

Niels Bohr, espectroscopia e alguns modelos atômicos no começo do século XX: um episódio histórico para a formação de professores^{+,*}

Stephanie Siqueira Vasconcelos¹

Mestranda do programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade Federal de São Paulo

Thaís Cyrino de Mello Forato¹

Universidade Federal de São Paulo
Campus Diadema – SP

Resumo

O físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962) é conhecido pelos físicos e químicos por causa de seu modelo atômico, que foi relevante para o desenvolvimento da teoria quântica e da química teórica. Suas contribuições são, usualmente, apresentadas de modo simplista em boa parte dos materiais didáticos de ciências, em especial aqueles voltados para a escola básica. Na maior parte das vezes, reforça-se a visão de uma história linear, elitista, neutra, ingênua e produtora de provas irrefutáveis, mediante um único método universal. Tais concepções acabam por fomentar uma visão estereotipada e ingênua sobre a ciência, em contradição às recomendações da literatura especializada e de documentos oficiais que sugerem uma formação crítica acerca do conhecimento científico e de seu desenvolvimento. Partindo desse pressuposto, neste artigo, apresentamos um enfoque alternativo às narrativas presentes em materiais didáticos, especialmente no contexto da formação inicial de professores. Enfatizamos modelos atômicos pouco conhecidos, aspectos pessoais de cientistas e alguns elementos do desenvolvimento da espectroscopia na elaboração de alguns modelos atômicos do começo do século XX, com ênfase nas contribuições de Niels Bohr. Apresentamos os pressupostos teóricos e metodológicos utilizados na delimitação de um recorte his-

⁺ Niels Bohr, spectroscopy, and some atomic models at the beginning of the 20th century: a historical episode to teacher training

^{*} *Recebido: julho de 2018.
Aceito: outubro de 2018.*

¹ E-mails: fani.siqueira.vasconcelos@gmail.com; thais.unifesp@gmail.com

tórico e na elaboração de uma narrativa historiográfica. Esse resultado aqui apresentado objetiva oferecer elementos para subsidiar os docentes formadores de professores quanto ao uso da abordagem histórica das ciências, de modo a promover, em sua futura prática profissional, o ensino e aprendizagem de conceitos científicos e reflexões sobre a prática científica.

Palavras-chave: *História da Ciência; Formação Inicial de Professores; Niels Bohr; Espectroscopia; Modelos Atômicos.*

Abstract

The Danish physicist Niels Bohr (1885-1962) is known by physicists and chemists because of his atomic model, which was relevant to develop quantum theory and theoretical chemistry. His contributions are usually presented in a simplistic way in most of the science didactic materials, especially those aimed at basic school. Most of the time, the view of a history that is linear, elitist, neutral, naive, and producer of irrefutable evidence is reinforced through a single universal method. Such conceptions end up fostering a stereotyped and naive view of science, in contradiction with specialized literature recommendations and official documents that suggest a critical training about scientific knowledge and its development. With this in mind, in this article, we present an alternative approach to narratives present in didactic materials, especially in the context of initial teacher training. We emphasize little known atomic models, personal aspects of scientists, and some elements of spectroscopy development when elaborating some atomic models at the beginning of the 20th century, emphasizing Niels Bohr's contributions. We present the theoretical and methodological assumptions used to delimit a historical approach and to prepare a historiographic narrative. This result aims at offering elements to support teacher educators regarding the use of a historical approach to science, in order to promote, in their future professional practice, the teaching and learning of scientific concepts and reflections on scientific practice.

Keywords: *History of Science; Initial Teacher Training; Niels Bohr; Spectroscopy; Atomic Models.*

I. Introdução

Reflexões sobre o desenvolvimento da ciência, a natureza da ciência ou sobre a prática científica vêm sendo consideradas fundamentais para a formação de estudantes de todas as áreas (ACEVEDO-DÍAZ; GARCÍA-CARMONA, 2016; MOURA, C.; GUERRA, 2016), o que requer uma fundamentação dos professores para abordar tais conhecimentos (OLIVEIRA; DRUMMOND, 2015; MOURA, B., 2012). Segundo Schmiedecke e Porto (2014), uma estratégia de ensino adequada em cursos de formação inicial e continuada está associada à introdução explícita de aspectos da historiografia da ciência, proporcionando, assim, oportunidades para reflexões a respeito desta. Considerando, também, as várias dificuldades apontadas pela literatura sobre as dificuldades para a inserção da história das ciências no ensino, especificamente na formação de professores (FORATO, 2009; HÖTTECKE; SILVA, 2011; MARTINS, A., 2007; 2015; MOURA, B., 2012; PORTO, 2010; OLIVEIRA; DRUMMOND, 2015), elaboramos e implementamos uma proposta pedagógica para um grupo de licenciandos de física e química, no primeiro semestre de 2018.

Um dos materiais de apoio foi um texto sobre um episódio histórico, elaborado especialmente para essa proposta e esse ambiente educacional, acerca das contribuições de Niels Bohr para o estudo da espectroscopia, no contexto de seus estudos sobre alguns modelos atômicos do começo do século XX. Além dos benefícios advindos das abordagens históricas sobre a ciência para propor reflexões sobre a prática científica (JARDIM; GUERRA, 2017), esse tema possibilita inserir conteúdos de física e de química, do século XX, na formação inicial de professores. Ademais, segundo Martorano e Marcondes (2014, p. 89-90), “[...] a compreensão da natureza descontínua da matéria, como também o uso de um modelo corpuscular, são de fundamental importância para que os indivíduos compreendam e interpretem muitos fenômenos que ocorrem no mundo em que vivem”.

Essa abordagem busca, ainda, oferecer uma narrativa alternativa à comumente presente na formação de professores, priorizando as ideias do físico dinamarquês Niels Henrik David Bohr (1885-1962), conhecido pelos físicos e químicos como o proponente de um modelo atômico relevante para o desenvolvimento da mecânica quântica e da química teórica. Em geral, as narrativas presentes nos livros textos (física e química) ou na divulgação científica reforçam a visão de uma história das ciências linear, simplista, elitista, neutra, ingênua e produtora de provas irrefutáveis, mediante um único método científico universal (MOURA; GUERRA, 2016). Seguindo aquela trajetória popular, que fomenta concepções ingênuas sobre a ciência (LOPES, 2009), parte-se dos atomistas gregos, explicando as partículas indivisíveis de modo anacrônico, e se dá um salto de mais de 20 séculos para, então, expor as ideias sobre a constituição da matéria de John Dalton (1766-1844), e sobre o suposto pudim de Joseph John Thomson (1856-1940), refutado, posteriormente, pelo experimento de Ernest Rutherford (1871-1937). No ensino superior, além dessa descrição simplista e linear de precedentes, apenas alguns aspectos que contribuíram para o modelo de Bohr costumam ser enfatizados, como a teoria da radiação do corpo negro, proposta pelo físico alemão Max Planck

(1858-1947); alguns estudos dos espectros luminosos, que ofereceram contribuições ao conhecimento dos elementos químicos; e o experimento de Rutherford. Essas ideias, supostamente, são percebidas como suficientes para a compreensão do modelo atômico de Bohr, de 1913.

Entretanto, fontes contemporâneas da história das ciências mostram que o desenvolvimento dos modelos atômicos foi bem mais complexo do que essas abordagens relatam (KRAGH, 2010). Na discussão sobre a constituição da matéria, ao longo da história da ciência, muitos episódios riquíssimos e complexos aspectos epistêmicos são ignorados, banalizados ou distorcidos (ALFONSO-GOLDFARB, 1993). Além disso, são omitidos inúmeros aspectos não epistêmicos, sociais, políticos, econômicos e psicológicos, incluindo valores pessoais dos cientistas e a sua criatividade, também peculiares aos respectivos contextos históricos (SCHMIEDECKE; PORTO, 2014).

Dessa forma, este texto pretende oferecer alguns subsídios para que o docente formador de professores possa promover reflexões críticas acerca do desenvolvimento da física e da química no início do século XX. Segundo Rosenfeld e Nielsen (1972), esse período teve frutíferos progressos nas explorações sobre/da natureza, desde a constituição do cosmos até os recessos mais íntimos da constituição da matéria. Busca-se trazer elementos conceituais, epistêmicos e sociais para promover reflexões raramente presentes no âmbito da formação de professores. Focalizamos, assim, alguns aspectos pouco explorados em materiais didáticos, buscando resgatar tanto o papel de relações pessoais de Bohr, quanto a importância do modelo saturniano de Hantaro Nagaoka (1865-1950), e as contribuições dos trabalhos de John William Nicholson (1881-1955) para o estabelecimento do seu modelo atômico, o qual também contribuiu para a elaboração do modelo atômico quântico (LOPES; MARTINS, R., 2009). Além disso, discutimos como Bohr, ao buscar suporte empírico nas fórmulas de Johann Balmer (1825-1898) e Johannes Rydberg (1854-1919) para o espectro do hidrogênio, desenvolveu uma teoria para explicar tais espectros.

Apresentamos, a seguir, a metodologia que fundamentou a delimitação e a narrativa do episódio histórico.

II. Metodologia da pesquisa – episódio histórico e sua narrativa

Este artigo traz um dos resultados parciais de uma pesquisa que buscou avaliar a preparação de professores em formação inicial acerca do uso da história da ciência no ensino. Uma proposta didática foi elaborada e implementada em duas turmas de licenciandos de física e química, em uma universidade pública. A proposta compreendia algumas atividades didáticas, dentre as quais discussões sobre um texto histórico, cuja metodologia para sua construção é aqui apresentada.

O texto histórico **não** pretende trazer contribuições originais para a área da história das ciências. Seu objetivo é trazer uma narrativa histórica adequada ao contexto da formação

inicial de professores de física e química, considerando um compromisso de se evitar fomentar narrativas presentistas ou ingênuas do processo histórico da construção da ciência. Os critérios historiográficos adotados na construção do episódio histórico seguiram a metodologia da pesquisa em história da ciência (MARTINS, L., 2005) e perspectivas da historiografia contemporânea atual, utilizando fontes primárias e secundárias da história da ciência (ALFONSO-GOLDFARB; BELTRAN, 2004; MARTINS, R., 2001, 2010). Segundo Schmiedecke e Porto (2014) a historiografia contemporânea procura destacar:

[...] a importância do contexto social na construção da ciência; a ocorrência de rupturas no processo de construção do conhecimento científico; as contribuições de outras formas de conhecimento (como a magia, os ofícios práticos, a astrologia, os saberes populares, etc.) e de outros povos e culturas além dos europeus, em diferentes épocas; e busca compreender as ideias científicas do passado no contexto em que foram produzidas, e não como “antecipações” ou “precuroras” das ideias do presente (SCHMIEDECKE; PORTO, 2014, p. 235).

Dentre os benefícios de se inserir tal perspectiva historiográfica no ensino, em todos os níveis educacionais, destaca-se seu potencial para a discussão sobre a ciência, sobre a prática científica ou sobre aspectos da natureza da ciência (ACEVEDO-DÍAZ; GARCÍA-CARMONA, 2016; JARDIM; GUERRA, 2017; MOURA, C.; GUERRA, 2016; MOURA, B., 2012; MARTORANO; MARCONDES, 2014). Com relação às concepções sobre a natureza da ciência na educação em ciências, outro aspecto considerado, neste trabalho, foi um posicionamento acerca do debate sobre haver, ou não, uma concepção essencialista das ciências, sempre que se adota uma lista de aspectos epistêmicos tidos como consensuais por parte de alguns autores (BAGDONAS; ROZENTALSKI; POLATI, 2015). Adotamos, para a construção da pesquisa e do texto aqui apresentado, a perspectiva defendida por Forato, Bagdonas e Testoni (2017), por ser ressonante com a visão historiográfica deste trabalho, que considera uma perspectiva diacrônica da história da ciência, por meio da qual cada contexto histórico é peculiar e exemplifica diferentes aspectos da natureza da ciência. Tal entendimento pressupõe que não seria possível admitir que qualquer lista de aspectos sobre a natureza da ciência possa representar toda a ciência. Cada episódio pode evidenciar alguns aspectos da natureza da ciência, contemplados ou não em diferentes listas. Historiadores que trabalham na perspectiva da historiografia contemporânea da HC (KRAGH, 1987), a despeito de debates especializados, entendem que não há um único método científico válido para todas as ciências, em todas as épocas. Admitem a pluralidade epistêmica e não epistêmica das ciências, exemplificada no estudo de diferentes episódios históricos (FORATO; BAGDONAS; TESTONI, 2017). Portanto, não se adota aqui uma visão essencialista das ciências, mas busca-se refletir sobre aspectos da natureza da ciência ou da prática científica que esse episódio específico pode exemplificar.

Ao se delimitar um episódio e produzir uma narrativa sobre ele, deve-se levar em conta, também, os valores, crenças e objetivos de quem escreve sobre a história das ciências

(HC), uma vez que a própria historiografia é uma atividade humana. Segundo Roberto Martins (2010), cada acontecimento histórico é influenciado por um enorme número de fatores, e:

A partir do caos histórico o historiador cria uma ordem compreensível, através de um processo de seleção daquilo que é descrito pelas conexões que ele próprio inventa. Mesmo se sua seleção não levar a uma história linear, houve uma omissão de inúmeros aspectos, e uma grande simplificação da complexidade histórica (MARTINS, R., 2010, p. 7).

