espaçadas de aproximadamente 2 cm, para mostrar que, se girarmos a ponta da corda em círculos concêntricos, produziremos uma onda mecânica circularmente polarizada, a qual, ao passar entre duas hastes da grade, se transformará numa onda linearmente polarizada.
58. A observação do efeito da incidência, sobre um cristal de calcita, da luz produzida por um laser, colocando uma placa polarizadora perpendicularmente à trajetória de cada um dos feixes que emergem da calcita.
59. A observação, em um anteparo, da imagem que aparece quando, sobre o vidro do retroprojeter (ligado), é colocado uma agulha ou um fio de cabelo sob um cristal de calcita.
60. A observação, através de uma placa polarizadora, da imagem de um objeto refletida no vidro de uma janela, para diversos ângulos de incidência, girando a placa em torno do seu eixo.
61. A observação da luz da chama de uma vela, refletida na superfície da água de um recipiente (ou de uma placa de vidro), através de uma placa polarizadora (girando-a), para diversos ângulos de incidência, com o objetivo de determinar o ângulo de Brewster.

62. A observação do que acontece quando se coloca uma placa polarizadora sobre uma página de um livro aberto e é usada outra placa para ler o texto (girando-a)
63. A observação dos números do mostrador de uma máquina de calcular (ou de um relógio digital, ou de um celular) através de uma placa polarizadora (girando-a).
64. A adição de uma pequena quantidade de leite em pó a um vaso de água para mostrar, em uma sala escura, usando uma placa polarizadora, que as partículas de leite absorvem e reirradiam a luz incidente sobre o vaso, como se fossem antenas de dipolos.
65. A observação, ao amanhecer, ou durante o por-do-sol, do que ocorre quando se olha verticalmente para a luz refletida na atmosfera num dia claro através de uma placa polarizadora.
66. A verificação do que ocorre quando se prende uma fita adesiva de celofane transparente a uma lâmina de microscópio entre duas placas polaróide com os eixos de polarização formando 90° entre si e, em seguida, se olha para uma fonte de luz branca através das mesmas.
67. O estudo da birrefringência mecânica (descoberta em 1816), repetindo a experiência anterior agora usando uma régua de plástico colocada no lugar da fita adesiva e mantida sob tensão.
68. A verificação da *Lei de Malus*, usando um feixe de luz branca e duas placas polarizadoras, a partir da medida do ângulo entre as direções dos eixos de transmissão das placas e da medida da razão entre a intensidade da iluminação transmitida pela segunda placa e a intensidade da iluminação incidente na mesma.
69. A medida da intensidade da corrente em um amperímetro, acoplado a uma corneta receptora de microondas, quando, num arranjo em que uma corneta emissora e uma corneta receptora dessa radiação são posicionadas frente a frente (com suas antenas inicialmente paralelas, ajustadas para se obter, digamos, 1,0 mA, no amperímetro), gira-se a corneta receptora de 45° em torno de seu eixo (ver também item 101).
70. A medida da intensidade da corrente em um amperímetro, acoplado a uma corneta receptora de micro-ondas, quando, num arranjo em que uma corneta emissora e uma corneta receptora dessa radiação são posicionadas frente a frente (com suas antenas inicialmente orientadas em direções mutuamente perpendiculares, ajustadas para se obter 1,0 mA, no amperímetro), coloca-se, a meia distância entre as duas cornetas, uma grade polarizadora com as hastes formando 45° com a direção da antena da corneta receptora.
71. A verificação do que ocorre quando através de uma pena de ave (segurar com a mão) se olha para a luz de uma lâmpada de tungstênio distante.
72. A verificação do que ocorre quando se observa, através de espectroscópios, a luz de uma lâmpada de mercúrio que incide em *slides* com: uma fenda, um conjunto de duas fendas; um conjunto de três fendas; um conjunto de dez fendas; um número muito grande de fendas (densidade de linhas igual a 590 linhas/mm).
73. A observação, em um anteparo (parede), do padrão de difração produzido pela incidência da luz de um laser em uma rede unidimensional e, depois, a observação, através de um espectroscópio, do padrão de difração produzido pela incidência da luz de uma lâmpada de mercúrio, comparando os resultados.
74. A observação, em um anteparo, do padrão de difração produzido pela incidência da luz de um laser em uma rede bidimensional e, depois, a observação, através de um espectroscópio, do padrão de difração produzido pela incidência da luz de uma lâmpada de mercúrio, comparando os resultados.
75. A observação, em um anteparo, do padrão de difração produzido pela incidência da luz na superfície de um CD.
76. A observação, em um anteparo, do padrão de difração produzido pela luz de um laser ao incidir em uma rede de difração, com densidade de linhas igual a 590 linhas/mm, para observar difração por transmissão e por reflexão.
77. O padrão de difração resultante da incidência da luz de um laser em uma tela fina, comparando-o ao padrão de difração produzido pela incidência da luz de um laser em duas redes lineares, superpostas, com a direção das fendas (sulcos) de uma, orientada perpendicularmente à direção das fendas (sulcos) da outra.

