PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE SÃO PAULO
PUC-SP

Cesar Valmor Machado Lopes

Modelos atômicos no início do século XX:
da física clássica à introdução da teoria quântica

DOUTORADO EM HISTÓRIA DA CIÊNCIA

SÃO PAULO

2009

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE SÃO PAULO
PUC-SP

Cesar Valmor Machado Lopes

Modelos atômicos no início do século XX: da física clássica à introdução da teoria quântica

DOUTORADO EM HISTÓRIA DA CIÊNCIA

Tese apresentada à Banca Examinadora da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, como exigência parcial para obtenção do título de Doutor em História da Ciência sob a orientação da Profa. Doutora Lilian Al-Chueyr Pereira Martins.

SÃO PAULO
2009

Lopes, Cesar Valmor Machado

“Modelos atômicos no início do século XX:
da física clássica à introdução da teoria quântica”

São Paulo, 2009.
xi, 173 p.

Tese (Doutorado) – PUC – SP
Programa: História da Ciência
Orientadora: Profa. Dra. Lilian Al-Chueyr Pereira Martins

Banca Examinadora

_____

_____

_____

_____

_____

Autorizo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese por processos fotocopiadores ou eletrônicos.

Ass.: _____

Local e data: _____

Cesar Valmor Machado Lopes
Cesar.lopes@ufrgs.br

In Memoriam

Dela que não está mais aqui, mas está sempre presente em mim.

Dona Lola!

Aos Sobrinhos Daniel e João

que o mundo da ciência nunca seja uma trilha obscura.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Lilian por sua orientação, paciência e apoio em todos os momentos.

Ao prof. Roberto Martins que tornou esse trabalho possível através de sua inestimável contribuição nas trilhas da história do átomo.

Aos profs. José Luiz Goldfarb e Ana Maria Alfonso-Goldfarb pelas críticas e sugestões.

Aos meus profs. no Programa de História da Ciência da PUC-SP.

Ao prof. Harvey Brown pela acolhida na Universidade de Oxford.

À minha família - Ilietes, Neri e Fátima - obrigado pelo seu amor e incentivo.

À minha família - Cecília, Beto, Dilvo, Nair e Paulo - obrigado por existirem.

Ao Mestre Milagre que me contagiou com sua paixão pela História da Ciência.

Ao amigo Del Pino pelo apoio para chegar a este Programa.

Ao amor de Ed que me incentivou a começar esse doutorado.

Aos amigos Adriane, Márcia, Renata e Vandré que me acolheram e apoiaram em SP.

Às colegas Carla, Elaine, Cris Couto e Ana Paula que se tornaram amigas e parceiras nessa caminhada.

Aos meus colegas de curso que compartilharam alegrias e tristezas ao longo de 4 anos.

Aos amigos Ricardo, Simon e Luis Eduardo que me acolheram e garantiram minha sobrevivência na Inglaterra. (Thank you!)

Aos amigos Andrew e Luis Henrique pela boa companhia na Inglaterra. (Thank you!)

À Andreza pelas revisões e leituras finais dessa tese.

À amiga Rochele pelo carinho e pela leitura crítica.

Aos amigos Maira e Zé que me propiciaram a paz necessária para concluir essa tese.

Aos meus amigos Eunice, Heloisa, Nelton e Russel da FACED-UFRGS pelo carinho e boas vibrações nesses 4 anos afastado da Área de Ensino de Ciências.

Aos amigos (SP, BA, RS e UK) que vibraram e compartilharam comigo a caminhada.

À direção, chefias e colegas da FACED – UFRGS.

À Área de Educação Química da UFRGS.

À Capes e UFRGS pela concessão de bolsa de Doutorado (PICDT).

À Capes pela bolsa na Inglaterra (PDEE), apesar do atraso.

A todos nós brasileiros que garantimos a pesquisa científica nesse país.

RESUMO

Esta pesquisa analisa a história dos modelos atômicos no início do século XX a partir das contribuições de Joseph John Thomson, Hantaro Nagaoka, Ernest Rutherford, John William Nicholson e Niels Bohr e seus contemporâneos, enfatizando as explicações desde a Física Clássica até a introdução da Teoria Quântica.

A tese apresenta uma introdução e oito capítulos. O primeiro capítulo procura dar conta do “estado da arte” antes da proposição dos modelos discutidos. Neste capítulo enfatizamos questões que se localizam no campo da ciência clássica, sem mergulhar no campo da teoria quântica nascente.

Na continuidade, apresentamos seis capítulos, cronologicamente organizados com uma breve biografia de cada um dos cientistas mencionados e o detalhamento das idéias e dos episódios científicos que levaram às publicações que apresentaram seus modelos pela primeira vez. A publicação dos modelos de átomo quantizados teve grande impacto e suscitou muitos debates, o que nos levou a produzir o capítulo sete tratando especificamente desses embates.

Para concluir no capítulo oito apresentamos algumas considerações sobre a integração das diversas trilhas investigativas que levam à publicação dos modelos atômicos discutidos; ao trabalho nas fronteiras de campos investigativos diversos; à intrincada dinâmica de poder entre campos, cientistas e publicações; e à afirmação de novos campos.

Palavras-chave: história do átomo; Nagaoka, Hantaro; Nicholson, John William; estrutura atômica.

ABSTRACT

The present research examines the history of atomic models in the early twentieth century dealing with the contributions of Joseph John Thomson, Hantaro Nagaoka, Ernest Rutherford, John William Nicholson and Niels Bohr and his contemporaries. It emphasizes the explanations from the classical physics till the introduction of the Quantum Theory.

This thesis presents an introduction and eight chapters. Chapter 1 presents the investigations which took place before the proposition of the models pointed out in the first paragraph. This chapter emphasizes the classical science, without diving into the quantum explanations.

The next six chapters present a chronological sequence of biographies, ideas and publications and discuss the atomic models proposed by the quoted scientists. The publication of the papers on the quantized atom models had great impact and caused many debates, which led us to produce a specific chapter dealing with such subject. .

In conclusion, the chapter eight presents some considerations about the integration of the investigative trails that led to the publication of the atomic models discussed, the work on investigative borders fields, the intricate dynamics of power between fields, scientists and publications, and the assertion of new fields.

Keywords: history of the atom; Nagaoka, Hantaro; Nicholson, John William; atomic structure.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO **1**

CAPÍTULO 1. ALGUNS ANTECEDENTES: FINAL DO SÉCULO XIX E PRIMEIROS ANOS DO SÉCULO XX **5**

1.1. FÍSICA DAS PARTÍCULAS E RADIOATIVIDADE 6

1.2. ESPECTROSCOPIA E ASTROQUÍMICA 10

1.3. MOLÉCULAS, LIGAÇÃO QUÍMICA E VALÊNCIA 17

CAPÍTULO 2. A PROPOSTA DE J. J. THOMSON **21**

2.1. A VIDA E A CARREIRA 21

2.2. OS ÁTOMOS PARA J. J. THOMSON 25

2.2.1. O ÁTOMO VORTEX 27

2.2.2. GIROSTATOS 29

2.2.3. O ÁTOMO DE 1904 - CORPÚSCULOS - ELÉTRONS 30

2.3. ALGUMAS CONSIDERAÇÕES 43

CAPÍTULO 3. A PROPOSTA DE NAGAOKA **47**

3.1. NAGAOKA E A CIÊNCIA NO JAPÃO 47

3.2. NAGAOKA NA EUROPA 54

3.3. NAGAOKA E A ESTRUTURA ATÔMICA 56

3.3.1. A ESTABILIDADE 59

3.3.2. ESPECTROSCOPIA E RADIOATIVIDADE 60

3.4. A CRÍTICA DE SCHOTT 65

3.5. ALGUMAS CONSIDERAÇÕES 72

CAPÍTULO 4. A PROPOSTA DE RUTHERFORD **75**

4.1. A VIDA E A CARREIRA 75

4.2. O ÁTOMO DE RUTHERFORD 84

CAPÍTULO 5. A PROPOSTA DE NICHOLSON 95

5.1. A VIDA E A CARREIRA 95

5.2. UM POUCO DAS INVESTIGAÇÕES DE JOHN W. NICHOLSON 100

5.3. O ÁTOMO DE NICHOLSON 102

CAPÍTULO 6. A PROPOSTA DE BOHR **117**
6.1. A VIDA E A CARREIRA 117
6.1.1. BOHR EM CAMBRIDGE 119
6.1.2. BOHR EM MANCHESTER 122
6.2. O MODELO DE BOHR 124
6.2.1 O PRIMEIRO ARTIGO 126
6.2.2. OS ARTIGOS 2 E 3 138
CAPÍTULO 7. OS DEBATES APÓS AS PUBLICAÇÕES DE BOHR **145**
7.1. A CRÍTICA DE NICHOLSON 146
7.2. OS DEBATES NA *NATURE* 151
CAPÍTULO 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS **155**
BIBLIOGRAFIA **161**

INTRODUÇÃO

Há muito tempo na História da Humanidade o conceito de átomo vem sendo procurado, investigado e vem sofrendo transformações e adquirindo novos significados. Isso tem levado muitas vezes à construção de histórias lineares que procuram estabelecer uma única trilha segura desde tempos longínquos – em geral desde a Grécia Antiga – até nossos dias. Apesar dos infinitos equívocos que uma história como essa produz, não resta dúvida de que ela realimenta a curiosidade, a dúvida e o desejo de conhecer mais sobre essa tal unidade fundamental. Além disso, esse conceito continua constituindo uma das bases da Física e da Química de nosso tempo.