Desse modo, é fundamental compreender que os interesses de um pesquisador (a), e sua visão específica sobre a ciência e seu desenvolvimento sempre estarão inscritos em qualquer versão historiográfica.

Tendo em conta essas considerações, selecionamos Forato (2009) como referencial teórico e como ponto de partida para a construção do recorte histórico, por considerar os objetivos que se pretende alcançar com a narrativa histórica e os aspectos sobre a prática científica que se pretende destacar”. Partindo desses propósitos explícitos, outros parâmetros são agregados para auxiliar a delimitação e narrativa do recorte histórico para o ambiente escolar, considerando, além da historiografia contemporânea, aspectos do ensino de ciências. Tais parâmetros foram adaptados por Oliveira e Drummond (2015), sob a forma de perguntas, para serem utilizados um curso de formação de professores, tanto para nortear o desenvolvimento de propostas didáticas, quanto como critérios de avaliação das produções realizadas. Considerando que tal adaptação apresentou bons resultados, algumas perguntas foram introduzidas para apoiar nossa análise (coluna da esquerda dos quadros 1, 2 e 3), buscando explicitar os objetivos das reflexões propostas pelos parâmetros. Tal análise está sintetizada² a partir dos quadros 1, 2 e 3, a seguir.

Para a seleção do material histórico estudado, foi realizado um levantamento bibliográfico em banco de dados de periódicos científicos, dissertações, teses e livros. Essa seleção de fontes primárias e secundárias considerou as reflexões já explicitadas acima.

Quadro 1 – Objetivos da abordagem histórica.

Adequando a história da ciência ao ambiente escolar	Ponderações ou parâmetros para reflexão e análise
- Quais os objetivos pedagógicos pretendidos sobre os conteúdos científicos, epistemológicos, formativos, questões sociais, direitos humanos e as competências visadas?	- P1: Estabelecer os propósitos pedagógicos para o uso da HC no ensino; - P2: Explicitar a concepção pretendida sobre a prática científica e/ou sobre os aspectos epistêmicos e não epistêmicos a se explicitar.

Fonte: autoras.

² Devido à grande extensão do estudo das fontes e da análise para construção do texto, apresentamos aqui uma síntese das reflexões para a delimitação do episódio.

O tema do episódio histórico volta-se para o desenvolvimento dos modelos atômicos do começo do século XX, especialmente sobre as contribuições da espectroscopia para o desenvolvimento do modelo atômico de Bohr (1913). As duas primeiras ponderações foram o ponto de partida para a didatização do conteúdo histórico para o ambiente de ensino pretendido, a formação inicial de professores, considerando os objetivos pedagógicos estabelecidos. Entendemos que a abordagem histórica sobre a relação dos estudos da espectroscopia no desenvolvimento dos modelos atômicos do começo do século XX pode favorecer:

- A compreensão histórica da relação dos estudos da espectroscopia no desenvolvimento dos modelos atômicos do começo do século XX;
- Uma compreensão contextualizada de conceitos científicos, tais como séries espectrais (Balmer, Paschen, Rydberg, dentre outras); aspectos de alguns modelos atômicos do começo do século XX (Joseph John Thomson, Hantaro Nagaoka, Ernest Rutherford, John William Nicholson e Niels Bohr); e formação das linhas de emissão do espectro do hidrogênio;
- A realização de leitura crítica de um texto sobre história das ciências, aprimorando a habilidade para refletir, argumentar e debater sobre aspectos da prática científica;
- Embora haja muitos aspectos epistêmicos e não epistêmicos que poderiam ser explorados no episódio, optamos por destacar os que emergiram a partir das fontes primárias e secundárias, que estivessem intimamente relacionados aos conteúdos conceituais de física e química, de modo a estimular o uso deste texto histórico em diferentes disciplinas da formação de professores. Destacamos alguns aspectos epistêmicos e não epistêmicos da prática científica ou natureza da ciência, tais como: exemplo da coletividade na ciência; a influência do prestígio de pesquisadores no desenvolvimento da ciência, como o fato de Thomson ser diretor do Laboratório de Cambridge e gozar de prestígio na comunidade científica europeia, enquanto Nagaoka não ser europeu e nem ser conhecido daquele ambiente científico; relações pessoais do pai de Bohr para encaminhá-lo a diferentes pesquisadores de prestígio e em centros de pesquisa relevantes; os contatos feitos por James Lorrain Smith, que foi aluno de Christian Bohr (pai de Bohr) na Universidade de Copenhague; Rutherford, que graças aos conhecimentos do pai de Bohr, recebeu-o em seu laboratório e era editor do periódico na época em que Bohr publicou sua trilogia, e ainda o ajudou com idioma inglês; a influência de relações pessoais no desenvolvimento da ciência; a influência de concepções teóricas prévias na observação e experimentação (o experimento de partículas alfa de Rutherford); a interpretação de resultados empíricos e matemáticos (como o caso do modelo atômico de Bohr); a percepção de ser a ciência um conhecimento mutável, provisório e que possui limitações; e também, a compreensão da ciência como um conhecimento sócio-histórico.

Quadro 2 – Definição do recorte e enfoque para o episódio histórico.

Adequando a história da ciência ao ambiente escolar	Ponderações ou parâmetros para reflexão e análise
<ul style="list-style-type: none"> - Quais conteúdos do episódio podem ser utilizados para discutir conceitos científicos? - Quais conteúdos do episódio podem ser excluídos sem prejudicar os objetivos para aprendizagem de conceitos? - Quais conteúdos podem exemplificar os aspectos da prática científica? - Quais conteúdos podem ser excluídos, sem prejudicar a visão da prática científica que quero trabalhar com os licenciandos? 	<ul style="list-style-type: none"> - P3: Selecionar o tema e o(s) episódio(s) histórico(s) apropriado(s) aos objetivos; - P4: Selecionar os aspectos a enfatizar e a omitir em cada conteúdo da HC; - P5: Confrontar os aspectos omitidos com a visão da prática científica e os conteúdos metacientíficos objetivados; - P6: Definir o nível de detalhamento do contexto não científico a ser tratado; mediar as simplificações e omissões, já que o foco na influência de aspectos não científicos (ou subjetivos) pode promover interpretações relativistas externas.

Fonte: autoras.

Enfatizamos dois modelos pouco explorados em materiais didáticos, buscando resgatar a importância do modelo saturniano de Hantaro Nagaoka e as contribuições dos trabalhos de John William Nicholson para a elaboração do modelo atômico de Bohr. Aspectos sobre a espectroscopia foram introduzidos para esclarecer os pressupostos teóricos adotados por Bohr e a relação entre teoria e resultados observacionais. Além disso, apresentamos as relações pessoais entre Thomson-Rutherford-Bohr, pois acreditamos que esta pode ter influenciado Bohr na escolha de seu modelo atômico de partida. Tais relações foram importantes para os aspectos sobre a prática científica que enfocamos.

Há muitos aspectos que não foram mencionados nesse episódio histórico; por exemplo, as partes II e III da trilogia (Bohr, 1913b, 1913c) não foram detalhadas, pois o foco do episódio era mostrar as contribuições do Bohr para o estudo da espectroscopia, e esse tema em específico está mais detalhado na primeira parte das publicações na *Philosophical Magazine*, onde ele relaciona os seus estudos com as séries espectrais; também foi omitida boa parte das modificações que ocorreram ao modelo atômico de Bohr, após a Primeira Guerra Mundial. Também foram omitidos os estudos sobre a radiação do corpo negro, pois utilizar apenas alguns resultados oferecidos por Planck foi suficiente para atingir nossos objetivos. Parte dos estudos da espectroscopia a partir da segunda metade do século XIX, também foram excluídos, sem prejuízo para a consistência da narrativa, tendo em vista as discussões já apresentadas.

Quadro 3 – Problematizando estereótipos, mitos e preconceitos.

Adequando a história da ciência ao ambiente escolar	Ponderações ou parâmetros para reflexão e análise
<p>- A narrativa está promovendo juízos de valor, estereótipos, anacronismos? Desconsiderando o contexto e fomentando conclusões ingênuas e reducionistas sobre os pensadores e sobre a ciência? A narrativa está consistente com a visão de ciência estabelecida nos objetivos?</p> <p>- O episódio apresenta debates e controvérsias na ciência, a pluralidade metodológica, a coletividade, os erros, os problemas que originaram ideias e a limitação das teorias sobre aspectos em aberto?</p>	<p>- P7: Abordar diacronicamente os conteúdos da HC de difícil compreensão atualmente: interessante estabelecer relação entre resultados relevantes para a construção da ciência com conteúdos descartados ou atualmente considerados “esquisitos”;</p> <p>- P8: Abordar diacronicamente diferentes concepções de ciência e o pensamento dos filósofos, filósofos naturais e cientistas de distintos períodos e civilizações: Apresentar vários pensadores contemporâneos trabalhando com os mesmos pressupostos metodológicos pode auxiliar a crítica ao preconceito e ao anacronismo;</p> <p>- P9: 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.</p>

Fonte: autoras.

É possível perceber, ao longo do episódio histórico, que algumas concepções foram descartadas, como é o caso do modelo atômico de J. J. Thomson de 1904, na época o mais aceito pela comunidade científica, principalmente entre os químicos. Naquele momento, era necessário um modelo estável para a explicação de outros fenômenos químicos. Esse modelo de Thomson começou a ser questionado depois dos experimentos sobre o bombardeamento de partículas alfa. Hoje, mediante os modelos atuais, os estudantes podem estranhar a ideia do átomo como um pudim de massa positiva, com partículas elétricas negativas deslocando-se em seu interior. Desse modo, perpassando diferentes modelos, pode-se discutir o caráter provisório da ciência, a não linearidade, a adequação de diferentes concepções aos seus contextos históricos, dentre outros fatores que problematizam o anacronismo.

Ao longo do episódio, influências e contribuições de outros cientistas para a formulação de ideias/hipóteses para interpretação de diversos fenômenos foram apresentadas. A compreensão a respeito de diferentes ideias de modelos atômicos, mesmo que o modelo atualmente aceito não seja nenhum desses, contextualizou as concepções de ciências da época, os debates que estavam ocorrendo e permitiu promover uma reflexão sobre aspectos da prática científica ou de natureza da ciência pretendidos. Além disso, como este episódio histórico foi utilizado no ambiente da formação inicial de professores de ciências (física e química), mostrou-se de grande valia incluir trechos de fonte primária (Niels Bohr, J. W. Nicholson, J. J. Thomson), que auxiliaram nas discussões sobre os conceitos envolvidos, nas citações de outros cientistas e, também, no debate de ideias entre eles.

Outras ponderações ainda ajudaram a delimitar o resultado abaixo apresentado, ou seja, a narrativa histórica sobre esse episódio. O enfoque buscou oferecer possibilidades de

ensino e aprendizagem de conceitos científicos, além de permitir reflexões sobre alguns aspectos epistêmicos e não epistêmicos intrínsecos ao desenvolvimento da ciência.

III. O episódio histórico: Niels Bohr, espectroscopia e alguns modelos atômicos no começo do século XX narrativa histórica

A narrativa histórica apresentada abaixo foi utilizada na implementação da proposta já mencionada. O texto passou por uma revisão de português, ocasionando pequenas correções, mas o conteúdo foi mantido na íntegra.

III.1 Modelos atômicos

No século XIX, a teoria sobre os átomos e seus constituintes não era uma unanimidade entre os cientistas da época (PEDUZZI, 2015). Dentre os anos 1890 e 1913 (ano em que Niels Bohr propôs o seu modelo para o átomo), diversos outros modelos de constituição da matéria foram propostos. Eram poucas as tentativas de articular os estudos dos espectros de linha³ aos modelos de constituição da matéria e às discussões sobre a teoria de Planck, sobre a quantização da energia.

Diferentes explicações foram propostas para a estrutura da matéria ao longo da história da ciência. No final do século XIX, predominavam duas concepções que permeavam diferentes modelos e explicações, havia cientistas que a consideravam contínua em oposição aos adeptos de uma visão particulada. Para aqueles que aceitavam a ideia de átomo como o menor constituinte da matéria, o desafio era representá-lo e compreender como era constituído. As discussões e debates entre os cientistas favoreceram o estabelecimento de propostas para a constituição da matéria.

A noção do físico britânico Joseph John Thomson sobre como era a estrutura atômica foi mudando com o passar dos anos (HEILBRON, 1981), e ele apresentou diferentes concepções de átomo. Suas ideias iniciais parecem estar relacionadas a uma concepção contínua de matéria, pois ele se baseou no modelo do físico inglês John Dalton (LOPES; MARTINS, R., 2009; THOMSON, 1937). Em um de seus modelos, proposto em 1904, Thomson considerou que não havia espaço vazio no átomo, e os elétrons negativos circulavam em anéis coplanares dentro de uma esfera preenchida uniformemente com uma carga positiva (HEILBRON, 1981). Como não haveria espaços vazios, essa matéria em forma esférica com carga positiva seria algo sutil, que permitiria o deslocamento dos elétrons em seu interior. J. J. Thomson acreditava que os elétrons seriam feixes de partículas. Portanto, o átomo não seria estático, como apresentado nos livros textos com o uso da analogia do “pudim de passas”, comumente

³ A sequência de cores formada quando a luz passa através de um prisma é chamada de espectro. A luz emitida por um gás incandescente, ao passar por um prisma, produz linhas brilhantes no espectro, de acordo com cada tipo de substância presente na amostra; se a luz que projetou esse espectro contínuo passar por um gás com temperaturas mais baixas, haverá a presença de linhas escuras (absorção) em seu espectro (PIROLO, 2010).

utilizada para descrever seu modelo (LOPES; MARTINS, R., 2009). Nessa analogia equivocada, as cargas elétricas estariam imóveis em uma “pasta” positiva, diferentemente do seu átomo dinâmico.