78. A determinação do comprimento de onda da linha verde (forte) do espectro da luz de uma lâmpada de mercúrio, a partir da medida do ângulo de difração, usando um espectrômetro.
79. A determinação do comprimento de onda da linha verde (forte) do espectro da luz de uma lâmpada de mercúrio, a partir da medida do ângulo de difração, com a rede fazendo 5 graus com a direção perpendicular à do feixe de luz incidente, usando um espectroscópio.
80. A simulação de halos em torno da Lua e do Sol, depositando uma fina camada de pó de talco numa lâmina de microscópio, enevoando-a, em seguida, com a própria respiração, observando o que ocorre quando se olha para uma fonte pontual de luz branca.
81. A observação do que acontece quando se olha para uma lâmpada incandescente, à distância, através de um pano de seda pura, repetindo a experiência usando um outro pano de seda pura, de outro fabricante, comparando os resultados.
82. A simulação do estudo de uma estrutura cristalina simples usando micro-ondas, determinando a distância interplanar relativa ao plano (100), ou ao plano (111), a partir da medida do ângulo de Bragg, correspondente ao citado plano.
83. A determinação da densidade (massa específica) de um material (metálico) com o valor da sua massa numericamente igual à sua massa atômica.
84. A determinação experimental da constante de Avogadro por meio de técnicas de difração.
85. A medida da massa de uma esfera de isopor com uma balança e também o tempo que a mesma gasta para percorrer, com velocidade aproximadamente constante, a distância entre a posição do professor (que lança) e a posição de um aluno (que apara a esfera de isopor), para determinar o comprimento de onda associado a este corpo.
86. A repetição da experiência acima, lançando a esfera de isopor com velocidade maior.
87. O estabelecimento de analogias entre difração de raios-x e difração de elétrons com base no experimento em que se usa micro-ondas para simular o estudo da “difração de Bragg”.
88. A verificação da velocidade da Terra em relação ao éter (ou a verificação do efeito da velocidade do observador na medição da velocidade da luz), usando o interferômetro de Michelson, fazendo incidir um feixe de luz (laser) sobre uma placa de vidro para mostrar explicitamente como a figura de interferência se modificaria caso a mesma dependesse do movimento do observador em relação ao éter.
89. O mesmo do item anterior, fazendo incidir um feixe de micro-ondas sobre uma placa semirrefletora.
90. A comparação do espectro de luz emitido por uma lâmpada de vapor de mercúrio com o espectro de luz emitida por uma lâmpada incandescente (um sólido aquecido / filamento de tungstênio), utilizando uma rede de difração e um espectrômetro.
91. A observação do espectro da luz de uma vela, fazendo uso de um espectrômetro de rede.
92. A observação do espectro emitido por uma lâmpada fluorescente comum (com suporte para mesa), usando um espectrômetro de rede.
93. A observação do espectro emitido por um filamento de tungstênio, a diversas temperaturas (determinadas pelas correntes elétricas de intensidades diferentes que o atravessam), em especial, a observação da cor da radiação quando o filamento começa a emití-la.
94. A determinação da temperatura do filamento da lâmpada de tungstênio, para um certo valor de corrente, usando um voltímetro e um amperímetro (RBEF, vol. 27, n. 3, p. 343 (2005)).
95. A determinação da constante de Stephan-Boltzmann e da constante de Planck, medindo valores de tensão e corrente em um filamento de tungstênio de uma lanterna de automóvel, de 12 V e 48 W (ou de lanterna de mão - 3,8 V e 300 mA) (ver item anterior).
96. A demonstração do efeito fotoelétrico a partir da descarga de um eletroscópio, carregado negativamente, na ausência e na presença de um feixe de luz ultravioleta, relacionando a variação da abertura das lâminas aos respectivos tempos de descarga.
97. A determinação da energia cinética máxima dos elétrons arrancados da célula fotoelétrica para mostrar, medindo a voltagem e a corrente fotoelétrica, que tal energia não depende da intensidade da luz incidente, mas depende da frequência dessa luz (usar filtros diferentes).
98. A simulação da experiência de difração-interferência realizada por G. Taylor (“Franjas de interferência obtidas com luz fraca”), em 1909, na qual ele obteve fotografias da sombra de uma agulha, posicionada entre um anteparo e uma fonte de luz (uma fenda estreita colocada à frente de uma chama de gás).