Aqui nesse trabalho não temos a pretensão de fazer um resgate histórico desse conceito, nem de sua estruturação na Modernidade, muito menos nos remeter a estudos que mergulhem em períodos da Antiguidade ou Idade Média. Trataremos somente da construção dos chamados modelos atômicos que datam do início do século XX, quando a existência dos átomos já estava estabelecida e as questões pairavam principalmente sobre sua possível constituição interna.

Nesse período houve a contribuição de muitos cientistas para a construção de diversos modelos atômicos. Cientistas e grupos de pesquisadores propuseram diversos modelos a partir dos resultados obtidos

nos seus trabalhos de investigação empírica e teórica, contribuindo de forma decisiva para os modelos de átomo que a ciência de nosso tempo aceita.

A presente investigação procurará apresentar aspectos pouco discutidos desse período caracterizado pela transição entre o átomo clássico e os modelos atômicos quantizados, analisando aspectos que poderão trazer uma nova compreensão sobre a construção dos conhecimentos aceitos atualmente.

O período investigado é profícuo na produção de teorias sobre a constituição atômica. Partindo de distintos campos de investigação, é possível encontrar diferentes trilhas que conduzem aos modelos atômicos contemporâneos.

Ao iniciarmos este trabalho, tínhamos como ponto de partida a história da transição entre o modelo proposto por Ernest Rutherford (1871-1937) em 1911 e o modelo proposto por Niels Bohr (1885–1962) em 1913. A partir da análise dessa documentação original e de uma vasta bibliografia secundária, a complexidade desse episódio foi aumentando e novos atores tornaram-se importantes para uma compreensão mais aprofundada do cenário das teorias atômicas no período.

Para o propósito deste estudo, destacamos além de Ernest Rutherford e Niels Bohr, alguns cientistas que publicaram artigos propondo modelos de átomos que influenciaram, direta ou indiretamente, seus trabalhos: Hantaro Nagaoka (1865-1950), Joseph John Thomson (1856-1940) e John William Nicholson (1881-1955).

Além da análise dos artigos produzidos pelos cientistas apontados anteriormente, tornou-se fundamental um reconhecimento dos contextos científicos em que se produziram esses artigos – a influência de outros pesquisadores, a emergência de novos campos de conhecimento, as investigações que deram sustentação às novas teorias, as relações de poder nos diversos campos e entre campos diversos, bem como relações afetivas e questões pessoais.

Contemplando algumas dessas questões apresentaremos no primeiro capítulo um pouco do “estado da arte” antes da proposição dos modelos destacados, em alguns campos como a física das partículas, radioatividade, eletricidade, espectroscopia, química das ligações e astroquímica. Nesse capítulo enfatizaremos apenas questões que se localizam no campo da ciência clássica, sem mergulhar no campo da teoria quântica nascente. Uma vez que a influência encontrada e citada nos primeiros modelos quantizados foi o trabalho de radiação do corpo negro apresentado por Max Planck (1858-1947) em 1901, optamos assim por detalhar e restringir nossas investigações às influências da Física Clássica.

A seguir, apresentamos uma seqüência de capítulos, cronologicamente organizados, onde fornecemos uma breve biografia de Hantaro Nagaoka, Joseph John Thomson, Ernest Rutherford, John William Nicholson e Niels Bohr e o detalhamento das idéias e dos episódios científicos que produziram e levaram às publicações em que apresentaram seus modelos pela primeira vez. Destacamos que os capítulos sobre Nagaoka e Nicholson,

apresentam originalmente um maior detalhamento de suas biografias, uma vez que não foram encontradas biografias publicadas[1], diferentemente do que existe para os demais, que tiveram suas histórias extensamente detalhadas em outras publicações.

A publicação dos modelos de átomo quantizados por J. Nicholson e N. Bohr teve grande impacto e suscitou muitos debates, o que nos levou a produzir um capítulo sobre esses embates. No período em questão um dos principais espaços de debates era a revista *Nature.* Assim analisaremos o debate que se estabeleceu nesse periódico sobre a validade das novas teorias, precedência e/ou originalidade entre os trabalhos de Bohr e Nicholson.

No último capítulo apresentamos algumas considerações sobre aspectos que permearam todo o trabalho. Destacaremos aqueles relacionados à integração das diversas trilhas investigativas que levaram à publicação dos modelos atômicos discutidos; ao trabalho nas fronteiras de campos investigativos diversos; à intrincada dinâmica de poder entre campos, cientistas e publicações; e à afirmação de novos campos. Ao final procuramos retomar alguns pontos que podem lembrar a complexidade dos fatos que, por motivos puramente investigativos, separamos ao longo do trabalho.

[1] Em relação a Nagaoka, não foram encontradas muitas informações biográficas e do seu contexto de formação e pesquisa publicadas no Ocidente. Em relação a Nicholson, além do pequeno número de fontes secundárias encontradas, foram identificadas divergências entre fontes secundárias e fontes primárias consultadas.

CAPÍTULO 1

ALGUNS ANTECEDENTES: FINAL DO SÉCULO XIX E PRIMEIROS ANOS DO SÉCULO XX

Os estudos sobre radioatividade, raios catódicos, elétrons, valência, espectroscopia e efeito Zeeman desenvolvidos ao final do século XIX contribuíram para o desenvolvimento das teorias atômicas do início do século XX. Outra contribuição nesse sentido foi dada pela teoria quântica que começava a se desenvolver procurando explicar a radiação do corpo negro e que teve implicações nas propostas dos modelos atômicos de John W. Nicholson e Niels Bohr, entre outros.

Segundo Eri Yagi, no início do século XX não se conhecia ainda o número de elétrons por átomo, a natureza da eletricidade positiva no átomo, e a causa dos pesos atômicos[2], mas por outro lado, a estrutura dos espectros ainda não tinha sido explicada. Essa época marcou o início de uma série de mudanças. Albert E. Moyer comenta a respeito:

> O *Congress of Arts and Science* de 1904 ocorreu durante um período de intensa produção experimental, teórica e ideológica em física. Existiam expectativas de mudança, enquanto a comunidade de físicos estava um ano distante da apresentação

[2] Eri Yagi, "On Nagaoka's saturnian atomic model (1903)." *Japanese Studies in the History of Science* 3 (1964): 29-47, na p. 29.

da teoria da relatividade de Albert Einstein e alguns anos distante do reconhecimento pleno da recente hipótese quântica de Max Planck.[3]

Nesse período podemos identificar convergência de diferentes trilhas teóricas para explicações atômicas comuns. Assim desenvolvemos nossa discussão inicial sobre alguns contextos teóricos que sustentavam as investigações sobre a teoria atômica.

Nessa investigação agrupamos as contribuições em três trilhas centrais, considerando a física clássica, quais sejam: Física das partículas e Radioatividade; Espectroscopia e Astroquímica; Moléculas, Ligação Química e Valência[4].

1.1. FÍSICA DAS PARTÍCULAS E RADIOATIVIDADE

As investigações sobre raios catódicos (elétrons), sobre as diferentes radiações (α, β, γ, X) e sua interação com a matéria eram temas presentes nas publicações da época, conforme pudemos identificar analisando os resumos do *Physics Abstracts* no período 1898-1912[5], títulos dos artigos do *Proceedings of Cambridge Philosophical Society* no período 1898-1912 e do *Philosophical Magazine* no período 1904-1912.

---

[3] Albert Moyer. "Foreword". *In*: Physics for new century: papers presented at 1904 St. Louis Congress. *The history of modern physics, 1800 – 1950*, vol. 5. (1985), na p. xiii.

[4] No final do século XIX era bastante comum os químicos utilizarem a expressão átomo e os físicos a expressão molécula referindo-se à mesma entidade. John L. Heilbron **"**A history of the problem of atomic structure from the discovery of the electron to the beginning of quantum mechanics." Tese de doutorado.. Berkeley: UCLA, 1964, na p. 10.

[5] Encontramos publicações de 1899 sobre raios de Lenard (catódicos) e os raios de Röntgen (X), desenvolvidas, respectivamente, pelos próprios cientistas bem como por J. J. Thomson e Wilhelm Wien, entre outros, em várias partes da Europa, publicações que se ampliaram em aprofundamento e aplicações em vários campos da física e da química a partir de 1900, tais como tamanho dos átomos, íons, valência, combinação química, magnetismo.

É possível destacar também a extensa bibliografia sobre radioatividade produzida por Ernest Rutherford (1871-1937), Frederick Soddy (1877-1956), Pierre (1859-1906) e Marie Curie (1867-1934), Antoine Henri Becquerel (1852-1908), Arthur S. Eve (1862-1948), William Bragg (1862-1942), Hans Geiger (1882-1945), Ernest Marsden (1889-1970), Henry Moseley (1887-1915) entre outros. Os anos iniciais do século XX foram profícuos em publicações[6] nesse campo. Essas foram pesquisas que conduziram os trabalhos de Rutherford até sua proposição da existência do núcleo atômico, embora possamos dizer que outros cientistas tenham chegado à mesma idéia por outros caminhos.

Uma outra trilha a ser investigada tem procedência nas pesquisas de Wilhelm Röntgen (1845-1923) com raios X (chamados de Raios Röntgen), desde 1895. A capacidade de penetração desses raios na matéria construiu uma nova trilha de investigação sobre a estrutura da matéria. A pesquisa de Henri Becquerel (1852-1908) também encaminhou novos objetos de investigação, desde 1896, quando ele identificou a radioatividade natural. Aos trabalhos de Röntgen e Becquerel seguiram-se os trabalhos sobre transmutação desenvolvidos por Ernest Rutherford, Frederick Soddy, Pierre e Marie Curie.