Além do modelo proposto por Thomson, que era diretor do Laboratório de Cambridge e gozava de prestígio na comunidade científica europeia, outra concepção para o átomo foi apresentada, em 1904, na mesma edição da *Philosophical Magazine* pelo físico japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950). Cursou seu mestrado e seu doutorado na Universidade de Tóquio, com professores europeus (LOPES, 2009; MOURA, C.; GUERRA, 2016; PENNA, 2009). Naquela ocasião, o modelo de Thomson teve maior aceitação na comunidade científica ocidental (LOPES, 2009).

Nesse modelo de Nagaoka, o átomo seria formado por uma grande massa central carregada positivamente, rodeada por anéis de elétrons (cargas negativas, que giravam em torno do centro, distribuídos em intervalos angulares iguais, repelindo-se uns aos outros) (LOPES, 2009). Diferentemente de Thomson, Nagaoka considerava que ao redor do grande núcleo haveria um espaço vazio onde se deslocavam os elétrons, portanto, caracterizando uma concepção de matéria descontínua. As atrações e repulsões entre eles eram explicadas de acordo com as leis de Coulomb. Ele usou um raciocínio semelhante ao modelo proposto por James Maxwell (1831-1879) para o movimento dos anéis de saturno (FIOLHAIS; RUIVO, 1996). Esse modelo de Nagaoka ficou conhecido como saturniano, pois esse átomo teria uma estrutura semelhante ao planeta Saturno, desse modo, haveria um núcleo central rodeado por elétrons, fazendo lembrar os anéis desse planeta (PENNA, 2009).

Nagaoka tinha o propósito de tentar explicar os espectros de linhas e de bandas com o seu modelo saturniano, o que Thomson não conseguia; essa era uma qualidade do modelo de Nagaoka (FIOLHAIS; RUIVO, 1996). Um fato interessante é que o próprio Nagaoka sabia das limitações de seu modelo atômico nuclear, por exemplo, para explicar o problema da instabilidade do átomo. Tendo em vista a eletrodinâmica clássica, para permanecer em órbita, todo corpo em movimento circular realiza um movimento acelerado, porque a direção da velocidade está sempre variando com o tempo (SILVA, 2013). E, como toda carga elétrica acelerada emite (perde) energia continuamente, irradiando-a na forma de luz, o elétron em movimento ao redor do núcleo perde energia e acaba por “cair” no centro do átomo. Essa conjectura é hoje conhecida como “colapso do átomo”. A pergunta que emerge desse contexto é, então, a seguinte: somente essa instabilidade teria sido motivo suficiente para a comunidade científica ocidental privilegiar o modelo de Thomson de 1904? (KOEHLER, 1995).

Nagaoka era um físico da Universidade de Tóquio e, apesar de suas outras contribuições para o campo da física⁴ e de ser um dos mais respeitados cientistas do Japão, ele não era muito conhecido pela comunidade científica ocidental (PENNA, 2009). Ademais, Thomson tinha uma preocupação em construir um modelo de átomo “químico” estável. Seu desenvol-

⁴ Por exemplo, Nagaoka contribuiu para os estudos sobre a propagação da radiação eletromagnética na atmosfera (PENNA, 2009, p. 12).

vimento era necessário para o aprofundamento e a construção de modelos explicativos no campo da química, principalmente em áreas da físico-química e química orgânica e foi bastante utilizado na época (KRAGH, 2010). O problema do colapso do átomo, o pouco prestígio de Nagaoka frente ao reconhecimento de Thomson no Ocidente e o sucesso prático do seu modelo químico parecem ter sido alguns dos principais motivos para que o modelo saturniano fosse relegado até 1911... Tais ideias, de uma carga concentrada em uma região central e com elétrons girando em órbitas ao seu redor, viriam a ficar mais conhecidas a partir do modelo de Rutherford. Teria Nagaoka sido injustiçado pela história?

De maneira geral, o modelo proposto pelo físico neozelandês Ernest Rutherford aparece nos livros didáticos como o primeiro modelo atômico contendo um núcleo, ainda que o próprio Rutherford não tenha utilizado o termo “núcleo”. Entretanto, essa discussão/debate já existia antes de ele propor sua teoria em 1911. Um dos alunos de Thomson, o matemático britânico George Adolphus Schott (1868-1937), elaborou os cálculos sobre o colapso do átomo para fundamentar as críticas aos modelos nucleares. Além de Nagaoka, o físico francês Jean Perrin (1870-1942) também apresentou um modelo planetário⁵, mas era uma proposta superficial (MOURA; GUERRA, 2016).

Nagaoka realizou uma viagem ao continente europeu para participar de duas conferências e visitar alguns centros de pesquisa, sendo um desses o coordenado pelo físico neozelandês Ernest Rutherford (PENNA, 2009). Parece que Nagaoka conversou com ele sobre sua teoria atômica. “Rutherford escreveu uma carta a Nagaoka negando ter sofrido influência de seu modelo para seu trabalho, pois ainda não teria analisado seu artigo enviado, apenas se lembrava de que Nagaoka teria escrito algo sobre o assunto” (LOPES, 2009, p. 73). Posteriormente, Rutherford citou o modelo saturniano de Nagaoka, em um artigo em 1911. No ano de 1908, esse modelo elaborado por Nagaoka havia desaparecido de cena após ser abandonado por ele próprio (LOPES, 2009).

Ernest Rutherford foi aluno de Thomson no laboratório de Cavendish na Universidade de Cambridge (MARQUES; CALUZI, 2005). Rutherford estudou a radioatividade e a física nuclear em sua carreira acadêmica, na Inglaterra e no tempo em que passou na Universidade de McGill (Canadá), desenvolvendo trabalhos sobre radioatividade com o químico inglês Frederick Soddy (1877-1956). Em 1907, ele retornou à Inglaterra para ocupar a cátedra de Física na Universidade de Manchester e, no laboratório dessa instituição, ele foi responsável por um grupo de jovens estudantes: Hans Geiger (1882-1945), Henry Moseley (1887-1915), Charles Galton Darwin (1887-1962), James Chadwick (1891-1974), Ernest Marsden (1889-1970), Niels Bohr, Nevill Mott (1905-1996) e Thomas Royds (1884-1955) (PENNA, 2009), que desenvolveram novas ideias sobre a estrutura da matéria, no decorrer dos anos (MARQUES; CALUZI, 2005).

⁵ Para ver sobre o modelo planetário de Perrin veja Moura, C. (2014) e Kragh (2010).

Rutherford, com o alemão Hans Geiger e o físico inglês Ernest Marsden, desenvolveram novos métodos que possibilitavam a contagem das partículas alfa, que ainda não era classificada como o núcleo de Hélio, mas sabia-se que era uma partícula de carga oposta ao elétron. Isso permitiu que eles desenvolvessem experimentos, entre os anos 1908 e 1910, sobre o comportamento e o espalhamento das partículas alfa quando atravessavam a matéria (LOPES, 2009). Nesses experimentos, diferentes materiais eram bombardeados com as radiações até então conhecidas como partículas alfa e beta.

Durante a realização dos experimentos, eles perceberam que, ao bombardear as lâminas metálicas com essas partículas alfa, algumas dessas sofriam grandes desvios (PENNA, 2009). Geiger e Marsden constataram que quanto maior o peso atômico do metal, maior o número de partículas alfas defletidas, e um número ainda maior de partículas voltavam na mesma direção de origem (SILVA, 2013). Ademais, a maioria das partículas atravessava o metal sem sofrer qualquer desvio. Considerando o modelo de Thomson, de 1904, não era possível explicar esse tipo de espalhamento das partículas alfa, pois sendo o átomo uma massa com distribuição homogênea de carga positiva, na qual elétrons se movimentariam em anéis concêntricos, sua região central teria uma carga próxima de zero. Como explicar o significativo desvio que as partículas alfa sofriam?

Além disso, tendo como pressuposto o modelo de Thomson de 1904, por que razão Rutherford e seus assistentes colocariam um anteparo circular ao redor do experimento? Se a ideia era estudar o que ocorria com as partículas que colidiam com a folha de ouro, ou outros materiais, por que o anteparo não era plano do lado oposto à fonte?

Nessa época, em 1909, cinco anos após a publicação dos modelos atômicos de Thomson e Nagaoka, a conjectura de que seria possível o átomo ter uma configuração planetária ou saturniana teria que ser considerada. Isso era favorecido pelo fato de a mecânica newtoniana conseguir explicar muito bem o movimento dos planetas do sistema solar, expresso pelas leis de Kepler, o que favorecia a adoção de uma analogia.

Segundo Penna (2009), foi a partir desses resultados que Rutherford teria iniciado a elaboração de um modelo atômico inspirado no sistema solar, no qual o Sol representaria a carga central e os planetas seriam os elétrons. Mas, considerando que Nagaoka visitou Rutherford em 1910, e que já havia publicado sobre o modelo saturniano em 1904, poderiam ter Rutherford e seus assistentes buscado investigar experimentalmente o modelo de Nagaoka?

É importante destacar que, antes dos experimentos realizados por Rutherford e seus alunos, Thomson já havia tentado encontrar uma relação entre o espalhamento de partículas carregadas com a estrutura do átomo (HEILBRON, 1977).

Se considerarmos o modelo de Nagaoka, a previsão da trajetória das partículas alfa seria bem diferente daqueles resultados experimentais obtidos pela equipe de Rutherford pois, considerando um grande núcleo de grande massa no centro do átomo, os desvios dessas partículas deveriam ser mais intensos do que os observados (PIETROCOLA *et al.*, 2013).

Depois dessas considerações, como explicar os motivos que justificavam os grandes desvios com apenas algumas partículas? Rutherford concluiu: se a maioria das partículas conseguia atravessar a folha de ouro, era porque existiam espaços vazios na folha (SILVA, 2013). Dessa maneira, se a maioria atravessa a folha sem desvios e apenas algumas partículas sofriam pequenos ou grandes desvios, deveriam existir grandes espaços vazios e algo bastante denso e com mesma carga das partículas emitidas. Portanto, para Rutherford, os desvios eram devido à repulsão elétrica. Analisando a distribuição e os resultados desses desvios, ele propôs um novo modelo atômico, em 1911 (LOPES, 2009). Esse modelo apresenta o átomo como um sistema solar em miniatura, com elétrons girando com distribuição esférica uniforme, em órbitas circulares, ao redor do seu centro, onde haveria carga elétrica oposta. Ele não denomina tal região de núcleo (BASSO; PEDUZZI, 2003).

Podemos notar que esse modelo de Rutherford está mais próximo do modelo existente naquele contexto, o de Nagaoka, já visto anteriormente. Além disso, nesse artigo de 1911, Rutherford não define se a carga da região central seria positiva ou negativa, assim como as partículas (elétrons) que giravam em torno do centro do átomo. Ele apenas afirmou que as cargas teriam sinais opostos. Em conclusão, esse fato é bem diferente do que é apresentado em muitos textos que relatam esse modelo (LOPES, 2009).

Apesar dos bons resultados em explicar os pequenos e grandes ângulos de deflexões das partículas alfa, o modelo de Rutherford, assim como o modelo saturniano de Nagaoka, também apresentou dificuldades quanto à estabilidade dos elétrons, tendo em vista a eletrodinâmica clássica (BASSO; PEDUZZI, 2003). A questão da existência de um núcleo trouxe grandes discussões entre os cientistas da época sobre a estabilidade dos sistemas atômicos (PENNA, 2009). E a instabilidade dos modelos planetários despertava bastante interesse por causa do seu potencial explicativo (SILVEIRA; PEDUZZI, 2006). Por causa das limitações dos modelos planetários, a proposta de Thomson de 1904 foi uma das mais influentes do início do século XX, até o modelo proposto por Bohr, que viria a se tornar, segundo Kragh (2010), a primeira teoria bem-sucedida sobre a estrutura da matéria. Além de Thomson, Perrin, Nagaoka e Rutherford, outros cientistas propuseram diferentes modelos para a constituição da matéria.

III.2 Contribuições da espectroscopia para um novo olhar para o átomo

Mesmo com essa diversidade de modelos para o átomo, outra questão ficava em aberto, pois nenhuma dessas teorias conseguia explicar por que, nos espectroscópios (Fig. 1), surgiam linhas espectrais diferentes para cada material observado; afinal, o que representavam aquelas linhas? Para entendermos essa situação, vamos voltar um pouquinho no tempo.

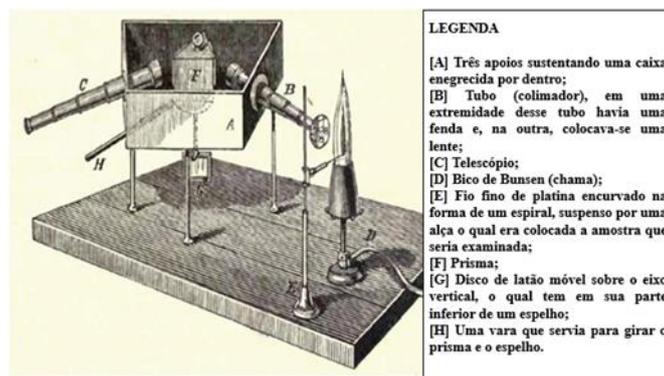


Fig. 1 – Espectroscópio utilizado pelo químico alemão Robert Bunsen (1811-1899).
 Fonte: ROSCOE, 1885, p. 59, legenda própria.