99. A verificação experimental - com uma ponta de prova - da ocorrência de ondas estacionárias no espaço entre uma corneta emissora de micro-ondas ($\lambda = 3,0$ cm) e uma placa metálica (refletora).
100. A identificação da posição de dois pontos de mínimo, com o único máximo de intensidade de corrente entre eles, no espaço entre duas placas (sendo uma refletora e outra semirrefletora), medindo a intensidade de corrente para diferentes posições da ponta de prova, nesse intervalo.
101. A reinterpretação da *Lei de Malus* (em termos corpusculares) a partir da medida da intensidade da corrente em um amperímetro, acoplado a uma corneta receptora de micro-ondas, quando, num arranjo em que uma corneta emissora e uma corneta receptora dessa radiação são posicionadas frente a frente (com suas antenas inicialmente paralelas, ajustadas para obter, digamos, 1,0 mA, no amperímetro), gira-se a corneta receptora de 45° .

Bibliografia

Bibliografia Básica

HOLTON, G, ROTHERFORD, F. J. e WATSON, F. G., **Projecto de Física – Luz e Eletromagnetismo**, Unidade 4 (*Harvard Project Physics*), Lisboa: Fundação Calouste Gulbekian, 1985. Disponível em: <<http://www.lacic.fis.ufba.br/Ensino.html>>

HOLTON, G, ROTHERFORD, F. J. e WATSON, F. G., **The Project Physics Course – Models of the Atom**, Unit 5 (*Harvard Project Physics*). New York. Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1975.

GILBERT, A. **Origens Históricas da Física Moderna**, Lisboa: Fundação C. Gulbenkian, 1982.

ROCHA, J. F. M. **Origem e Evolução do Curso de Física, Licenciatura, noturno, da Universidade Federal da Bahia – o caso das disciplinas Física Básica III e IV**. 2014. 711 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014. (Ver Apêndice 4 – Textos Complementares números: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12; páginas 393 a 491). Disponível em: <https://ppgefhc.ufba.br/sites/ppgefhc.ufba.br/files/tese_final_0.pdf>.

ROCHA, J. F. M. (org.) et al. **Origens e Evolução das Ideias da Física**. 2ª. Ed. Salvador: EDUFBA, 2015. (Capítulos III, IV e V).

CASSIDY, D.; HOLTON, G.; RUTHERFORD, J. **Understanding Physics**. New York: Spring-Verlag New York Inc. 2002.

Bibliografia Complementar

NEWTON, I. **Óptica**. Tradução de André Koch Torres Assis. São Paulo: EDUSP. 1996.

ROSMORDUC, J. **De Tales a Einstein – História da Física e da Química**, Editora Caminho, 1983.

HOLTON, G; BRUSH, S. G. **Introduction to Concepts and Theories in Physical Science**. 2A. Ed. EUA (Massachusetts): Addison-Wesley Publishing Company, 1973. (Partes G e H)

PIRES, A. E. T. **Evolução das ideias da Física**. 2ª. Ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2011.

MAGIE, W. F. **A Source Book in Physics**. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1969 (págs. 265-386 – Textos originais de vários cientistas).

BASSALO, J. M. F. **Crônicas da Física**. Belém: Editora Universidade do Pará. Tomo 2, 1990.

POLKINGHORNE, J. C. **O Mundo dos Quanta**. Portugal: Publicações Europa-América, 1984.

PESSOA JR., O. **Conceitos de Física Quântica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006. v. 1.

TIPLER, P. **Física**, 2ª Ed., Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1984. vol. 2b.