No campo da eletricidade, as pesquisas desenvolvidas por Michael Faraday (1791-1867) são de fundamental importância, assim como as idéias de George Johnstone Stoney (1826-1911), que atentou para a carga perdida pelo íon hidrogênio na eletrólise e acabou atribuindo a ela o nome de elétron, em 1891. Destacamos também os experimentos de Joseph John Thomson (1856-1940) com raios catódicos em 1897, que o levaram a considerar que esses

[6] Analisando apenas resumos publicados no *Science Abstracts* em 1901 encontramos 8 trabalhos sobre radioatividade.

raios na verdade eram constituídos de partículas negativas, que ele chamou de corpúsculos. O debate sobre a eletricidade e a constituição elétrica da matéria era intenso nesse período, criando uma série de hipóteses sobre a carga elétrica Nas palavras de Fleming:

> É algumas vezes usual falar do corpúsculo que transporta a carga de um elétron de eletricidade negativa simplesmente como *um elétron*, abandonando toda a distinção entre a carga elétrica e o veículo ao qual ela está vinculada[7].

Este foi o caminho seguido por J. J. Thomson.

Vê-se no final do século XIX esboçarem-se as bases que atualmente sustentam as conexões entre matéria e eletricidade que levaram à proposição dos primeiros modelos atômicos eletricamente constituídos. Dentre essas investigações, é necessário destacar os trabalhos desenvolvidos com descargas elétricas em tubos de vácuo conduzidos por Sir William Crookes (1832-1919) que levaram à descoberta de raios catódicos, raios X e raios canais.

Com o desenvolvimento da teoria dos elétrons, foram sendo construídas relações entre uma idéia bastante discutida no período ou mesmo anteriormente: a existência do éter. Isso será evidenciado mais adiante quando detalharmos o trabalho desenvolvido por J. J. Thomson. Entretanto, é importante mencionar os trabalhos desenvolvidos por Joseph Larmor (1857-1942). Conforme Fleming nesses trabalhos:

---

[7] Alexander Fleming, "The electric theory of electricity." *Royal Institution Library of Science. Physical Sciences* 5 (1970): 551-569. [Discurso proferido na *Royal Institution* em 30 maio. 1902], na p. 558.

> Começa-se com a hipótese de que o éter é um fluído sem atrito, mas possui a propriedade de inércia; em outras palavras, ele assume que as diversas partes do éter podem ter movimento em relação umas às outras e que este movimento tem envolvimento com a energia e o meio. Ele considera o elétron como um centro de tensão no éter, um local no qual a tensão do éter se irradia. Elétrons podem, portanto, ser positivos ou negativos, de acordo com a direção da tensão, e para cada elétron positivo há um correspondente negativo. Átomos, de acordo com ele, são coleções de elétrons em um movimento em órbita estável como aglomerados de estrelas ou sistemas .... Como sugerido por Larmor, um átomo pode ser constituído por elétrons em movimento orbital em torno uns dos outros. Na realidade, cada átomo é uma miniatura do sistema solar[8].

Como é possível identificar nesta citação apresentada em 1902, a discussão sobre a existência das partículas positivas também já estava presente, todavia sem a mesma penetração que a discussão sobre a eletricidade negativa. É interessante perceber também que a idéia de modelo com base no sistema solar foi utilizada por Larmor para representar um átomo.

> Podemos imaginar um átomo ser construído a partir de camadas concêntricas de elétrons como cascas de uma cebola,

[8] Fleming, “The electric theory of electricity”, p. 565.

> alternadamente positivas e negativas, sendo a camada exterior em todos os casos negativa. A diferença entre o número total de elétrons positivos e negativos é a valência do átomo.
>
> Nesta perspectiva um átomo de hidrogênio seria composto por cerca de 700 a 1000 elétrons positivos e negativos dispostos em camadas concêntricas em forma esférica[9].

Assim, foi aventada a possibilidade da existência de elétrons ligados aos átomos, bem como existindo independentemente. Os elétrons seriam responsáveis pela eletricidade negativa. A eletricidade e o magnetismo poderiam ser reinterpretados à luz dessa teoria: “Se elétrons em movimento constituem uma corrente elétrica, então elétrons em rotação são a causa de efeitos magnéticos"[10].

Como é possível perceber, a discussão sobre a radioatividade e eletricidade, desenvolvidos no campo da física das partículas foi fundamental para a construção dos modelos atômicos no início do século XX.

1.2. ESPECTROSCOPIA E ASTROQUÍMICA

A primeira descrição de um espectro de emissão de que se tem registro foi apresentada por Thomas Melvill (1726-1753), em 1752, a partir da observação de uma chama do sódio através de um prisma. Durante a primeira metade do século XIX, várias investigações foram desenvolvidas nesse campo, no sentido de definir a relação entre estrutura atômica e espectroscopia. Por

---

[9] Fleming, “The electric theory of electricity”, p. 566.
[10] *Ibid* , p. 568.

exemplo, a descoberta do espectro de absorção descontínuo; o reconhecimento da origem química de várias linhas espectrais; a descoberta da dispersão anômala; as lacunas no espectro de absorção de gases e a aplicação da fotografia à espectroscopia. Essas investigações foram desenvolvidas por John William Draper (1811-1882), George J. Stoney, David Alter (1807-1881), Anders Angström (1814-1874), George Stokes (1819-1903), Balfour Stewart (1828-1887), Jean Léon Foucault (1819-1868), entre outros[11].

No final da década de 1850 ocorreram as investigações de Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) e Robert W. Bunsen (1811-1899) bem como vários trabalhos que procuraram caracterizar elementos por meios espectroscópicos. Esses trabalhos foram desenvolvidos por físicos, químicos e astrônomos. As investigações, em geral, indicavam que os espectros eram devidos à estrutura interna dos elementos ou compostos.

A investigação de espectros levou à descoberta de novos elementos: "Kirchhoff e Bunsen descobriram o Césio em 1860; o Rubídio foi detectado por Bunsen no ano seguinte; Crookes descobriu o Tálio em 1861; o espectro do Índio foi observado primeiramente por Reich e por Richter em 1863."[12]. Nas décadas seguintes ocorreu a identificação de outros elementos por meios espectroscópicos.

Enquanto algumas investigações produziam espectros de elementos e compostos terrestres, outras apontavam para os céus. Um dos primeiros artigos de espectroscopia foi publicado por Kirchhhof em 1861, onde tratou da análise química da atmosfera solar e no mesmo ano John Tyndall enviou para

---

[11] Clifford Lawrence Maier, *The role of spectroscopy in the acceptance of an internally structured atom 1860-1920*. [Tese de doutorado]. Wisconsin: Universidade de Wisconsin, 1964, p. 23, 29, 31.

[12] Robert DeKosky, "Spectroscopy and the elements in the late nineteenth century: the work of Sir William Crookes." *British Journal for the History of Science* 6 (24, dez. 1973): 400-423, na p. 400.

publicação um artigo tratando das bases físicas da química solar[13]. Estes e outros trabalhos constituíram os primeiros passos nos novos campos de conhecimento que se construíram nas fronteiras da física, química e astronomia (astrofísica, astroquímica, cosmoquímica). As descobertas nesses campos também começaram:

> Em 1868 o astrônomo francês Pierre-Jules-César Janssen observou uma linha amarela nova no espectro do sol que não coincidiu completamente com as duas linhas D do sódio. Norman Lockyer, o astrônomo inglês, apontou que esta linha significava um elemento novo, que ele chamou hélio, apesar do fato de este corpo novo nunca ter sido observado em espectros de uma substância da Terra[14].

Com o desenvolvimento das tecnologias de produção dos espectros, novos instrumentos foram produzidos. Esses integravam os telescópios, a fotografia e a espectroscopia, ampliando o número de linhas observadas nos espectros, ultrapassando o limite da observação visual, e produzindo mais linhas no campo do infravermelho e ultravioleta, seja nos espectros estelares ou de elementos terrestres. A utilização dessas novas tecnologias produziu resultados mais confiáveis. Cientistas como Kirchhoff e Rowland, entre outros produziram escalas e tabelas dos espectros conhecidos. Cabe ainda destacar que a produção de espectros elementares e de compostos levou à investigação

---

[13] Helge Kragh, "The chemistry of the universe: historical roots of modern cosmochemistry." *Annals of Science* 57 (2000): 353-368, na p. 365.
[14] DeKosky, "Spectroscopy and the elements in the late nineteenth century…", na p. 400.

sobre a relação entre os espectros de compostos com os espectros de seus elementos constituintes puros[15].

A espectroscopia provocou essa aproximação entre química, física e astronomia desencadeando mudanças nos processos de investigação em ambos os campos. Nas palavras de Sir William Huggins:

> Então, era a primeira vez que um observatório astronômico começou a adquirir a aparência de um laboratório. Inicialmente baterias liberando gases nocivos foram arranjadas do lado de fora de uma das janelas; […] prateleiras com bicos de Bunsen, tubos de vácuo, e frascos de produtos químicos…aliando suas paredes. O observatório transformou-se em um lugar em que a química terrestre foi conduzida ao toque direto da química celeste[16].

A investigação da estrutura da matéria se beneficiou com a aproximação dessas duas áreas.

Na segunda metade do século XIX foram desenvolvidas várias fórmulas empíricas que procuravam explicar os espectros encontrados. Arthur Schuster (1851-1934), a partir dos resultados de suas investigações, considerava de fundamental importância o descobrimento de uma lei que conectasse os vários períodos de vibração no espectro de linhas. As investigações de Schuster foram seguidas por vários outros cientistas que produziram novas equações estabelecendo séries de linhas espectrais. [17]

---

[15] DeKosky, "Spectroscopy and the elements in the late nineteenth century…", p. 402.
[16] William Huggins *apud* H. Kragh, "The chemistry of the universe: historical roots of modern cosmochemistry," *Annals of Science* 57 (2000): 353-368, na p. 366.
[17] Maier, *The role of spectroscopy in the acceptance of an internally structured atom 1860-1920*, p. 78.