Isaac Newton (1643-1727) havia contribuído para o desenvolvimento dos espectroscópios com base em seus estudos sobre a natureza da luz (NEWTON, [1704] 1952). A partir da década de 1850, Gustav Kirchhoff (1824-1887) e Robert Bunsen (1811-1899) desenvolveram espectroscópios especificamente para o estudo da constituição da matéria. Eles aqueciam diferentes materiais na chama do bico de Bunsen que, observados pelo espectroscópio, apresentavam diferentes combinações de linhas coloridas projetadas em um anteparo, que, posteriormente, receberam o nome de espectros e foram associados a cada elemento químico (Fig. 2). Isso permitiu a detecção de novos elementos químicos, por eles e por outros cientistas, por exemplo, William Crookes (1832-1919), Ferdinand Reich (1799-1882), Hieronymous Richter (1824-1898), Paul-Émile Lecoq de Boisbaudran (1838-1912), dentre outros (DEKOSKY, 1973). Apesar de não explicarem a causa dos espectros, ou seja, que modelo de constituição da matéria explicaria tal fenômeno, vários cientistas buscaram estabelecer relações matemáticas que permitissem descrever um padrão de comportamento das linhas observadas, a partir da distância entre elas.

No final do século XIX e início do século XX, o espectro de emissão do hidrogênio foi objeto de inúmeros estudos, por ser o mais simples (SILVEIRA; PEDUZZI, 2006). Balmer, em 1885, depois de tentar combinar os dados experimentais nos mais variados arranjos numéricos, mostrou a regularidade dos comprimentos de onda das linhas visíveis do espectro do hidrogênio. Após a proposta de Balmer, outros físicos e matemáticos deram contribuições ao estudo dos espectros, e criaram as séries espectrais⁶, como o físico sueco Rydberg; Heinrich Kayser (1853-1940), Carl Runge (1856-1927); Alfred Fowler (1868-1940), Walter Ritz (1878-1909), Theodore Lyman (1874-1954), Louis Paschen (1865-1947), dentre outros (PEDUZZI, 2015; LOPES, 2009). Tais estudos contribuíram para os estudos sobre a radiação do corpo negro e sobre a constituição da matéria.

⁶ As séries espectrais são fórmulas empíricas elaboradas para explicar a posição das linhas espectrais presentes nos espectros dos elementos químicos.



Fig. 2 – Espectro Espectros de emissão de alguns elementos químicos. Fonte: LEITE; PRADO, 2012, p. 2504-4.

Apesar desses estudos, até 1911, os modelos atômicos não explicavam a ocorrência desses espectros. No mesmo ano em que Rutherford divulgou o seu modelo (1911), o astrofísico inglês John William Nicholson (1881-1955)⁷ também publicou sua proposta de constituição da matéria. Podemos fazer o seguinte questionamento: será que esses novos modelos possibilitaram explicar os espectros de linha e as séries espectrais?

Nicholson desenvolveu trabalhos em diversos temas como: ondas eletromagnéticas, eletromagnetismo, som, raios-X, espectroscopia e modelos atômicos (LOPES, 2009). No período de 1911 a 1917, ele dedicou-se aos estudos da espectroscopia e à teoria atômica. Em 1911, Nicholson iniciou uma série de publicações sobre os espectros da coroa solar e das nebulosas, e sobre a sua teoria sobre a constituição da matéria (LOPES; MARTINS, R., 2007). Enquanto alguns cientistas realizavam experimentos em seus laboratórios, Nicholson buscou inspiração e dados a partir da observação dos corpos celestes, com o uso de espectroscópios acoplados ao telescópio. Ele propôs o seu modelo atômico nuclear que, num primeiro momento, era baseado na física clássica e, posteriormente, adotou explicações que viriam a ser incorporadas à teoria quântica (LOPES; MARTINS, R., 2007). Apesar de não ser mencionado em materiais didáticos, seu modelo atômico trouxe acréscimos à proposta de Rutherford. Para ele, os átomos – formados por um núcleo positivo rodeado por anéis onde estariam os elétrons em movimento circular – comporiam elementos presentes nesses corpos celestes (PENNA, 2009).

Em uma das publicações de 1911, Nicholson enfatiza a importância dos trabalhos de Thomson no desenvolvimento do seu modelo atômico, como podemos observar:

⁷ “[Nicholson] nasceu em Darlington, foi um grande matemático e desenvolveu investigações no campo da física e astroquímica. Estudou em Manchester de 1898 a 1901, depois seguiu para o Trinity College em Cambridge, onde obteve doutorado em Matemática e também atuou no laboratório Cavendish, concomitante com a estada de Bohr no mesmo laboratório em Cambridge, e depois na Queen’s University em Belfast. Em 1912 assumiu como professor de Matemática na Universidade de Londres – King’s College.” (LOPES; MARTINS, 2007, p. 4).

[...] a eletricidade positiva existe em unidades muito pequenas, de raio muito pequeno se comparado com o [da região onde estão] dos elétrons, e é a fonte de quase toda a massa do átomo. O sistema rotativo é, portanto, planetário, sendo notável que Rutherford, em um artigo recente, tenha concluído que o sistema planetário é o mais provável, a partir da evidência fornecida pelos experimentos de espalhamento. Mas, embora o tamanho das unidades positivas seja tão diferente, a concepção de Thomson sobre a distribuição uniforme do volume é essencial para os cálculos da teoria atômica atual (NICHOLSON, 1911, p. 865-866, tradução livre).

Podemos notar que Nicholson faz referência aos experimentos realizados por Rutherford e seus alunos sobre o espalhamento de partículas alfa, e que o modelo planetário seria o ideal para representar o átomo. Nicholson adotou como referência o modelo de Thomson, mas seu modelo nuclear⁸ estava mais próximo das ideias propostas por Nagaoka (1904) do que das ideias de Rutherford (1911) (LOPES, 2009). Esse modelo de Nicholson poderia ser entendido como uma adaptação do modelo de Thomson, na qual a esfera de carga positiva foi encolhida até um tamanho bem menor que o raio da trajetória do elétron (McCORMMACH, 1966). Assim, podemos considerar o modelo de Nicholson como planetário, com uma carga positiva no centro, a qual ele chamou de núcleo, e com elétrons deslocando-se em órbitas ao seu redor (MOURA, C.; GUERRA, 2016).

Em 1911, onze anos depois de Max Planck ter introduzido a ideia da quantização da energia, alguns ainda acreditavam que a teoria dos átomos não estava associada ao conceito de *quanta* (McCORMMACH, 1966). Contudo, em 1912, no segundo artigo sobre a coroa estelar, Nicholson cita as ideias de Planck e sugere que o momento angular do elétron só poderia assumir determinados valores (LOPES; MARTINS, R., 2007). O *quantum*, até aquele momento, estava associado à energia; entretanto, Nicholson introduziu a concepção de o momento angular ser quantizado e toda sua justificativa matemática baseava-se nas leis clássicas (McCORMMACH, 1966). Nesse mesmo ano, Nicholson definiu que essas mudanças discretas do momento angular seriam múltiplos inteiros de $h/2\pi$ (LOPES, 2009). Para Nicholson, o momento angular do átomo pode somente aumentar ou diminuir em valores discretos, quando os elétrons saem ou retornam (LOPES; MARTINS, R., 2007).

Segundo Lopes (2009), Nicholson foi o primeiro a usar o seu modelo para prever linhas espectrais de corpos celestes, antes de essas linhas serem efetivamente observadas. Posteriormente, outros cientistas encontraram em um espectro solar, obtido durante um eclipse solar, a linha prevista por Nicholson. Além disso, Nicholson acreditava que “as linhas dos espectros eram definidas pelo estado do átomo (neutro ou carregado), ou seja, para ele, o átomo era nuclear e cada distribuição eletrônica correspondia a uma emissão específica no espectro de raios dos átomos” (LOPES, 2009, p. 114).

⁸ Segundo Kragh (2010), Nicholson foi quem denominou de núcleo o centro do átomo, mas esse termo não é utilizado por Thomson, Nagaoka ou Rutherford.

Apesar de Nicholson ter associado as linhas espectrais a seu modelo de constituição da matéria, e ter citado a quantização de Planck para o momento angular do elétron antes de Bohr, ele é negligenciado em materiais didáticos.

Nicholson chegou a expressar o espectro na forma de uma série (empírica); entretanto, esta não era do tipo de Balmer, Rydberg, Kaiser ou Runge (McCORMMACH, 1966). Após as publicações de 1912, Nicholson aprofundou a discussão sobre os espectros do hidrogênio e do hélio (LOPES, 2009). Como veremos mais à frente, a partir desses trabalhos, ele estabeleceu um diálogo com as ideias de constituição da matéria de Niels Bohr.

III.3 Contexto dos estudos de Niels Bohr

Niels Henrik David Bohr nasceu em Copenhague (Dinamarca), onde construiu sua família e quase toda a sua carreira científica (ROSENFELD; NIELSEN, 1972). Era filho de Christian Bohr e Ellen Adler. Seu pai era professor de Fisiologia na Universidade de Copenhague e sua mãe pertencia a uma importante família judia de banqueiros e políticos da Dinamarca, que tinha modos claramente progressistas (PENNA, 2009). Eles tiveram mais dois filhos, além de Niels, que era o segundo filho, Jenny (primogênita) e o caçula Harald (ROSENFELD; NIELSEN, 1972).

Niels iniciou seus estudos acadêmicos na Universidade de Copenhague, graduou-se em física e, durante o curso, também estudou matemática, química e astronomia. Foi orientado pelo professor Christian Christiansen (1843-1917), um dos amigos próximos de seu pai (ROSENFELD; NIELSEN, 1972). Na mesma instituição, fez mestrado e doutorado, este último concluído no ano de 1911 e o tema de sua tese versou sobre a aplicação da teoria dos elétrons à explicação das propriedades físicas dos metais, um trabalho puramente teórico, no qual Niels teve problemas para o tratamento quantitativo adequado com a base da eletrodinâmica clássica (ROSENFELD, 1981 *apud* LOPES, 2009). Para ele, era fundamental uma ruptura com a física teórica clássica. Nas suas palavras: “posso assumir que existem forças na natureza de um tipo completamente diferente da mecânica usual” (HEILBRON; KUHN, 1969).

Depois de terminar sua formação em Copenhague, Niels Bohr mudou-se para Cambridge (Inglaterra), em agosto de 1911, com o objetivo de dar continuidade aos seus estudos sobre a teoria dos metais, sob a orientação de Thomson que, na época, era diretor do Laboratório de Cavendish (PENNA, 2009; ROSENFELD; NIELSEN, 1972). A escolha pela Universidade de Cambridge ocorreu por influência de seu pai, que tinha apreço às coisas inglesas e, em particular, ao trabalho de Thomson (HEILBRON; KUHN, 1969). Apesar de ter sido amigável com Bohr em seu primeiro encontro, Thomson demonstrou desinteresse por seus trabalhos (HEILBRON, 1977), provavelmente pelas críticas que Bohr fez à teoria dos metais de Thomson. Segundo Heilbron e Kuhn (1969, p. 225), “Bohr poderia indicar os erros que ele havia descoberto, mas não conseguiu explicar seus argumentos”. Para esses autores, o idioma

poderia explicar parte do problema de Bohr em se comunicar com Thomson. Apesar desse desapontamento, Bohr aproveitou seus três meses de estadia em Cambridge, aprendendo sobre as pesquisas que Thomson estava realizando (ROSENFELD; NIELSEN, 1972).

Bohr mudou-se para Manchester (Inglaterra), em março de 1912, para trabalhar com Rutherford (HOYER; 1981). O primeiro encontro entre os dois havia ocorrido em novembro de 1911, na casa do Professor James Lorrain Smith (1862-1931)⁹. Nesta época, Rutherford retornava da primeira “Conferência Solvay”, que ocorreu em Bruxelas (Bélgica), cujo tema pautou a conversa entre ambos e influenciou diretamente seus estudos¹⁰ (HEILBRON; KUHN, 1969). De acordo com um dos assistentes de Niels, Léon Rosenfeld (1972), era difícil imaginar dois temperamentos mais diferentes do que os de Bohr e Rutherford; contudo, no primeiro contato, iniciou-se uma amizade que durou ao longo de suas vidas.

Foi durante os encontros com Rutherford que eles conversaram sobre a possibilidade de uma estadia de Bohr em Manchester (HEILBRON; KUHN, 1969). Ele não foi para Manchester para elaborar um novo modelo de constituição da matéria, e sim para realizar um curso experimental de radioatividade, de seis meses no laboratório de Rutherford, na Universidade de Manchester (HOYER, 1981; HEILBRON 1977). Bohr desenvolveu seu estudo muito próximo a ele, que acompanhava pessoalmente os trabalhos de seus estudantes e assistentes. Em Manchester, ele teve a oportunidade de conhecer pesquisadores como o físico-químico húngaro George Hevesy (1885-1966), o físico-matemático inglês Charles Galton Darwin, Hans Geiger e Ernest Marsden, importantes interlocutores no decorrer da vida de Bohr (LOPES, 2009). Assim, para ele, era importante o contato com outras pessoas para o desenvolvimento de suas teorias, hipóteses e concepções. Durante toda sua carreira acadêmica, Bohr apurava as suas ideias a partir de longas discussões e debates com as pessoas próximas, como alguns cientistas da época e seu irmão matemático Harald, com o qual manteve contato durante todo o tempo em que ficou na Inglaterra (HEILBRON, 1977).

Em 26 de julho de 1912, Bohr retornou à Dinamarca, onde foi nomeado professor assistente na Universidade de Copenhague (HOYER, 1981). Como veremos mais adiante, em Copenhague, Niels se dedicou ao problema da instabilidade do átomo de Rutherford perante a eletrodinâmica clássica, para, então, construir sua teoria sobre a constituição de átomos e moléculas (LOPES, 2009). Para o desenvolvimento de seu modelo atômico utilizou, também, os estudos provenientes do modelo de Rutherford, as pesquisas introdutórias de Max Planck, e os trabalhos sobre as linhas espectrais, observadas a partir das análises espectroscópicas dos elementos químicos e os trabalhos sobre as séries espectrais. Além disso, outras inspirações parecem ter sido relevantes para concluir seu modelo.

⁹ James Lorrain Smith foi aluno de Christian Bohr (pai de Bohr) na Universidade de Copenhague (ROSENFELD; NIELSEN, 1972).

¹⁰ Esta conferência tinha como tema “A teoria da radiação e os quanta” e propiciou discussões sobre os trabalhos de Planck e Albert Einstein (1879-1955). Provavelmente muitos dos cientistas que participaram da conferência nunca tinham ouvido falar sobre a teoria quântica até aquele momento (SCHMIDT, 2008).

III.4 Bohr, a espectroscopia e um modelo para o átomo

Em julho de 1913, teve início a publicação dos artigos que compõem a trilogia *On the constitution of atoms and molecules* de Bohr, na *Philosophical Magazine*, com a publicação da parte I, e posterior continuidade nos meses de setembro, com a publicação da parte II, e em novembro, com a publicação da parte III. Na primeira parte, Bohr apresentou a sua proposta para o átomo de hidrogênio. Já no segundo e terceiro artigos, Bohr ampliou as discussões para átomos com mais elétrons e sobre a formação de moléculas e ligações entre os átomos (LOPES, 2009). Nas segunda e terceira partes, é possível observar um predomínio de explicações baseadas na física clássica, bem como uma forma bastante semelhante aos trabalhos de Thomson e à escola de Cambridge, vinculando sua teoria sobre a constituição de átomos e moléculas com as propriedades químicas, a formação de moléculas, o arranjo periódico dos elementos químicos e as ligações covalentes (LOPES, 2009). Portanto, durante a construção de sua teoria sobre átomos e moléculas, é possível observar as influências das pesquisas anteriores nos estudos de Bohr, dos tempos em que ele trabalhou com Thomson (vinculação das propriedades químicas) e Rutherford (os estudos da radioatividade) e o predomínio das explicações da física clássica, dentre outras. De acordo com Kragh (2012), a parte relacionada às propriedades químicas da matéria era um estudo bem ambicioso da teoria de Bohr, de 1913. Além desses temas citados acima, o segundo e o terceiro artigos também envolviam questões sobre óptica e magnetismo.

Como vimos, Bohr foi para a Inglaterra com o objetivo de dar continuidade a sua teoria sobre os metais, sob orientação de Thomson. Entretanto, essa parceria não deu muito certo, o que parece ter levado Bohr a procurar Rutherford. Assim, sua ida para um novo laboratório em Manchester acabou por levá-lo ao estudo do átomo. Nesse momento, Bohr, assim como outros cientistas da época, buscava uma solução para o colapso do átomo e um modelo para a constituição da matéria. Havia ainda outros debates no período, por exemplo, se a matéria era contínua ou discreta, se haveriam ou não espaços vazios em seu interior (GUERRA; BRAGA; REIS, 2005), se era possível adotar entidades hipotéticas na elaboração de hipóteses (MARTINS, R., 2006). Essas novas pesquisas levariam Bohr a articular estudos de Rutherford, Nicholson e Planck, a outros resultados empíricos e matemáticos do período.

Bohr, no primeiro artigo de sua trilogia, deixa clara a escolha pelo modelo de Rutherford frente ao modelo de Thomson de 1904, apesar das semelhanças com os trabalhos desse último. O modelo proposto por Rutherford não tinha atraído muita atenção da comunidade científica até então, mas passou a ser mais estudado após a publicação do modelo atômico de Bohr, que o utilizou como ponto de partida seu modelo nuclear (HEILBRON, 1981).

Como veremos a seguir, Bohr relacionou, ainda, os espectros de linha e as séries espectrais de Balmer, Rydberg, Lyman e Paschen à quantização de Planck e ao átomo planetário de Rutherford. Vários pensadores, alguns pouco conhecidos, e diferentes resultados contribuí-

ram para o modelo de Bohr em um cenário bem mais complexo do que os trazidos pelos livros didáticos. Vejamos um pouco desses elementos.

O interesse pelo modelo de Rutherford, por parte de Bohr, pode ter ocorrido quando ele refletia a respeito dos estudos teóricos feitos pelo físico-matemático de Cambridge, Charles Galton Darwin, do grupo de Rutherford, sobre absorção de partículas alfa durante o seu tempo em Manchester, em 1911 (HEILBRON, 1981). C. G. Darwin, utilizando como base o modelo atômico de Rutherford, assumiu que as partículas alfa perdem energia somente quando penetravam o átomo (HOYER, 1981). O fato de o modelo atômico de Rutherford ser instável, de acordo com as leis da física clássica, era adequado para o desenvolvimento das ideias de Bohr (LOPES, 2009), pois, como vimos anteriormente, em sua pesquisa de doutorado sobre a eletrodinâmica dos metais Bohr já considerava que a física clássica não conseguia explicar certos fenômenos da natureza. Segundo Kragh (2012), o fato de ele já questionar a física clássica pode tê-lo preparado para entender o átomo de uma maneira um pouco diferente de seus contemporâneos.

Para tentar contornar o problema da instabilidade, o colapso do átomo, Bohr utilizou a ideia da quantização da energia proposta por Planck, treze anos antes, em 1900, ainda que essa ideia fosse controversa entre os cientistas da época (SILVA, 2013):

[...] a eletrodinâmica clássica não consegue descrever o comportamento de sistemas de dimensões atômicas. Seja qual for a alteração nas leis do movimento dos elétrons, parece necessário introduzir, nessas leis em questão, uma quantidade alheia à eletrodinâmica clássica, a constante de Planck, ou quantum elementar de ação (BOHR, 1913a, p. 2, tradução livre).

Por conseguinte, para Bohr, somente a física clássica seria incapaz de lidar com os fenômenos atômicos, deixando claro que, para compreender a estrutura atômica, era necessário tomar como base princípios não clássicos (KRAGH, 2012). Planck, em 1900, estava buscando explicar a curva obtida a partir dos experimentos sobre a radiação do corpo negro. Os modelos vigentes até então, considerando a matéria como contínua, não explicavam a curva experimental. Planck, mesmo sem um modelo teórico que justificasse sua proposta, utilizou um artifício matemático e propôs que a energia era absorvida ou emitida de forma descontínua, em forma de pacotes de energia, os quais ele denominou *quanta* – plural de *quantum* (PENNA, 2009). Bohr contornou o problema da instabilidade presente no modelo planetário de Rutherford propondo a teoria de que o elétron só poderia ocupar determinadas órbitas ao redor do núcleo do átomo e que a transição de uma órbita para outra obedecia à diferença entre os valores de energia associada ao movimento do elétron em cada órbita. De acordo com a teoria de Planck, agregou a ideia de que essa energia só poderia assumir determinados valores.

Recordando, Thomson, em seu modelo de 1904, defendia que, no átomo, os elétrons circulam em anéis coplanares dentro de uma esfera de carga positiva preenchida uniformemente. Na proposta de Nagaoka, de 1904, o átomo seria formado por uma grande massa cen-

tral carregada positivamente, rodeada por anéis de elétrons. Diferentemente desse último modelo, Rutherford (1911), propôs que o átomo teria distribuições esféricas uniformes de elétrons, girando em órbitas circulares ao redor de um pequeno centro com carga elétrica oposta. Rutherford não denominava de núcleo essa região, tampouco determinava se sua carga seria positiva ou negativa. Essas informações diferem das comumente apresentadas em materiais didáticos.

É importante salientar que a percepção física de que a constituição dos átomos e moléculas seria governada pelo *quantum* de ação (a constante de Planck) não foi ideia exclusiva de Bohr, pois já havia trabalhos anteriores que utilizavam as ideias de quantização de Planck. O próprio Bohr cita em sua trilogia alguns exemplos, como Albert Einstein e o físico tcheco Arthur Hass (1884-1941) (BOHR, 1913a). Além disso, cabe ressaltar que Nicholson construiu sua teoria sobre a constituição da matéria utilizando um modelo nuclear e as ideias da teoria quântica de Planck, antes de Bohr, como vimos anteriormente (PENNA, 2009). O objetivo de Bohr era construir as bases de sua teoria para o átomo, ao tentar a articulação das ideias introduzidas por Planck e o movimento dos elétrons ao modelo atômico de Rutherford, com o intuito de solucionar o problema da instabilidade desse modelo. Deste modo, a teoria de Bohr, contrariamente à narrativa hegemônica, não começou com um problema empírico, e sim com um problema teórico, qual seja, o de dar sustentação à hipótese de Rutherford sobre o núcleo do átomo (SILVEIRA; PEDUZZI, 2006).

Além de oferecer uma solução para o problema da instabilidade do átomo, Bohr também articulou o seu modelo aos estudos da espectroscopia. Essa relação não era tradição na escola de Cambridge. Thomson, por exemplo, não havia considerado os estudos dos espectros em seus trabalhos. Tampouco tinham sido levados em consideração por Rutherford, ou mesmo por Bohr, até depois de seu retorno a Copenhague, em 1913 (HEILBRON, 1981). Contudo, ao publicar sua teoria sobre a constituição de átomos e moléculas, Bohr, em seu primeiro artigo da trilogia, fez um estudo detalhado sobre as linhas de emissão do espectro do hidrogênio. Por que será que Bohr decidiu incluir os estudos sobre a teoria espectral? Será que nesse período Bohr teve contato com trabalhos que relacionavam as linhas espectrais aos modelos de constituição da matéria?

A ideia do espectro de linhas do hidrogênio e, conseqüentemente, a fórmula de Balmer, parecem ter sido incluídas por Bohr de “última hora”, pois estas questões não aparecem em suas anotações anteriores (LOPES, 2009). Até 1912, Bohr já havia elaborado a sua teoria, baseando-se no modelo planetário de Rutherford e na quantização da energia de Planck, conforme o seu manuscrito enviado a Rutherford (ROSENFELD, 1981 *apud* LOPES, 2009). No final de 1912, Bohr dá indícios sobre o que o levaria a elaborar a sua teoria, relacionando suas conjecturas teóricas sobre os átomos aos estudos dos espectros (LOPES, 2009). Os trabalhos de Nicholson parecem ter sido importantes para o desenvolvimento da teoria sobre a constituição de átomos e moléculas de Bohr. Isso pode ser notado por meio das correspondências de

Bohr, no tempo que ele ficou na Inglaterra, como é o caso do cartão de natal enviado para seu irmão Harald, no final de 1912:

P.S.: Embora não seja apropriado para um cartão de Natal, um de nós [Bohr e esposa assinam o cartão] gostaria de dizer que a teoria de Nicholson seja incompatível com a sua própria. Porque os últimos cálculos deveriam ser válidos para o estado final ou clássico dos átomos, enquanto Nicholson parece estar preocupado com átomos enquanto eles irradiam, isto é, enquanto os elétrons estão prestes a perder sua energia, antes de eles ocuparem suas posições finais. A emissão deve ocorrer, então, intermitentemente (há razões que parecem indicar isso), e Nicholson deveria considerar os átomos enquanto ainda contém energia tão grande que eles emitem luz no espectro visível. Depois, luz é emitida no ultravioleta até que toda energia que pode ser emitida seja perdida (BOHR, 1912, apud HOYER, 1981, p. 108, tradução livre).

Outra correspondência – uma carta endereçada a Rutherford, em 31 janeiro de 1913, três meses antes da publicação da trilogia – deixa evidente o interesse de Bohr pelos estudos de Nicholson sobre os espectros das nebulosas planetárias e a coroa solar. Nesta carta, ele comenta as diferenças entre a sua teoria e a de Nicholson:

Agora, está muito claro para mim, sobre os fundamentos das minhas considerações, e eu penso que entendo melhor agora a relação e a diferença entre meus cálculos e os cálculos como aqueles publicados em artigos recentes de Nicholson, sobre os espectros das nebulosas estelares e a coroa solar. [...] Em seus cálculos, Nicholson lida, como eu, com sistemas de mesma constituição, como seu modelo atômico; e ao determinar as dimensões e a energia dos sistemas, ele, como eu, busca uma fundamentação na relação entre a energia e a frequência sugerida pela teoria da radiação de Planck... (BOHR, 1913, apud HOYER, 1981, p. 108-109, tradução livre).