Pode-se considerar que o primeiro sucesso na obtenção de uma relação matemática que representasse a regularidade dos espectros foi obtido por Johann Balmer (1825-1898), para o hidrogênio, em 1885, e as fotografias dos eclipses solares em 22 de janeiro de 1898 e 28 de maio de 1900 produzidas por John Evershed deram o mais forte suporte empírico para a fórmula proposta por Balmer[18].

Seguiram-se à proposta de Balmer, as contribuições Johannes Rydberg (1854-1919), Heinrich Kayser (1853-1940) e Carl Runge (1856-1927) que ampliaram a abrangência da fórmula inicial para uma equação geral. Rydberg propôs que o espectro de um elemento é composto pela superposição de três tipos de séries (série principal, série difusa e série s*harp*) e transformou a fórmula específica de Balmer em uma fórmula geral (com alguns limites) que seria utilizada oportunamente nos trabalhos sobre teoria atômica. Kaiser e Runge também apresentaram fórmulas que parecem não ter algo essencialmente novo, uma vez que a fórmula que continuou sendo mais usada foi a de Rydberg. Todavia suas investigações produziram mais informações sobre a relação entre a estrutura do átomo e a espectroscopia.[19]

Em 1903 duas novas propostas derivadas da proposta de Rydberg foram apresentadas por Alfred Fowler (1868-1940) e por Walter Ritz (1878-1909). Destacamos que J. W Nicholson usou a fórmula desenvolvida por Ritz para o átomo de Hélio.[20]

Nesse período surgiram os trabalhos de George J. Stoney (1826-1911). Ele investigou a origem dos espectros desde o começo de sua carreira

---

[18] Maier, *The role of spectroscopy in the acceptance of an internally structured atom 1860-1920*, p. 86
[19] *Ibid*, p. 110.
[20] Nicholson, "Laws of series spectra." *Proceedings of the Royal Society* 91 (1, abril 1915): 255-272, na p. 255.

científica (em torno de 1860). Inicialmente teve como instrumental teórico a teoria cinética dos gases, que se mostrou infrutífera. Depois elaborou uma teoria que unia uma nova interpretação da lei da eletrólise formulada por Faraday e a teoria de valência de Friedrich A. Kekulé (1829-1896). Stoney propôs a existência de 'uma quantidade definida de eletricidade' (que veio a chamar de elétron). A partir de 1891 reinterpretou suas investigações à luz da teoria eletromagnética de Maxwell e buscou conciliar sua teoria com as fórmulas espectrais construídas por Rydberg, Kaiser e Runge. G. Stoney atribuíu a origem dos espectros ao movimento dos elétrons – unidade de carga – e a possibilidade de perturbação desse movimento com efeito sobre as linhas espectrais.[21]

No entanto, ainda eram muito frágeis as relações que se construíram entre a estrutura dos átomos e a espectroscopia, principalmente quando eram considerados modelos atômicos "estáticos" como o de Dalton. A concepção ondulatória da luz foi predominante nas análises dos espectros de absorção e emissão até o início do século XX. Incluía analogias com fenômenos acústicos.[22]

Além das investigações que procuravam identificar substâncias e elementos e sua estrutura a partir dos espectros de absorção, podemos destacar as pesquisas que produziam alteração das condições físicas externas para verificar e analisar alterações produzidas em espectros conhecidos, na pressão, temperatura, etc. Dentre essas investigações destacamos os estudos desenvolvidos por Pieter Zeeman (1865-1943) sobre o efeito de um campo

---

[21] Nadia Robotti & Francesca Pastorino. "Zeeman's discovery and the mass of the electron." *Annals of Science* 55 (2, abril 1998): 161-183, pp. 167-171.
[22] Maier, *The role of spectroscopy in the acceptance of an internally structured atom 1860-1920*, pp. 22, 56.

magnético sobre os espectros de emissão das substâncias. Estas investigações foram fundamentais para o desenvolvimento dos modelos atômicos.

Zeeman, em 1896, observou a ação de um campo magnético sobre a natureza e a polarização de uma radiação luminosa que havia sido emitida. Estas investigações, conduzidas em Leiden, levaram-no a receber o prêmio Wilde em 1899 e a ter seu nome vinculado ao fenômeno descoberto por ele – *efeito Zeeman*[23] . Zeeman mostrou interesse pelas relações entre magnetismo e luz desde sua tese de mestrado, em 1892, até encontrar experimentalmente[24] em 1896 duas linhas D do espectro do Sódio. Essas linhas tiveram sua posição alterada sobre o efeito de um campo magnético. Utilizando a Teoria Eletrônica[25] desenvolvida por Lorentz, Zeeman concluiu em 1897 que a radiação era devida ao movimento de uma partícula carregada negativamente. Em suas palavras: "[...] os experimentos [...] podem ser considerados como prova de que as vibrações de luz são causados pelo movimento dos íons, tal como foi introduzido pelo Prof. Lorentz, em sua teoria da eletricidade"[26].

É importante destacar que Zeeman e Thomson, por trilhas diferentes, chegaram à mesma ordem de valor para a relação *m/e.* Thomson comentou: "É interessante notar que o valor de *m/e* é da mesma ordem que o valor 10^{-7}, deduzido pela fórmula de Zeeman em seus experimentos sobre o efeito de um campo magnético sobre o período da luz de sódio"[27]. Entretanto, isso não foi

---

[23] Robotti & Pastorino, “Zeeman’s discovery and the mass of the electron”, p. 161.
[24] Nesse experimento Zeeman utilizou uma grade côncava que tinha sido desenvolvida por Rowland. (Robotti & Pastorino, “Zeeman’s discovery and the mass of the electron.”, p. 163)
[25] Teoria dos íons carregados negativa ou positivamente em movimento no Éter imóvel. A luz é produzida pela vibração dos íons.
[26] Pieter Zeeman *apud* Robotti e Pastorino, “Zeeman’s Discovery and the Mass of the Electron”, p. 175.
[27] J. J. Thomson “On the cathode rays” *Philosophical Magazine [5]* 44 (1897): 293-315, na p. 311

suficiente para considerar ambas as entidades como sendo uma única, o que só veio acontecer mais tarde, em torno de 1900[28].

O estudo de espectros teve grande influência nas propostas de Nagaoka, Nicholson e Bohr, e o comportamento dos espectros frente a um campo magnético só obteve uma explicação satisfatória com a introdução do conceito de Spin da Nova Mecânica Quântica[29].

1.3. MOLÉCULAS, LIGAÇÃO QUÍMICA E VALÊNCIA

O campo da química das ligações e da estrutura das moléculas já estava bastante desenvolvido no início do século XX, a partir dos trabalhos de Svante Arrhenius (1859-1927) sobre a teoria dos íons, de Thomson sobre a teoria eletrônica, da teoria da eletrovalência do químico alemão Richard Abegg (1869-1910) e do átomo cúbico do estadunidense Gilbert Lewis (1875-1946), entre outros. Köhler explica:

> O meio século que se seguiu à teoria da estrutura de August Kekulé em 1859 foi a era dourada da química orgânica estrutural [...]. Em torno de 1900 a química estrutural era uma ciência altamente sofisticada recentemente coroada com a elucidação dos açúcares, purinas, e proteínas por Emil Fischer (1852-1919)[30].

---

[28] Robotti & Pastorino, “Zeeman’s discovery and the mass of the electron”, p. 180.
[29] *Ibid*, p. 181.
[30] Robert E Kohler “The origin of G. N. Lewis theory of the shared pair bond.” *Historical Studies in the Physical Sciences* 3 (1971): 343-376, na p. 343.

Nesse contexto, os modelos atômicos também envolveram modelos de ligação química como se pode perceber nos trabalhos de Nagaoka, Thomson e Bohr. John A. Fleming comentou a respeito do assunto:

> Uma variedade de argumentos fornecida por Maxwell, Boltzmann, Loschimdt, Lord Kelvin e outros mostrou que há um elevado grau de probabilidade de que qualquer outra subdivisão faria com que as partes em que o sal foi dividido não permanecessem por muito tempo com propriedades idênticas, mas haveria dois tipos de partes ou partículas, de tal modo que, se fossem coletadas juntas todas de um mesmo tipo formariam um metal chamado sódio, e se todas aquelas do outro tipo fossem similarmente coletadas formariam um não-metal chamado cloro.[31]

No texto de Fleming também podemos identificar o desenvolvimento das explicações sobre ligação química em 1902:

> Fatos da química ensinam-nos que as moléculas dos gases livres hidrogênio, oxigênio ou outros gases contém dois átomos, e que essas moléculas livres são representadas pelos símbolos H_2, O_2, etc. Nestes casos, pode-se dizer que hidrogênio e oxigênio estão combinados entre si. Podemos explicar isto pela suposição de que os mais neutros são estruturas instáveis. Em contato uma

[31] John A. Fleming, “The electric theory of electricity”, p. 555.

com as outra algumas perdem um ou mais elétrons e um número igual ganha um ou mais elétrons.[32]

Neste contexto os modelos atômicos, também se desdobraram em modelos de ligação química. Como explicou Fleming: "Todas as alterações químicas são devidas às forças elétricas produzida entre átomos que ganharam ou perderam elétrons"[33]. Veremos mais adiante nesta tese que essas características também estarão presentes em trabalhos futuros como o de Nagaoka, Thomson e Bohr.