Bohr descreve nesta correspondência que a diferença entre a teoria de Nicholson e sua própria é que Nicholson preocupava-se “essencialmente com os espectros e a formação dos átomos, e sua própria teoria sobre o estado permanente dos átomos” (KRAGH, 2012, p. 56). Apesar desse fato, nesta mesma carta enviada a Rutherford no final de janeiro, Bohr deixa claro que até aquele momento ele não relaciona o seu modelo com os estudos das linhas espectrais, “Eu não lido com a questão do cálculo das frequências correspondentes as linhas no espectro visível” (KRAGH, 2012, p. 56). O que pode ter feito Bohr mudar de ideia e inserir os estudos dos espectros em seu modelo? Provavelmente a leitura dos trabalhos de Nicholson, como já vimos, relacionava os espectros de linha com a estrutura da matéria, a partir de 1911, dois anos antes da publicação da trilogia de Bohr. Em seus estudos, Nicholson interpretou as riscas espectrais presentes nas nebulosas estelares e na coroa solar utilizando um modelo planetário para o átomo (LOPES, 2009).

Desse modo, até o final de 1912, e possivelmente até 31 de janeiro de 1913, a teoria de Bohr abordava questões sobre a estrutura dos átomos, as leis periódicas e da formação das

moléculas; entretanto, faltava uma base empírica, o que só aconteceu após a sua decisão de utilizar os espectros elementares (LOPES; MARTINS, R., 2007). Isso parece ter ocorrido, em 1913, quando Bohr voltou para Copenhague e começou a trabalhar sobre os problemas ópticos, depois da carta enviada para Rutherford em 31 de janeiro daquele ano. Uma das suas indagações era tentar explicar, à luz de sua teoria, a regularidade dos espectros (PENNA, 2009) e, por conta disso, ele apresentou a principal sustentação experimental de sua teoria, os espectros de linha. Como um modelo atômico poderia explicar as linhas bem definidas no anteparo (Fig. 2), se a matéria fosse contínua, como o átomo de Thomson de 1904? Bohr viria a utilizar os estudos sobre os espectros de emissão do hidrogênio como comprovação experimental de suas hipóteses, na parte I da trilogia (LOPES, 2009). Portanto, os trabalhos de Nicholson parecem ter sido fundamentais na construção da base empírica que Bohr procurava, uma vez que, no primeiro artigo da trilogia, ele enfatizou os estudos sobre os espectros de linha.

Além disso, nessa época em que Bohr escrevia o primeiro artigo, ele também se interessou pelas fórmulas empíricas, influenciado por seu colega dinamarquês Hans Marius Hansen (1886-1956), que trabalhava na época com espectroscopia (HOYER, 1981). Sendo assim, após ter conhecimento sobre os trabalhos acerca das riscas espectrais de Hansen (Rydberg, Balmer, dentre outros) e sobre as articulações entre os modelos atômicos e a espectroscopia, provavelmente a partir da leitura dos artigos de Nicholson sobre o tema, Bohr acabou incluindo as séries espectrais em sua teoria atômica, desenvolvidas no final do século XIX e começo do XX.

Em uma carta enviada para Rutherford, em 6 de março de 1913, cerca de 34 dias após a carta de 31 de janeiro em que dizia não ter incorporado linhas espectrais em suas considerações, Bohr já comenta sobre os estudos dos espectros em sua teoria de constituição de átomos e moléculas:

Anexei o primeiro capítulo do meu artigo sobre a constituição dos átomos. Espero que os próximos capítulos sejam seguidos em algumas semanas. No último momento, tive um bom progresso no meu trabalho e espero ter conseguido ampliar as considerações sobre vários fenômenos diferentes, tais como emissão de espectros de linha, magnetismo e possivelmente uma indicação de uma teoria da constituição de estruturas cristalinas. [...] Como você verá, o primeiro capítulo trata principalmente do problema da emissão dos espectros de linha... (BOHR, 1913, apud HOYER, 1981, p. 111-112, tradução livre, grifos nossos).

Rutherford lia os trabalhos de Bohr e também o auxiliava no inglês, pois Niels tinha dificuldade com este idioma (HEILBRON; KUHN, 1969). Rutherford interessou-se pela teoria de Bohr sobre a origem das linhas espectrais do átomo de hidrogênio; contudo, ele achava difícil explicar a articulação entre a teoria de Planck e as ideias da mecânica clássica (HOYER, 1981). Além desse fato, Rutherford considerava o artigo da trilogia muito longo, pois

Bohr acabava repetindo algumas declarações. Na época, Rutherford era editor da revista na qual Bohr queria publicar a sua trilogia, a *Philosophical Magazine* (HOYER, 1981). Mesmo assim, Rutherford escreveu que ficaria feliz em publicar o artigo de Bohr quando este fosse um pouco reduzido, e comprometeu-se a corrigir os erros de língua inglesa, caso fosse necessário.

Bohr, no decorrer da primeira parte de sua trilogia, aponta problemas nos cálculos de Nicholson para fundamentar a teoria dele. Ele destaca que “a teoria [de Nicholson] não conseguia explicar coerentemente as séries espectrais de Balmer e Rydberg, que relacionavam as frequências das linhas nos espectros de linhas dos elementos comuns” (BOHR, 1913a, p. 7). Essa fórmula de Balmer descrevia de forma correta as relações entre os comprimentos de onda correspondentes às linhas que apareciam no espectro do hidrogênio (FILGUEIRAS, 1996). Apesar de Bohr ter dito em correspondências anteriores que não utilizaria os estudos da espectroscopia em seu modelo, ele comenta com seu assistente León Rosenfeld (1904-1974), anos mais tarde, sobre a importância dos trabalhos de Balmer em sua teoria “Assim que vi a fórmula de Balmer, tudo se tornou inteiramente claro para mim” (HOYER, 1981, p. 110).

Apesar do ponto de partida de Bohr ter sido diferente dos estudos de Nicholson, ao relacionar a constante de Planck com sua teoria atômica, Bohr passou a considerar a constância do momento angular dos elétrons como hipótese principal (LOPES; MARTINS, R., 2007), como já havia sido proposto por Nicholson. A partir dos artigos de Bohr e das suas cartas trocadas com outros cientistas, Lopes (2009) propõe uma das diferenças entre o que já havia sido feito por Nicholson e a proposta de Bohr: os cálculos da emissão da energia no modelo de Bohr eram consistentes com a previsão matemática das séries espectrais (Balmer, Rydberg, Paschen, dentre outros).

Para Bohr, a órbita do elétron nos estados estacionários era circular e, nesse sistema formado por um único elétron girando ao redor do núcleo, o estado é determinado pela condição do seu momento angular ser igual a $h/2\pi$ (BOHR, 1913a). Utilizando a ideia de quantização, Bohr relacionou o momento angular orbital com a constante de Planck h , dividida por 2π , assim obtendo a energia para cada elétron ir de um estado estacionário para outro, sendo apenas valores múltiplos inteiros de $h/2\pi$. Desse modo, Bohr foi capaz de expandir a sua teoria e incluir os chamados estados estacionários dos níveis de energia (HEILBRON, 1981).

De acordo com a teoria de Bohr de 1913, a formação das linhas de emissão nos espectros descontínuos do gás hidrogênio, quando exposto a uma fonte de radiação, ocorre porque os elétrons recebem energia do “*quantum* de ação” (pacote de energia), em diferentes frequências e transitam entre os níveis de energia, assim passando a ocupar diferentes estados excitados. De acordo com o modelo de Bohr, a ocupação desses estados excitados é momentânea, de ordem de $10^{-9}s$, logo retornando para o nível de energia de onde saiu (SILVA, 2013). Dessa forma, era possível explicar o porquê das linhas brilhantes e coloridas que estavam sendo observadas no espectro de emissão, com o auxílio dos espectroscópios no século XIX. Essas linhas são emitidas por meio da passagem entre dois estágios, um permanente-

mente estável (estado estacionário) e o outro como um estado em que o elétron apresenta uma instabilidade, no momento em que muda de um estado estacionário para outro. É importante salientar que a explicação dos espectros de emissão do hidrogênio não era um dos objetivos de Bohr ao elaborar a sua teoria. Mas, deve-se destacar que, ao incorporar os estudos das séries espectrais em seu modelo, ele adiantou-se em relação à visão empírica, prevendo novas séries espectrais no espectro do hidrogênio (SILVEIRA; PEDUZZI, 2006). Por um lado, seu modelo obteve uma maior fundamentação com o uso das formulas matemáticas que descreviam os resultados experimentais; por outro, esses resultados empíricos passaram a ser fundamentados por uma teoria. A partir da teoria de Bohr, foi possível explicar o porquê do aparecimento das linhas brilhantes e escuras nos espectros dos elementos químicos, observadas nos espectroscópios de Bunsen e Kirchhoff.

No final do terceiro artigo da trilogia, Bohr resume a sua teoria em cinco pressupostos iniciais, que caracterizaram as suas ideias sobre o seu modelo nuclear, o que hoje conhecemos como Postulados de Bohr:

- 1. Que a energia não é emitida (ou absorvida) da maneira contínua adotada na eletrodinâmica comum, mas somente durante a passagem dos sistemas de um estado "estacionário" para outro diferente;*
- 2. Que o equilíbrio dinâmico dos sistemas nos estados estacionários é governado pelas leis ordinárias da mecânica, enquanto estas leis não são válidas nas transições dos sistemas entre diferentes estados estacionários;*
- 3. Que é homogênea a radiação emitida durante a transição de um estado estacionário para outro, e que a relação entre a frequência ν e a quantidade total de energia emitida é dada por $E=h\nu$, sendo h a constante de Planck;*
- 4. Que os diferentes estados estacionários de um sistema simples, consistindo por um elétron que gira em torno de um núcleo positivo, são determinados pela condição de ser igual a um múltiplo inteiro de $h/2$ a razão entre a energia total emitida durante a formação da configuração e a frequência de revolução do elétron. Admitindo que a órbita do elétron é circular, essa hipótese equivale a supor que o momento angular do elétron em torno do núcleo é igual a um múltiplo inteiro de $h/2\pi$;*
- 5. Que o estado "permanente" de qualquer sistema atômico – isto é, o estado em que a energia emitida é máxima – é determinado pela condição de ser igual a $h/2\pi$ e o momento angular de cada elétron em torno do centro da sua órbita (BOHR, 1913c, p. 874-875, tradução livre).*

Os postulados de Bohr buscavam responder aos problemas dos novos modelos sobre a constituição da matéria, publicados no final do século XIX e início do século XX. Poucos tentavam relacionar seus modelos com as linhas espectrais. O postulado (1) estabelece que a energia não é emitida ou absorvida de maneira contínua e que, nesses estados "estacionários", ela obedece às leis da física clássica. Apesar de Bohr considerar limites da mecânica clássica

para explicar a constituição da matéria, ele utiliza a equação da energia cinética para calcular os estados estacionários do átomo.

Já o postulado (2) refere-se à passagem do átomo de um estado estacionário para outro, quando o elétron deveria emitir (perder) ou absorver (ganhar) um determinado valor de energia, na forma do *quantum* elementar de ação (SILVA, 2013); a frequência definida não seria igual à do movimento do elétron (SCHMIDT, 2008). Os postulados (2) e (3) foram apresentados por Bohr como possível solução dos problemas que ele considerava não resolvidos por Nicholson: “na tentativa de mostrar que as dificuldades em questão desaparecem se considerarmos os problemas do ponto de vista tomado neste artigo...” (BOHR, 1913a, p. 7).

Os argumentos utilizados por Bohr para explicar os espectros de emissão do hidrogênio foram propostos a partir da dedução de que a energia E do elétron nas órbitas estacionárias para o átomo de hidrogênio é dada por (SCHMIDT, 2008):

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

Onde m é a massa do elétron, e é a carga do elétron, h é a constante de Planck e n é um número inteiro ($n = 1, 2, 3, \dots$). Ao passar de uma órbita estacionária ao número inteiro n_1 para outra correspondente ao número n_2 o elétron tem uma variação de energia dada por (SCHMIDT, 2008):

$$E_2 - E_1 = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

Segundo Bohr, “se supusermos agora que a radiação em questão é homogênea, e que a quantidade de energia emitida é igual a $h\nu$, sendo ν a frequência da radiação, obtemos” (BOHR, 1913a, p. 8), então:

$$E_2 - E_1 = h\nu$$

Essa variação de energia determina a frequência da radiação emitida ou absorvida. Assim, Bohr admitiu que os elétrons giravam em torno do núcleo, como no modelo de Rutherford, mas não emitiam energia continuamente; portanto, não iriam aproximar-se do núcleo até cair nele (GUERRA; BRAGA; REIS, 2005). Ainda, esse elétron só mudaria de órbita se emitisse ou absorvesse energia (radiação), de forma a satisfazer a equação de Planck (postulado 3). A partir disso, a frequência da radiação é dada por (BOHR, 1913a):

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

Para Bohr, se usarmos essa expressão é possível explicar as linhas espectrais do espectro do hidrogênio (BOHR, 1913a). De acordo com ele, se colocarmos $n_2 = 2$ e deixarmos n_1 variando, obtemos o valor da série de Balmer na região do visível (BOHR, 1913a). Se considerarmos $n_2 = 3$, obtemos a série do hidrogênio no ultravioleta que foi elaborada por Paschen e, de acordo Bohr (1913a), essa série foi anteriormente pressuposta por Walter Ritz.

Além disso, se colocarmos $n_2 = 4, 5, \dots$, obtemos, respectivamente, as séries no ultravioleta e no infravermelho que apesar de não poderem ser observadas, são esperadas (BOHR, 1913a).

Portanto, utilizando o modelo atômico proposto por Bohr para o átomo do hidrogênio, foi possível explicar teoricamente a posição das linhas espectrais, validando os valores obtidos por meio das relações matemáticas que foram desenvolvidas no final do século XIX e início do século XX. A partir do modelo teórico de Bohr foi possível representar as principais linhas do espectro do hidrogênio no visível; além disso, Bohr também transformou a constante empírica de Rydberg em uma constante com uma base física (KRAGH, 2012).

Finalmente, os postulados (4) e (5) dizem respeito à quantização do momento angular, pois “o postulado (4) determinava as características (raio e energia) das órbitas estacionárias dos elétrons, nas quais ocorreria a emissão de energia, ao contrário do que era previsto pela teoria eletromagnética” (SCHMIDT, 2008, p. 15). É importante salientar que a quantização do momento angular já havia sido proposta por Nicholson em seu modelo atômico, antes da teoria de Bohr. Deste modo, a determinação das órbitas possíveis para o elétron em torno do núcleo do átomo envolve a quantização do momento angular (BASSO; PEDUZZI, 2003).

Na organização de sua trilogia, Bohr começa a expor as suas ideias para o espectro descontínuo do hidrogênio, na parte I, articulando esse conceito com os estudos de Planck, incluídos por último. As partes II e III são referentes ao período em que Bohr permaneceu na Inglaterra, nos laboratórios dirigidos por Thomson e Rutherford (LOPES, 2009). Tudo indica, portanto, que a ordem de apresentação de suas conclusões é inversa àquela da realização de seus estudos. Observando os conteúdos do cartão de natal enviado a Harald, em 1912, e a carta para Rutherford em 31 de janeiro de 1913, vemos que os estudos dos espectros foram inseridos “no último momento” (HOYER, 1981).

Apesar dos avanços que proporcionou ao estudo da constituição da matéria, a teoria de Bohr parece conservadora, já que considera que o equilíbrio dinâmico nos estados estacionários é determinado pelas leis da mecânica clássica, e toma como base as explicações clássicas, nas partes II e III. Ela representa um triunfo inicial, ao articular no seu modelo às recentes teorias da época sobre a energia ser descontínua e, com isso, conseguir solucionar o problema da instabilidade nuclear e os espectros de emissão do hidrogênio. Heilbron (1981) considera paradoxal que Bohr utilize a mecânica clássica, mesmo reconhecendo que ela não era suficiente para fundamentar um modelo consistente de constituição da matéria. Segundo Kragh (2010), isso não quer dizer que o modelo atômico de Bohr não tenha contribuído para a física; ao contrário, foi a primeira teoria bem-sucedida sobre a estrutura da matéria do começo do século XX.

III.5 A Recepção da comunidade científica ao modelo de Bohr

Os documentos históricos sugerem um impacto significativo da publicação da trilogia sobre a constituição de átomos e moléculas, visto que, após sua publicação, muitos artigos

discutiram as propostas de Bohr (MOURA, C., 2014). Além disso, houve tentativas de confirmar a sua teoria por meio de experimentos. Um desses trabalhos foi o de Henry Moseley (1887-1915), que fez medições experimentais do comprimento de onda de espectros de raios X de vários metais e utilizou seus resultados para dar sustentação à teoria de Bohr (LOPES, 2009). No entanto, esta relação não estava clara e recebeu críticas do físico britânico Frederick Lindemann (1886-1957) e de Nicholson.

Dentre outros cientistas que apoiaram as ideias apresentadas por Bohr estavam Rutherford, Carl W. Ossen, o físico-químico húngaro George Hevesy, Hantaro Nagaoka, do físico alemão Arnold Sommerfeld (1868-1951), Antonius van den Broek (1870-1926), dentre outros na Alemanha, Holanda, Inglaterra e Itália (LOPES, 2009).

A primeira apresentação do modelo atômico de Bohr ocorreu em uma reunião da “*British Association for the Advancement of Science*”, em meados de 1913 (PENNA, 2009). Publicamente, Bohr recebeu apoio de James Jeans (1877-1946), no *Times* de Londres de 1 de setembro de 1913: “[...] O Dr. Bohr conseguiu uma explicação engenhosíssima e sugestiva das leis das riscas espectrais” (HOYER, 1981, p. 124).

Hantaro Nagaoka, que abandonou o seu modelo saturniano em 1908, por causa da instabilidade atômica e também por outros fatores, pronunciou-se sobre os estudos da instabilidade dos sistemas atômicos, em 27 de dezembro de 1913: “Agradeço por ter me enviado vários trabalhos seus sobre a estrutura atômica; parece estar intimamente ligado com o átomo saturniano que estudei há cerca de 10 anos” (HOYER, 1981, p. 127). A primeira reação de fora do círculo de Rutherford veio do físico alemão Arnold Sommerfeld:

Agradeço-lhe muito por me enviar o seu artigo, achei muito interessante, o que já havia lido no Phil. Mag. O problema de expressar a constante de Rydberg-Ritz pela constante de Planck h , permaneceu por muito tempo em minha mente. Alguns anos atrás, eu disse a Debye sobre isso. Embora, por enquanto, eu ainda seja bastante cético quanto aos modelos atômicos em geral, o cálculo dessa constante é, sem dúvida, um grande feito (SOMMERFELD, 1913 apud HOYER, 1981, p. 123, tradução livre).

Apesar da atmosfera favorável e da atitude indecisa mostrada por alguns representantes da física clássica, como Lord Rayleigh (1842-1919), a teoria de Bohr ainda estava sujeita a alguma controvérsia. Thomson colocou-se de forma contrária quanto às ideias apresentadas por Bohr, dizendo que a sugestão feita por ele era sem valor (HOYER, 1981). Segundo o filho de Thomson, George Thomson, seu pai foi um dos maiores opositores ao modelo proposto por Bohr (LOPES, 2009). Essa posição de Thomson pode estar associada ao fato de que o modelo atômico de Bohr passou a ser mais reconhecido e discutido pela comunidade científica, frente ao modelo proposto por ele, em 1904 (KRAGH, 2012).

As principais críticas ao modelo proposto por Bohr partiram de Nicholson em suas publicações nas revistas: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *Philosophical Magazine* e na *Nature* (LOPES, 2009). Quando Nicholson aprofundou as discussões sobre os

espectros do hidrogênio e hélio, também passou a dialogar com o modelo de constituição de átomos e moléculas de Bohr, de 1913, produzindo algumas críticas a essa teoria. De acordo com Lopes (2009), os debates entre Bohr e Nicholson duraram cerca de dois anos, na revista *Nature*.

III.6 Limitações do modelo proposto por Bohr

Apesar de resolver alguns problemas experimentais da época, o modelo teórico proposto por Bohr tinha algumas limitações. Além disso, a intenção de Bohr era ter um novo quadro para a física e a química atômica e molecular; entretanto, essa última foi menos bem-sucedida e seu modelo acabou não sendo reconhecido pela maioria dos químicos (KRAGH, 2013a), apesar de seu reconhecimento sobre as explicações dos espectros descontínuos.

Uma das limitações presente nessa teoria era que esta não representava muitas linhas espectrais na série de Balmer (as chamadas linhas de estrutura fina). Além do mais, essa teoria também não obteve bons resultados ao explicar os átomos de mais de um elétron, como o caso do átomo de hélio (KRAGH, 2012). Por causa das suas limitações a teoria de Bohr foi gradativamente sendo aperfeiçoada por ele próprio e por outros pesquisadores (SCHMIDT, 2008).

Outro ponto a ser observado é que essa teoria sobre a constituição de átomos e moléculas não parecia estar de acordo com as observações experimentais do astrônomo inglês Alfred Fowler, referentes aos espectros estelares e dos tubos de descarga elétrica contendo uma mistura de hidrogênio e hélio (LOPES, 2009). O próprio Fowler objetou que os comprimentos de onda teóricos obtidos por Bohr para o hidrogênio e os íons de hélio não concordaram precisamente com os encontrados de forma experimental (KRAGH, 2013b). Esse tema foi motivo de debate entre esses cientistas na revista *Nature*, e cada um apresentou seus argumentos sobre as linhas observadas experimentalmente nos tubos de descarga. De acordo com Bohr, feitos os devidos ajustes, a sua teoria sobre a constituição de átomos e moléculas seria capaz de explicar os espectros de emissão de elementos químicos com maior número de elétrons (BOHR, 1913b). Isso pode ser observado na segunda parte da trilogia, ele projeta modelos dos átomos mais pesados, imaginando-os como sistemas planos de elétrons girando em torno do núcleo (KRAGH, 2013b). Isto foi motivo de debate entre Bohr e Nicholson, pois Nicholson rebatia veemente esse fato (LOPES, 2009).

Entre 1914 e 1915, Sommerfeld começou a generalizar a teoria de Bohr e fez algumas correções, e propôs uma alternativa para resolver algumas inconsistências presentes no modelo, como é o caso das órbitas que passaram a ser elípticas (GUERRA; BRAGA; REIS, 2005). A proposição de que as órbitas seriam elípticas já havia sido feita por Nicholson anteriormente (LOPES, 2009). Já em 1916, além disso, Sommerfeld também introduziu o uso da dinâmica relativística na análise dos movimentos dos elétrons (SCHMIDT, 2008). O modelo de Bohr ainda sofreu mais alguns acréscimos pelo físico Wolfgang Pauli (1900-1958), que

introduziu um quarto número quântico (o spin) aos três já existentes¹¹, na tentativa de solucionar os problemas que ainda restavam no modelo atômico de Bohr-Sommerfeld (GUERRA; BRAGA; REIS, 2005). Com esses ajustes, entre 1918 e 1920, o modelo proposto por Bohr, com as modificações introduzidas por Sommerfeld e outros cientistas, tornou-se amplamente aceito pela comunidade científica (KRAGH, 2012).

Na história inicial do problema da estrutura atômica, a primeira grande ruptura não ocorreu com Rutherford ou mesmo com Bohr, que trabalhavam ao redor do programa da escola de Thomson, mas no início dos anos vinte, quando uma nova geração preferiu refazer o modelo ao invés de reparar a física clássica (HEILBRON, 1981). Tanto na história da ciência, quanto na história geral, a Primeira Guerra Mundial foi uma linha divisória entre os séculos XIX e XX. No decorrer desta, a teoria de Bohr desenvolveu-se com rapidez, em especial por conta da ausência de concorrentes naturais (HEILBRON, 1981). Segundo Heilbron (1981), após a Primeira Guerra, o átomo de Bohr tornou-se o veículo da revolução nas mãos de alguns jovens que avançaram abandonando a abordagem clássica utilizada nos modelos anteriores, como foi o caso de Werner Heisenberg (1901-1976), Max Born (1882-1970), Wolfgang Pauli, Louis de Broglie (1892-1987), Pascual Jordan (1902-1980), Paul Dirac (1902-1984), Erwin Schrodinger (1887-1961), dentre outros cientistas (GUERRA; BRAGA; REIS, 2005).

Algumas investigações podem nos ajudar a ter uma compreensão mais ampla sobre esse episódio, principalmente acerca de aspectos não epistêmicos que influenciam o desenvolvimento da ciência. Podemos começar investigando um pouco mais sobre a vida e obra de Nagaoka, Nicholson, Thomson, Rutherford e Bohr. Iniciando a partir de alguns trabalhos, por exemplo, Lopes (2009); Lopes e Martins, R. (2007; 2009); Moura, C. (2014); Moura, C. e Guerra (2016); Peduzzi (2015) e Penna (2009) podemos responder a alguns questionamentos: qual o seu contexto de vida? Quais contribuições deram à ciência, além das mencionadas aqui? Se compararmos o capital científico desses cientistas, poderíamos compreender mais razões pelo fato de umas teorias serem mais apoiadas que outras pela comunidade, por exemplo, quanto aos modelos de Nagaoka e Thomson, ambos publicados no mesmo número da *Philosophical Magazine*, em 1904? E quanto ao fato de Nicholson ter publicado anteriormente seu modelo de constituição da matéria, fundamentado pelos estudos da espectroscopia e de Planck, antes de Bohr, e mesmo assim ter tido menos impacto junto à comunidade científica?

Que curso teria seguido a história se todos os ajustes tivessem sido feitos a partir do modelo de Nicholson, que inclusive já adotava orbitas elípticas? Que razões tornaram o modelo de Bohr tão difundido e o modelo de Nicholson ter sido esquecido e esse personagem sequer ser mencionado em materiais didáticos? O que teria ocorrido se Bohr tivesse permanecido em Cambridge e aperfeiçoado o modelo de Thomson? Quais motivos teriam levado Ru-

¹¹ Sob o ponto de vista da teoria quântica a energia total do movimento de uma partícula em órbita elíptica depende do “número quântico principal”, n , onde a razão entre os semieixos da elipse também é quantizada, dada por n/k , sendo k o “número quântico azimutal”. Já o “número quântico magnético”, m , está associado ao ângulo formado entre o campo magnético e o plano da órbita do elétron (SCHMIDT, 2008, p. 18). Esses números quânticos já haviam sido introduzidos antes de Wolfgang Pauli.

therford a oferecer tanto apoio a Bohr, inclusive ajudando-o com a revisão da língua inglesa, para a publicação de seus artigos, na revista em que o próprio Rutherford era o editor? Essas são provocações que deixamos para a reflexão do leitor, mostrando que aspectos pessoais e extra científicos também influenciam no desenvolvimento da ciência.