A aceitação da teoria eletrônica da matéria forneceu novas bases para as idéias de valência. De acordo com Köhler, teoria de eletrovalência mais conhecida foi proposta em 1904 por Richard Abegg (1869-1910), um professor de química inorgânica em Breslau. Para Abegg, cada elemento tinha um número máximo definido de *valências principais*, positivas ou negativas, e também certo número de *contravalências* latentes, de sinal oposto às valências principais. A soma destas valências principais e latentes era sempre oito. Um átomo eletropositivo e um átomo eletronegativo formavam uma ligação pela ação simultânea de uma valência positiva e uma negativa, ou seja, pela transferência de um elétron[34]. Entretanto, pode-se dizer que o modelo proposto por Abbeg ficava restrito à ligação entre os átomos, mas não incluía um modelo de átomo em si.

A discussão sobre o modelo atômico foi feita por G. Lewis em 1902, com os primeiros apontamentos sobre o átomo cúbico[35], que apresentava o

---

[32] John A. Fleming, “The electric theory of electricity”, 561.
[33] *Ibid*, p. 568.
[34] Kohler, “The origin of G. N. Lewis theory of the shared pair bond”, p. 349.
[35] *Ibid*, p. 350.

átomo como um cubo que obedecia a regra do octeto onde os elétrons se localizariam nos oito vértices de um cubo. Esse modelo foi detalhado mais de dez anos (1916) depois por Lewis. Walther Kossel (1888-1956) e G. Lewis publicaram, em 1916, de forma independentemente modelos de ligação química que foram de extrema importância para a química.

As investigações no campo da química avançaram muito, e as questões relativas à valência, ligação química e tabela periódica e contribuíram de forma profunda para os trabalhos de Thomson, Nicholson e Bohr.

CAPÍTULO 2

A PROPOSTA DE J. J. THOMSON

2.1. A VIDA E A CARREIRA

Joseph John Thomson (1856-1940) foi uma das figuras mais importantes no desenvolvimento das teorias atômicas no final do século XIX e início do século XX. J. J., como era mais conhecido, nasceu em Cheetham Hill - Inglaterra, próximo à Manchester em 18 de dezembro 1856 e morreu em 30 de agosto de 1940 em Cambridge – Inglaterra. J. J. Thomson era filho de um livreiro e editor que faleceu quando ele tinha 16 anos[36].

Thomson viveu a maior parte de sua vida em Cambridge, desde 1876. Ao ingressar na Universidade de Cambridge, obteve a *Minor scholarship* (bolsa de estudos) em matemática [37].

Thomson recebeu o Prêmio Nobel de física em 1906 "em reconhecimento aos grandes méritos de suas investigações teóricas e experimentais sobre a condução de eletricidade em gases" conforme consta do *website* da Fundação Nobel[38]. Thomson também foi presidente da *Royal Society* de Londres por 5 anos, desde 1915[39].

Tendo iniciado sua vida acadêmica em Manchester, Thomson por sugestão de seu pai, ingressou no *Owens College* para cursar engenharia com

---

[36] George Thomson, "J. J. Thomson and the Discovery of the Electron". *In*: Spencer Weart & P. Melba (eds.). *History of Physics.Reading from Physics today*. (New York: American Institute of Physics, 1985), p. 290.
[37] John L. Heilbron, "Thomson, Joseph John". *In* C. C. Gillispie, org., *Dictionary of Scientific Biography*, vol 13-14 (New York: Charles Scribners Sons, 1981), p. 362.
[38] http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1906. consultado em 10/02/2009.
[39] Heilbron, "Thomson, Joseph John", p. 362.

apenas 14 anos[40]. O *Owens College* tinha, na época, uma ótima estrutura de laboratórios e excelentes professores como Osborne Reynolds (1842-1912) (engenharia), Henry Roscoe (1833-1915) (química), Balfour Stewart (1828-1887) (física) e Thomas Barker (1838-1907) (matemática) que recomendou sua ida para Cambridge[41]. No *Owens College,* Thomson desenvolveu um grande interesse pela física, bem como pelas leis das combinações químicas e pelas teorias atômicas da matéria, principalmente pelas idéias de John Dalton.

> Embora ele [Dalton] fosse o mais tímido e reservado dos homens, as pessoas de Manchester sabiam que um grande homem vivia entre eles, e tinham orgulho disto... No dia do funeral dele muitos dos moinhos estavam fechados; e uma importante rua da cidade foi chamada Rua John Dalton [42].

Thomson considerou seus estudos em Owens como o período mais crítico em sua vida, o qual determinou sua carreira[43]. Através do contacto com seus professores, ele decidiu tornar-se físico passando a interessar-se pelas combinações químicas e teorias atômicas da matéria[44] .

Em Owens sua aptidão científica e matemática foi logo percebida. Atuou como assistente do professor Balfour Stewart inclusive publicando com ele, seu primeiro artigo científico no *Proceedings of the Royal Society*, em

---

[40] Michael Chayut, "J. J. Thomson: the discovery of the electron and the chemists." *Annals of Science* 48 (1991): 527-544, na p. 531.
[41] Heilbron, "Thomson, Joseph John", p. 362.
[42] Joseph John Thomson, *Recollections and reflections.* New York: Macmillan, 1937, na p. 8.
[43] *Ibid*, p. 2.
[44] Chayut, "J. J. Thomson: the discovery of the electron and the chemists," p. 531.

1877[45]. É provável que o interesse pela teoria de Dalton tenha surgido nas aulas do professor de Química, Henry Roscoe[46]. Thomson relatou em sua autobiografia que:

> Era divertido ouvir o tratamento que Roscoe conferia à idéia de átomos, em suas aulas. Quando ele discutia a lei da combinação química em múltiplas proporções, não podia deixar escapar, mas obviamente, considerava essa idéia como algo superficial e Bohemian, e embora estivesse evidentemente relacionada com essa respeitável e indispensável lei, foi tão bem apenas para apresentar a relação. Foi por ironia do destino que Roscoe, vinte anos depois, descobriu nas salas da Sociedade Literária e Filosófica de Manchester o diário de Dalton, o qual mostrou que, ao contrário à opinião que ele e outros tinham, foi a teoria atômica que levou à lei da combinação química, e não a lei à teoria atômica. Roscoe se esqueceu de que uma teoria, ainda que boêmia, pode originar fatos muito respeitáveis[47].

Além das aulas do Prof. Roscoe, Thomson pôde desenvolver seu interesse pela combinação química nas aulas de física do prof. Balfour Stewart, onde provavelmente também ouviu falar pela primeira vez em átomo vortex e magnetos de Mayer. De acordo com Thomson, Stewart "era um entusiasta da pesquisa, e conseguiu transmitir o mesmo espírito para alguns de seus

---

[45] J. J. Thomson, "Experiments on contact Electricity Between Non-Conductors", *Proceedings of The Royal Society*, 25 (1877): 369-372.
[46] Ele publicou, em 1896, o artigo "A New View of the Origins of Dalton's Atomic Theory".
[47] Thomson, *Recollections and reflections*, p. 28.

alunos”[48]. Stewart desenvolvia suas aulas diretamente no laboratório, o que era uma inovação no período. Thomson comentou a respeito:

> Tínhamos grande autonomia na escolha dos experimentos. Criávamos nossos próprios aparatos e o prazer de investigar qualquer ponto de interesse que surgisse no decorrer do trabalho era tão grande quanto o tempo que gastávamos. Isto foi muito mais interessante e mais educativo do que os sistemas altamente organizados que são necessários quando as turmas são grandes[49].

Ao que tudo indica, nas aulas do professor de engenharia, Osborne Reynolds, Thomson estudou, também, sobre o átomo vortex de Kelvin – William Thomson (1824-1907) - e realizou experimentos sobre o comportamento de anéis vórtices em água.

Em Owens, Thomson teve seu primeiro contato com o trabalho de James C. Maxwell (1831-1879). Ele comentou:

> Ao final de minha estada em Owens, Arthur Schuster estava trabalhando, também, no laboratório e deu um curso, que eu assisti, sobre o *Treatise on Electricity and Magnetism* [Tratado sobre eletricidade e magnetismo] de Maxwell, o qual tinha sido publicado há pouco.[50]

---

[48] Thomson, *Recollections and reflections,* pp. 19-20.
[49] *Ibid*, p. 19.
[50] *Ibid,* p. 22.

Em sua formação em Owens, as analogias mecânicas e teorias especulativas foram componentes essenciais do pensamento físico apresentado a Thomson. Essas aprendizagens foram incorporadas à sua produção teórica como um valioso instrumental para compreender o “invisível”.

Por influência de Baker, Thomson concorreu, em 1875, a uma bolsa no *Trinity College* em Cambridge, porém foi inicialmente mal-sucedido. Em suas palavras: “Eu fui mal-sucedido em minha primeira tentativa para obter uma bolsa de estudos em Trinity, e nem mesmo fui qualificado para uma apresentação.”[51] Porém, no ano seguinte ele fez uma nova tentativa e ingressou no Trinity College – Cambridge para dar continuidade a seus estudos em Matemática e Física, aos 19 anos.

Antes de ser escolhido para suceder Lorde Rayleigh, em 1884 com apenas 28 anos, na cátedra de Física Experimental no Laboratório Cavendish, Thomson candidatou-se a professor de Física Matemática em Owens, não obtendo sucesso. Em Cambridge, Thomson foi o terceiro professor a assumir essa cátedra no Laboratório Cavendish, que foi inaugurado em 1874, sob coordenação de Maxwell, que tinha a cátedra de Física Experimental desde sua criação em 1871[52].

2.2. OS ÁTOMOS PARA J. J. THOMSON

As idéias de J. J. Thomson sobre a estrutura do átomo se transformaram com a passagem do tempo e a consideração de novas teorias.