IV. Algumas considerações

Além de incentivar uma proposta formativa sobre os usos da HC no ensino, esse texto histórico almejou proporcionar alguns subsídios para que o docente formador de professores possa promover reflexões críticas acerca do desenvolvimento da física do século XX, assim como tratar conceitos de física e química de modo contextualizado. Essa narrativa histórica, aqui apresentada, permitiu exemplificar alguns aspectos epistêmicos e não epistêmicos do episódio. Entretanto, vale lembrar que qualquer episódio histórico é influenciado por um enorme número de fatores (científico, social, econômico, político, dentre outros), e o recorte envolvendo o modelo atômico de Niels Bohr, de 1913, não foge à regra. Há muitos outros elementos que podem ser pesquisados e apresentados em forma de seminário pelos licenciandos, por exemplo, motivando frutíferas discussões, ilustrando as questões que pontuamos ao final da narrativa histórica.

Nesta investigação, agrupamos as contribuições em três linhas de pensamento: os estudos da espectroscopia; alguns modelos atômicos; e o resultado de Planck a partir dos estudos da radiação do corpo negro. Os estudos de Bohr ofereceram um modelo para o átomo e uma fundamentação teórica para as linhas espectrais observadas, evidenciando as contribuições de Bohr para a espectroscopia.

Como pudemos observar, a teoria de Bohr, apesar de apresentar problemas e limitações, e ter alguma de suas bases na eletrodinâmica clássica, tornou-se o referencial inicial de um átomo quantizado, ao introduzir as ideias de Planck em seu modelo, para o estabelecimento da mecânica quântica nos anos seguintes (LOPES, 2009). Além do mais, adiantou-se em relação à visão empírica, prevendo novas séries espectrais no espectro do hidrogênio.

As inúmeras influências, percalços, personagens, mudanças, incorporações, críticas, debates e controvérsias presentes nesse pequeno recorte para a história dos modelos atômicos mostra-nos o quanto é simplista e tendenciosa a versão dessa história presente em materiais didáticos. Importa permanecermos atentos para as mesmas distorções, possivelmente presentes em outros temas da história das ciências.

Referências bibliográficas

ACEVEDO-DÍAZ, J. A.; GARCÍA-CARMONA, A. Algo antiguo, algo nuevo, algo prestado. Tendencias sobre la naturaleza de la ciencia en la educación científica. **Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias**, v. 13, n. 1, p. 3-19, 2016.

ALFONSO-GOLDFARB, A. M. Alguns apontamentos sobre a Historiografia em história da Ciência. In: MARTINS, A. M. (Org.). **O tempo e o Cotidiano na história**. São Paulo: Fundação para o desenvolvimento da Educação, 1993. p. 79-87.

ALFONSO-GOLDFARB, A. M.; BELTRAN, M. H. R. (Orgs.). **Escrevendo a história da ciência: tendências, propostas e discussões historiográficas**. São Paulo: Livraria da Física; EDUC; FAPESP, 2004.

BAGDONAS, A.; ROZENTALSKI, E.; POLATI, F. Controversial aspects of the construct NOS in the Ibero-American Science Education journals: a literature review. In: IHPST 13TH BIENNIAL INTERNATIONAL CONFERENCE, 13, 2015, Rio de Janeiro. **Proceedings...**

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, 2003, Bauru. **Atas...**

BOHR, N. H. D. On the constitution of atoms and molecules: part. I. **Philosophical Magazine**, v. 6, n. 26, p. 1-25, jul. 1913a.

BOHR, N. H. D. On the constitution of atoms and molecules: part. II – Systems containing only a single nucleus. **Philosophical Magazine**, v. 6, n. 26, p. 476-502, set. 1913b.

BOHR, N. H. D. On the constitution of atoms and molecules: part. III – Systems containing several nuclei. **Philosophical Magazine**, v. 6, n. 26, p. 857-875, nov. 1913c.

DEKOSKY, R. K. Spectroscopy and the Elements in the Late Nineteenth Century: The Work of Sir William Crookes. **The British Journal for the History of Science**, v. 6, n. 4, p. 400-423, dez. 1973

FILGUEIRAS, C. A. L. A Espectroscopia e a Química: da descoberta de novos elementos ao limiar da Teoria Quântica. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 3, p. 22-25, 1996.

FIOLHAIS, M.; RUIVO, M. C. O modelo atômico saturniano de Nagaoka. **Gazeta de Física**, v. 19, fasc. 1, 1996.

FORATO, T. C. M. **A Natureza da Ciência como saber escolar: Um estudo de caso a partir da História da Luz**. 2009. 220f. v. 1. Tese (Doutorado em Educação – Ensino de Ciências e Matemática) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo.

FORATO, T. C. M.; BAGDONAS, A.; TESTONI, L. A. Episódios Históricos e Natureza das Ciências na Formação de Professores. **Ensenanza de Las Ciencias**. v. extra, p. 3511-3516, issn: 0212-4521, 2017.

GUERRA, A.; BRAGA, M.; REIS, J. C. **Bohr e a interpretação quântica da natureza**. São Paulo: Atual, 2005.

- HEILBRON, J. L. 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.
- HEILBRON, J. L.; KUHN, T. The genesis of the Bohr Atom. **Historical Studies in the Physical Sciences**, v. 1, p. 211-290, 1969.
- HÖTTECKE, D.; SILVA, C. C. Why implementing history and philosophy in school science education is a challenge: An analysis of obstacles. **Science & Education**, v. 20, n. 3-4, p. 293-316, 2011.
- HOYER, U. Introduction. In: ROSENFELD, L.; HOYER, U. (Org). Niels Bohr Collected Works. v. 2. Work on Atomic Physics (1912–1917), 1981.
- JARDIM, W.; GUERRA, A. O artigo República das Letras, Academias e Sociedades Científicas no século XVIII: a garrafa de Leiden e a ciência no ensino. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, p. 774-797, 2017.
- KOEHLER, C. B. G. Cambridge, o dinamismo e os modelos de Thomson e Maxwell. **Revista Brasileira de História da Ciência**, n. 13, p. 23-32, 1995.
- KRAGH, H. **An introduction to the historiography of Science**. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- KRAGH, H. **Before Bohr**: Theories of atomic structure 1850-1913. RePoSS: Research Publications on Science Studies 10. Aarhus: Centre for Science Studies, University of Aarhus. 2010.
- KRAGH, H. **Niels Bohr and the quantum atom**: the Bohr model of atomic structure 1913-1925. Oxford U. P., Oxford, UK, p. 416, 2012.
- KRAGH, H. Niels Bohr between physics and chemistry. **Physics Today**, v. 66, n. 5, p. 36-41, may. 2013a.
- KRAGH, H. **The Making of the Chemist**: The Social History of Chemistry in Europe, 1789-1914. Cambridge University Press, 1998.
- KRAGH, H. The many faces of the Bohr atom. **History and Philosophy of Physics**, v. 1, set. 2013b.
- LEITE, D. O.; PRADO, R. J. Espectroscopia no infravermelho: uma apresentação para o ensino médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, n. 2, 2504, 2012.

LOPES, C. V. M. **Modelos atômicos no início do século XX**: da física clássica à introdução da teoria quântica. 2009. 185f. Tese (Doutorado em História da Ciência). Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP), São Paulo.

LOPES, C. V. M.; MARTINS, R. A. Uma lacuna na história dos modelos atômicos em livros didáticos: John William Nicholson e a astroquímica. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, VI, 2007, Florianópolis. **Atas...**

LOPES, C. V. M.; MARTINS, R. A. J. J. Thomson e o uso de analogias para explicar os modelos atômicos: o “podim de passas” nos livros texto. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, VII, 2009, Florianópolis. **Atas...**

MARQUES, D. M.; CALUZI, J. J. A visão kuhniana da ciência e a descoberta do núcleo atômico. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, XVI, 2004, Rio de Janeiro. **Atas...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 2005.

MARTINS, A. F. P. História e filosofia da ciência no ensino: há muitas pedras nesse caminho. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 24, n.1, p.112-131, 2007.

MARTINS, A. F. P. Natureza da Ciência no ensino de ciências: uma proposta baseada em “temas” e “questões”. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, n. 3, p. 703-737, 2015.

MARTINS, L. A. P. História da Ciência: objetos, métodos e problemas. **Ciência e Educação**, São Paulo, v. 11, n. 2, p. 305-317, 2005.

MARTINS, R. A. Como não escrever sobre história da física – um manifesto historiográfico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, p. 113-129, 2001.

MARTINS, R. A. Do éter ao vácuo e de volta ao éter. **Scientific American**, Os Grandes Erros da Ciência, Especial História, v. 6, p. 92-98, 2006.

MARTINS, R. A. Seria possível uma história da ciência totalmente neutra, sem qualquer aspecto whig? **Boletim da História e Filosofia da Biologia**, v. 4, n. 3, p. 4-7, set. 2010. Disponível em: <<http://www.abfnib.org/Boletim/Boletim-HFB-04-n3-Set-2009.pdf>> Acesso em: 09 jan. 2018.

MARTORANO, S. A. A.; MARCONDES, M. E. R. A história e a filosofia da química no ensino de química: uma proposta para o ensino de cinética química. In: SANTANA, E. M.; LOPES, E. S. (Orgs). **Tópicos em Ensino de Química**. 1. ed. São Carlos: Pedro & João Editores, 2014. p. 89-138.

McCORMMACH, R. The atomic theory of John William Nicholson. **Archive for History of Exact Science**, v. 3, p. 161-184, 1966.

MOURA, B. A. **Formação crítico-transformadora de professores de Física: uma proposta a partir da História da Ciência**. 2012. 309f. Tese (Doutor em Educação) – Faculdade de Educação, Instituto de Física, Instituto de Química, Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MOURA, C. B. **Discutindo a natureza da ciência no ensino médio: um caminho a partir do desenvolvimento dos modelos atômicos**. 2014. 223f. Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia e Educação) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET, Rio de Janeiro.

MOURA, C. B.; GUERRA, A. Reflexões sobre o processo de construção da ciência na disciplina de química: um estudo de caso a partir da história dos modelos atômicos. **Revista Eletrônica de Investigación en educación en ciencias**, v. 11, n. 2, p. 64-77, dez. 2016.

NEWTON, I. **Mathematical principles of natural philosophy**. Optics. Trad. A. Motte. 2.ed. Chicago, Encyclopaedia Britannica, 1952. (Col. Great Books of Western World, v. 34).

NICHOLSON, J. W. A structural theory of the chemical elements. **Philosophical Magazine**, v. 6, n. 22, p. 864-889, dez. 1911.

OLIVEIRA, W. C.; DRUMMOND, J. M. HIDALGO F. Refletindo sobre desafios à inserção didática da História e Filosofia da Ciência em oficina de formação docente. **Alexandria**, v. 8, p. 151-179, 2015.

PEDUZZI, L. O. Q. **Do átomo grego ao átomo de Bohr**. 2015. 214 p. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/20936837/do-atomo-grego-ao-atomo-de-bohr>>. Acesso em: 21 mai. 2017.

PENNA, M. **A investigação da estrutura da matéria no início do século XX: Niels Bohr e a busca de explicações para a estabilidade do átomo**. 2009. 63f. Dissertação (Mestre em História da Ciência) – Pontifícia Universidade Católica (PUC-SP), São Paulo.

PIETROCOLA, M.; POGIBIN, A.; ANDRADE, R.; ROMERO, T. R. **Coleção Física**. Conceitos e Contextos: Pessoal, Social Histórico. v. 2. Editora FTD, 2013.

PIROLO, M. **A contribuição de Robert Wilhelm Bunsen e Gustav Robert Kirchhoff para a espectroscopia do século XIX**. 2010. 97f. Dissertação (Mestrado em História da Ciência) – Pontifícia Universidade Católica (PUC-SP), São Paulo.

ROSCOE, H. E.; SCHUSTER, A. **Spectrum Analysis: Six Lectures**. Macmillan – The Society of Apothecaries of London, 1885.

ROSENFELD, L.; NIELSEN, J. R. (Org). **Niels Bohr collected works**. v. 1. Early Work, Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1972.

SCHMIDT, D. H. **Erwin Schrödinger**: a compreensão do mundo infinitesimal através de uma realidade ondulatória. 2008. 118f. Dissertação (Mestrado em História da Ciência) – Pontifícia Universidade Católica, São Paulo.

SCHMIEDECKE, W. G.; PORTO, P. A. Uma abordagem da história da energia nuclear para a formação de professores de física. **Revista Brasileira de História da Ciência**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 2, p. 232-241, 2014.

SILVA, H. R. A. **Física moderna no ensino médio**: a espectroscopia na gênese das modernas concepções de física e áreas afins. 223f. 2013. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro.

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

THOMSON, J. J. **Recollections and reflections**. New York: Macmillan, 1937.



Direito autoral e licença de uso: Este artigo está licenciado sob uma [Licença Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).