---

[51] Thomson, *Recollections and reflections*, p. 31.
[52] Eric J. Holmyard, *British Scientists* (London: J.M Dent and Sons, 1951), p. 74.

Desde as idéias iniciais, que parecem estar vinculadas ao trabalho de Dalton até às hipóteses quânticas e o átomo nuclear, Thomson construiu algumas explicações para a estrutura atômica utilizando as idéias de átomo vortex de Kelvin, imãs flutuantes de Mayer, propriedades elétricas e magnéticas, fenômenos radioativos, raios X, propriedades periódicas e combinação química. É possível perceber essa miríade de teorias e resultados experimentais ao longo do trabalho de Thomson, o que mostra sua flexibilidade em adotar novos referenciais e produzir novas hipóteses explicativas a partir suas concepções iniciais.

Thomson tinha preocupação em explicar as propriedades periódicas dos elementos com base na distribuição eletrônica. De acordo com Heilbron, para Thomson o problema fundamental da teoria atômica consistia na explicação da variação das propriedades periódicas dos elementos químicos representados na Tabela de Mendeleev. Em 1897, quando anunciou a descoberta do elétron, considerou que as novas partículas ligadas em um átomo poderiam produzir esta periodicidade[53].

Outra preocupação constante de Thomson foi a ligação entre os átomos para formar moléculas. Essa preocupação também estava presente no trabalho de Bohr, embora suas representações dessas ligações fossem absolutamente diversas .

É importante destacar, que independente das teorias desenvolvidas, Thomson apresentou concepções de um átomo dinâmico - anéis vórtices, girostastos e corpúsculos em movimento.

---

[53] John L. Heilbron, “J. J. Thomson and the Bohr atom.” *Physics Today* 30 (1977): 23-30, na p. 23.

2.2.1. O ÁTOMO VORTEX

A questão dos anéis vórtices foi discutida por matemáticos e físicos na Inglaterra, desde 1867. William Thomson (Lorde Kelvin) adotou o modelo de vórtices de Hermann von Helmholtz[54] (1821-1894) para o modelo atômico no qual átomos eram formandos por um conjunto tubos vórtices fechados no Éter - infinito, incompressível, homogêneo e sem atrito[55]. Na elaboração de seu modelo de átomo vortex, Lorde Kelvin foi inspirado pelos experimentos de Alfred Marshal Mayer (1836-1897) com imãs flutuantes[56], que forneceram a ilustração mecânica do equilíbrio cinético de grupos de colunas vórtices girando em torno de um centro de gravidade comum[57] .

Em seu primeiro livro, publicado em 1883 - *A Treatise on the Motion of Vortex Rings*, J. J. Thomson aplicou a teoria do átomo vortex ao problema das combinações químicas. Nesse trabalho usou a regra da máxima simplicidade de Dalton, assim como sua terminologia. Mencionou também os imãs flutuantes de Mayer. Thomson sugeriu que a valência de um átomo corresponde ao número de anéis vórtices do qual ele é composto. Apontou o número máximo de vórtices e também que a máxima capacidade de combinação dos átomos químicos seria seis[58]. Nesse livro, Thomson procurou explicar a natureza da matéria e suas propriedades elétrica e química sob o

---

[54] Os fundamentos matemáticos da Teoria Vortex foram estabelecidos por Hermann von Helmhontz, em 1858. Lord Kelvin deu um tratamento físico à teoria a partir do final dos anos 1860. Físicos britânicos foram atraídos por esse modelo simples da matéria atômica – uma concentração de éter girando como um anel de fumaça no ar. Apreciador de modelos mecânicos, Thomson adotou o modelo, publicando artigos sobre o tema, em 1879 e 1882, bem como seu primeiro livro em 1883. (David R. Topper, "'To reason by means of images': J. J. Thomson and the mechanical picture of nature." *Annals of Science* 37 (1980): 31-57, nas pp. 41-42).

[55] Peter Guthrie Tait, co-autor com Balfour Stewart, do livro "The Unseen Universe" introduziu na Inglaterra as análises de movimentos vórtices em fluidos perfeitos desenvolvidas por Hermann von Helmholtz (Chayut, "J. J. Thomson: the discovery of the electron and the chemists," p. 532).

[56] Mayer encontrou experimentalmente que imãs flutuando em um líquido sob ação de campo magnético, com polaridade oposta, se dispõe em anéis concêntricos em torno de um centro comum. (*Ibid,* p. 533).

[57] *Ibid.*

[58] *Ibid.*

ponto de vista da hidrodinâmica. Este trabalho, escrito para o Prêmio Adams de 1882, apresentou várias idéias que reapareceram muitas vezes durante sua vida[59]

Segundo Thomson, o modelo vortex "era de uma simplicidade espartana"[60]. Nesse modelo, toda a matéria do universo era constituída desse fluído perfeito incompressível, e as propriedades da matéria eram devidas à movimentação deste fluído - o Éter. Os movimentos eram regidos pelas leis da hidrodinâmica e por conseqüência toda a Física poderia ser solucionada com uma série de equações diferenciais[61].

Apesar da complexidade matemática das equações diferenciais envolvidas na compreensão da teoria vortex, Thomson procurou enfatizar sua simplicidade. Os anéis vórtices não seriam controlados por forças. Eles obedeciam às leis da hidrodinâmica, atração e repulsão. Eram consideradas apenas como resultado das propriedades hidrodinâmicas[62].

Estas características da teoria vortex eram devidas à existência do Éter e de seu movimento e se prestavam muito bem às representações mentais que Thomson estava acostumado e podem tê-lo conduzido aos primeiros trabalhos com tubos de descarga[63].

Em 1883 Thomson iniciou sua investigação experimental com condução de eletricidade por gases, aplicando a teoria do átomo vortex à combinação química e o modelo Clausius-Williamson.

---

[59] Jaume Navarro, "J. J. Thomson on the nature of matter: corpuscles and continuum". *Centaurus* 47 (2005): 259-282, na p. 259.
[60] Thomson, *Recollections and reflections,* p. 94.
[61] Navarro "J. J. Thomson on the nature of matter: corpuscles and continuum", p. 259.
[62] Topper, "'To reason by means of images': J. J. Thomson and the mechanical picture of nature", pp. 42-43.
[63] G. Thomson, "J. J. Thomson and the Discovery of the Electron", p. 290.

A teoria dos átomos vortex enfrentou críticas, principalmente de Wilhelm Ostwald e Arthur Schuster. Além disso, não trazia mais as respostas que Thomson procurava. Pode-se dizer que o início da década de 1890 foi propício às mudanças teóricas. Nesse período, Thomson passou a enfatizar teorias não-matemáticas e pictóricas, no caminho contrário da geração de jovens físicos que buscavam uma disciplina mais formal e matemática.[64]

Thomson publicou em 1893 *Recent Researches in Electricity and Magnetism.* um suplemento do *Tratado de eletricidade e magnetismo* de Clerk Maxwell. O trabalho de Maxwell tinha respeitabilidade internacional e a produção do suplemento produzido por Thomson parece ter levado sua fama além das fronteiras da Inglaterra provocando a afluência de jovens pesquisadores estrangeiros no Laboratório Cavendish, para trabalhar sob sua orientação. Dentre eles, podemos destacar Ernest Rutherford (Nova Zelândia), John S. Townsend (Irlanda), John A. McClelland (Irlanda), John C. McLennan (Canadá), Paul Langevin (França) entre outros. Cabe destacar também, a boa recepção das contribuições de Thomson por parte dos físicos e químicos estadunidenses, o que o levou por várias vezes aos Estados Unidos da América.[65]

2.2.2. GIROSTATOS

De acordo com seu filho George P. Thomson, J. J. "durante toda sua vida foi atraído pela idéia dos tubos de força, os tubos de Força de Faraday"[66]. Essa teoria foi a base do artigo publicado em 1895 por J. J. Thomson – *The*

---

[64] Chayut, "J. J. Thomson: the discovery of the electron and the chemists," p. 534.
[65] Lord Rayleigh "Joseph John Thomson. 1856-1940." *Obituary Notices of Fellows of the Royal Society* 3 (10, December 1941): 586-609, na p. 590.
[66] G. Thomson, "J. J. Thomson and the Discovery of the Electron", p. 293.

Relation betweem the Atom and the Charge of Electricity carried by it - onde descreveu um novo modelo de estrutura atômica e combinação química. Os átomos eram compostos por pequenos girostatos, e o sentido do giro destes conferia carga positiva ou negativa ao átomo. Quando os girostatos giravam no mesmo sentido que um tubo de Faraday, o átomo tinha um sistema que favorecia à aquisição de uma carga positiva, como o hidrogênio. Por outro lado, átomos em que os girostatos interiores giravam na mesma direção de tubos Faraday tendiam a adquirir uma carga negativa[67]

Este modelo teve uma vida curta, mas estabeleceu a trilha definitiva que levaria aos experimentos e cálculos desenvolvidos em 1897 para determinar a razão entre carga e massa das partículas negativas dos átomos.

2.2.3. O ÁTOMO DE 1904 - CORPÚSCULOS - ELÉTRONS

Em 1895 Thomson enfatizou que a chave para entender valência e propriedades periódicas era valorizar as estruturas subatômicas em detrimento das leis derivadas do campo de observações macroscópicas[68]. Esta linha de investigações o levou a publicação em 1897 do artigo – "On the Cathode Rays" - que lhe valeu o prêmio Nobel, em 1906.

Nesse momento, Thomson partiu de dois pontos cruciais para estabelecer suas investigações: "Eles são, primeiro, a idéia de uma unidade natural da carga elétrica, e segundo, da existência de partículas eletrizadas muito levemente na estrutura da matéria".[69]. Cabe destacar que o primeiro deriva dos trabalhos de Faraday em eletrólise e o segundo, dos trabalhos com tubos de descarga de gases.

---

[67] Chayut, "J. J. Thomson: the discovery of the electron and the chemists," p. 536.
[68] *Ibid.*
[69] G. Thomson, "J. J. Thomson and the Discovery of the Electron", p. 289.

Em 1897 os raios catódicos já eram bastante conhecidos, todavia a explicação sobre sua constituição ainda era bastante controversa. Os cientistas, em diferentes países, tinham diferentes explicações. Os alemães acreditavam que os raios catódicos eram um tipo de onda, os franceses e ingleses em sua maior parte acreditavam que esses raios eram constituídos de partículas[70]

Thomson, como bom inglês que era, acreditava nas partículas e se alinhava com outros trabalhos que vinham sendo desenvolvidos com raios catódicos na Inglaterra. Qual seria então a novidade do trabalho desenvolvido por Thomson?

Podemos identificar a diferença de seu artigo de 1897 em relação a seus trabalhos anteriores sobre o tema pelos experimentos e dados coletados. Ele testou tubos contendo 4 diferentes gases e utilizou 3 metais diferentes na constituição dos eletrodos chegando sempre aos mesmos valores para a razão *m/e*[71], postulando assim que todos os elementos químicos são constituídos de um constituinte universal que levariam à determinação de uma massa, para esse constituinte, mil vezes menor que a massa conhecida do átomo de hidrogênio.

As confirmações das medidas realizadas por Thomson foram sendo apresentadas em outros experimentos, como a medida simultânea de *m/e* e *e* para partículas fotoelétricas (agora chamadas elétrons) em 1899[72], bem como nos experimentos de Robert Milikan (1868-1953) nos Estados Unidos, já no século XX.

---

[70] G. Thomson, "J. J. Thomson and the Discovery of the Electron", p. 291.
[71] *Ibid*, p. 292.
[72] *Ibid*.

Para os objetivos desta investigação é importante destacar que o artigo de 1897 sobre os raios catódicos, já mencionava o trabalho com os espectros estelares desenvolvido por Sir Joseph Norman Lockyer (1836-1920)[73]. Isso indica que Thomson tinha conhecimento dos trabalhos que vinham sendo desenvolvidos no campo da astroquímica, deixando claro que fazia conexões entre as pesquisas desenvolvidas para modelos em átomos terrestres e celestes.

Nesse artigo, Thomson defendeu que todos os elementos químicos deviam ser constituídos por uma substância primordial. Independente do elemento, os átomos seriam constituídos pelo mesmo tipo de corpúsculos. Thomson já tinha começado a trilha que o levaria a proposição de seu modelo atômico em 1904, apresentando no artigo de 1897 possíveis modelos para a distribuição dos corpúsculos no átomo. Nesse sentido, ele tomou como referência os imãs flutuantes de Mayer já utilizados no átomo vortex, enfatizando que essa distribuição deveria ter conexão com a Lei Periódica[74].

A preocupação acerca da relação entre matéria e eletricidade, tornou-se constante em suas investigações. No Prefacio do livro *Electricity and Matter*, escrito em 1903 e publicado em março de 1904 pela Universidade de Yale – EUA. Thomson afirmou:

> Uma característica comum das recentes Pesquisas em eletricidade, tais como o estudo e descoberta dos raios Catódicos e Röntgen e substâncias radioativas, tem sido a especial atenção

[73] Joseph J. Thomson "Cathode Rays" *Philosophical Magazine [5]* 44 (7 aug. 1897): 293-316. [facsimile from Stephen Wright, Classical Scientific Papers, Physics (Mills and Boon, 1964).].
[74] *Ibid.*

> às pesquisas que têm envolvido a relação entre Matéria e Eletricidade[75].

É nesse livro, publicado em 1903, que as idéias de Thomson sobre a constituição atômica da matéria e da relação entre matéria e eletricidade se apresentam claramente como se pode perceber na citação que se segue:

> qualquer carga é constituída por um número finito de cargas individuais, todas iguais: assim, na teoria atômica da matéria uma quantidade de hidrogênio é constituída por uma série de pequenas partículas chamadas átomos, todos os átomos são iguais uns aos outros.[76]

Nessa obra aparecem os detalhes do caminho de idéias que levaram Thomson a propor o modelo de átomo logo em seguida.

Dentre as escolhas de Thomson, a utilização do átomo de hidrogênio como base para a constituição de todos os outros átomos não é uma novidade. Qualquer semelhança com as idéias de Prout não é uma coincidência, uma vez que Prout sugeriu que todos os elementos poderiam ser formados por condensação do Hidrogênio[77]. Para Thomson: “As Cargas encontradas são sempre um múltiplo inteiro da carga carregada pelo átomo de hidrogênio; nunca encontramos partes fracionárias desta carga”[78]. Cabe destacar que no

---

[75] Joseph .J Thomson, *Electricity and matter*. (New: York: Charles Scribner’s Sons, 1904), p. 1.
[76] *Ibid*, p. 71.
[77] Holmyard, *British Scientists*, p. 73.
[78] Thomson, *Electricity and matter*, p. 73.

artigo sobre os raios catódicos, de 1897, Thomson já havia citado o trabalho desenvolvido por Prout.

As investigações e publicações sobre os átomos e corpúsculos se sucederam. Em 1903, após ter medido a carga e massa do elétron, desenvolvido a teoria eletrônica dos metais, Thomson investigou de que modo o elétron participava do ímã de Mayer[79]. Thomson retomou a questão de distribuição dos corpúsculos e em dezembro publicou mais um artigo no *Philosophical Magazine,* "*The Magnetic Properties of Systems of Corpuscles describing Circular Orbits*", onde descreveu uma série de propriedades dos corpúsculos em movimento.

Essa trilha o levaria, finalmente, em 1904 a publicar no *Philosophical Magazine* o artigo: "On the structure of atom: an investigation of the stability and periods of oscillation of a number of corpuscles arranged at equal intervals around the circumference of a circle; with application of the results to the theory of atomic structure", que se tornou referência obrigatória no período, bem como na história dos modelos atômicos. Esse artigo sintetizava suas idéias sobre o átomo constituído pelos corpúsculos:

> A idéia que os átomos dos elementos consistem em um número de corpúsculos eletricamente negativos englobados numa esfera uniformemente positiva, sugere, dentre outros problemas matemáticos interessantes, o único discutido nesse artigo – o

[79] A teoria eletrônica dos metais de Thomson serviu de base para o desenvolvimento da Tese de Doutorado de Niels Bohr, e parece ter sido um dos principais motivos que levaram Bohr a procurar Thomson para realizar um estágio no Laboratório Cavendish em 1911, após a conclusão de seu doutorado em Copenhague. (Heilbron, "J. J. Thomson and the Bohr atom," p. 23).

movimento de um anel com *n* partículas eletricamente negativas localizado numa esfera eletrificada uniformemente [80].

Este modelo de átomo provavelmente foi, provavelmente, o mais relevante do início do século XX, principalmente para os químicos, até a proposta de Bohr.

O Modelo de Thomson não discutia sobre constituintes positivos do átomo e supunha que os corpúsculos ligados circulavam em anéis coplanares dentro de uma esfera uniformemente positiva. Este modelo tinha uma vantagem sobre modelos nucleares, que haviam surgido no período – a estabilidade mecânica: "Quando em equilíbrio os *n* corpúsculos estão distribuídos a intervalos angulares iguais numa circunferência de raio *a*, cada corpúsculo carregado negativamente com uma carga *e*"[81].

Thomson supôs que os elétrons fossem responsáveis por toda ou pela maior parte da massa do átomo: "Nós supomos que a massa de um átomo é a soma das massas dos corpúsculos que ele contém, assim, o peso atômico de um elemento é medido pelo número de corpúsculos nesse átomo"[82]. Mais adiante Rutherford, nas experiências de espalhamento de partículas α, chegou a valores que podem ser considerados mais próximos dos atuais, ou seja, que o número de elétrons é aproximadamente igual à metade da massa atômica de um elemento.

---

[80] Joseph J. Thomson, "On the structure of atom: an investigation of the stability and periods of oscillation of a number of corpuscles arranged at equal intervals around the circumference of a circle; with application of the results to the theory of atomic structure." *Philosophical Magazine [6]* 7 (39, março 1904): 237-265, na p. 237.
[81] Thomson, "On the structure of atom…", p. 258.
[82] *Ibid.*

Para determinar o arranjo dos corpúsculos nos anéis do átomo Thomson utilizou, mais uma vez, a analogia dos imãs flutuantes investigados por Alfred Mayer. Em suas palavras:

> O problema da disposição dos corpúsculos é descobrir como um certo número de corpos que se repelem mutuamente com forças inversamente proporcionais ao quadrado da distância entre elas irão organizar-se quando sob a ação de uma força atrativa que tende a arrastá-los para um Ponto fixo. Para o método experimental, os corpúsculos são substituídos por agulhas magnetizadas fixadas em discos de cortiça e flutuando em água. Devem ser tomados cuidados para que as agulhas sejam igualmente magnetizadas. Essas agulhas, tendo os seus pólos todos apontando na mesma direção, repelem-se mutuamente como os corpúsculos. A força atrativa é produzida por um grande imã colocado acima da superfície da água, sendo o pólo inferior deste ímã de sinal oposto ao sinal superior dos pólos dos ímãs flutuantes.[83]

A partir dos resultados obtidos nos experimentos de Mayer, Thomson procurou desenvolver cálculos que justificassem a estabilidade de distribuição semelhante para os corpúsculos no átomo. Considerando as cargas presentes no átomo, a massa dos corpúsculos, as dimensões do átomo e o número de corpúsculos presentes num átomo, Thomson pôde calcular a freqüência de

[83] Joseph J. Thomson, *The corpuscular theory of matter*. London: Archibald Constable, 1907. 2ª. Impressão, p. 110.

oscilação do sistema, estabelecendo as condições de estabilidade do anel com *n* corpúsculos. Um único anel com mais de 5 corpúsculos é instável pois o resultado do cálculo da freqüência para *n*>5 é um número não real, e encontrou que um único corpúsculo no centro da esfera seria suficiente para dar estabilidade a anéis de 7 e 8 corpúsculos [84].

As investigações de Thomson indicavam que a distribuição dos corpúsculos ocorria em anéis concêntricos e coplanares e confirmavam que "a carga positiva da esfera é igual à soma de todas as cargas negativas no anel de corpúsculos"[85]. Quando os corpúsculos não ficam restritos a um plano e podem movimentar-se em todas as direções, organizam-se em "cascas" (*shells*) concêntricas. Os corpúsculos assim distribuídos não estarão em equilíbrio estável. Se *n* for grande, o equilíbrio pode ser atingido introduzindo o número de corpúsculos necessários no interior. Analítica e geometricamente os problemas são grandes considerando arranjos em "cascas"[86].

Thomson desenvolveu seus cálculos para determinar a distribuição dos corpúsculos de forma que:

> Quando *p* [número de corpúsculos interiores] é maior do que um, os corpúsculos internos necessários para produzir equilíbrio não podem estar todos no centro da esfera, eles se separarão por suas repulsões equilibradas pela atração da eletricidade positiva na esfera. Assim, quando há dois corpúsculos internos, como quando *n* = 9 [número de corpúsculos no anel exterior], estes dois estarão separados e formarão um par com a linha que os liga,

[84] Thomson, "On the structure of the atom...", p. 253.
[85] *Ibid*, p. 238.
[86] *Ibid*, p. 255.

> paralela ao plano do anel. Se formos pensar, como é aproximadamente o caso, que o par de corpúsculos iguais exerce, sobre pontos externos, a mesma força como se fosse uma carga dupla colocada no ponto médio entre elas, a teoria anterior, é aplicável, bem como o sistema constituído pelo anel de 9 e o par de corpúsculos estará em equilíbrio estável. Quando *n* = 10, os corpúsculos internos devem ser em número três, que irão organizar-se nos vértices de um triângulo equilátero, um sistema de 13 corpúsculos será composto por um anel de 10 e um triângulo de 3, os planos do anel e do triângulo serão paralelos, mas não coincidentes; os corpúsculos estão todos, supostamente, em rápida rotação ao redor do diâmetro da esfera traçada perpendicularmente ao plano do anel. Para um anel de 12 corpúsculos, necessitamos 7 no interior, mas 7 corpúsculos, como vimos, não podem formar um único anel, mas se organizarão como um anel de 6 com um no centro. Assim, o sistema de 19 de corpúsculos será composto de um anel externo de 12, um anel interno de 6 em um plano paralelo ao anel externo, e um corpúsculo, ao longo do eixo rotação[87].

A realização dos cálculos para determinar a estabilidade para o sistema permitiu a Thomson propor a distribuição eletrônica em átomos com número muito grande de elétrons. Não podemos esquecer de que, para ele, o

[87] Thomson, “On the structure of the atom...”, p. 254.

átomo era formado por um número muito grande de corpúsculos em movimento.

> Temos, portanto, em primeiro lugar uma esfera com carga elétrica positiva uniforme, e dentro dessa esfera um número de corpúsculos dispostos em uma série de anéis paralelos. O número ou corpúsculos em um anel varia de anel para anel: cada corpúsculo está viajando em alta velocidade em torno da circunferência do anel em que está situado, e os anéis estão organizados de forma que aqueles com um grande número de corpúsculos estão próximos da superfície da esfera, enquanto aqueles em que há um menor número de corpúsculos estão mais para o interior[88]

Podemos perceber aqui que, por motivos de estabilidade eletrodinâmica, Thomson apresentou uma distribuição inversa dos modelos de Rutherford-Bohr e Nicholson, que propunham, de forma geral, um núcleo positivo e anéis interiores com mais elétrons que o anel exterior.

Para melhor compreensão da distribuição proposta por Thomson, reproduzimos aqui a tabela de distribuição dos corpúsculos que foi publicada no artigo que ora discutimos:

[88] Thomson, “On the structure of the atom...”, pp. 254-255.

Number of corpuscles	60.	55.	50.	45.	40.	45.
Number in successive rings	20	19	18	17	16	16
	16	16	15	14	13	12
	13	12	11	10	8	6
	8	7	5	4	3	1
	3	1	1			
Number of corpuscles	30.	25.	20.	15.	10.	5.
Number in successive rings	15	13	12	10	8	5
	10	9	7	5	2	
	5	3	1			

Fonte: J.J. Thomson, "On the Structure of the Atom: an Investigation of the stability and Periods of oscillation of a Number of corpuscles arranged at equal intervals around the Circumference of a Circle; with Application of the Results of the Theory of atomic Structure", *Philosophical Magazine* 7 (1904), p. 257.

Como já discutimos anteriormente, Thomson tinha uma preocupação muito grande com o "átomo químico" procurando explicar através de suas propostas as propriedades físicas e químicas dos elementos, suas propriedades espectroscópicas, bem como com a lei periódica. Thomson já vinculava os espectros dos elementos às vibrações dos corpúsculos no átomo e a existência de semelhanças entre espectros de elementos de um mesmo grupo da Tabela Periódica. Assim, de acordo com o autor, para estas vibrações, bem como para aquelas devidas às rotações, a seqüência de freqüências apresentaria as mesmas características para os diversos elementos da série. Ele acrescentou ainda que a mudança gradual nas propriedades dos elementos que ocorre à medida que nos deslocamos ao longo das linhas horizontais na distribuição de Mendeleev, é também ilustrada pelas propriedades desses grupos de corpúsculos[89].

[89] Thomson, "On the structure of the atom...", p. 259.

O artigo detalha a formação de grupos de acordo com o número de elétrons no último anel, associando esses grupos aos apresentados na tabela de Mendeleev, procurando explicar as propriedades químicas, principalmente a valência dos elementos através de seu modelo atômico. Segundo Thomson, quando átomos eletronegativos, onde os corpúsculos estão muito estáveis, são misturados com átomos eletropositivos, onde os corpúsculos não estão firmemente presos, as forças sob as quais os corpúsculos ficam submetidos pela ação de um átomo sobre o outro fazem com que ocorra perda de corpúsculos pelos átomos eletropositivos e ocasionam sua transferência para os eletronegativos. Os átomos eletronegativos adquirem uma carga elétrica negativa, e os átomos eletropositivos uma carga positive. Áomos com cargas opostas atrairão um ao outro. É assim que se forma um composto químico com os átomos eletropositivos e eletronegativos [90]

Podemos dizer que, apesar da diferença na forma de distribuição dos corpúsculos em relação à considerada atualmente, o modelo de ligação química apresentado por Thomson nesse momento está muito próximo do modelo de ligação iônica utilizado pelos químicos atualmente.

Além das questões de valência e ligação química discutidos no artigo, Thomson também procurou explicar os fenômenos radioativos. Considerando as propriedades de um átomo que contém um sistema de corpúsculos deste tipo [modelo átomo] e supondo que os corpúsculos estão inicialmente em movimento com velocidades muito superiores à velocidade crítica; em consequência da radiação devida ao movimento dos corpúsculos, Thomson explicou que suas velocidades vão diminuindo muito lentamente. Após um

[90] Thomson, “On the structure of the atom...”, pp. 262-263.

longo intervalo, a velocidade chega ao que seria equivalente a uma explosão de corpúsculos. Os corpúsculos se distanciam de suas posições originais, sua energia potencial diminui, enquanto sua energia cinética aumenta. Ocorre a ejeção de uma parte do átomo, como no caso do rádio[91].

Levando em consideração o conhecimento dos campos da física das partículas, radioatividade, ligação química, espectroscopia entre outros demonstrados pelas publicações de Thomson, assim como a realização de experimentos e complexos cálculos matemáticos e pensando em modelos que se tornarão hegemônicos a partir da metade da segunda década do século XX, podemos fazer a seguinte pergunta: Será que Thomson nunca pensou no átomo nuclear?

Sem dúvida, essa deve ter sido uma de suas opções, seja pensando o modelo saturniano proposto por Nagaoka ou outras variantes. Todavia, esses modelos nucleares sempre apresentariam instabilidade do ponto de vista de eletrodinâmica convencional, que era o referencial básico para Thomson e para a maioria dos cientistas ao redor do mundo. Nesse mundo da eletrodinâmica clássica o modelo proposto por Thomson (a carga positiva ocupando o volume total do átomo) tornou-se um marco para o desenvolvimento das ciências que precisavam de um modelo de átomo para “avançar” e construir novos conhecimentos.

Após a publicação do artigo em que propôs seu modelo de átomo em 1904, Thomson continuou suas investigações. Em 1907 publicou o livro *Corpuscular Theory of Matter.* Neste livro teve como hipótese principal o modelo de átomo proposto no artigo de 1904, detalhando suas concepções

---

[91] *Ibid*, p. 265.

através de exemplos, analogias e representação gráfica, inclusive, apresentando a distribuição eletrônica para átomos de 1 a 100 corpúsculos.

Nesse livro, também, apresentou um capítulo específico para combinação química, onde fez o detalhamento de como podem acontecer ligações químicas, troca de corpúsculos, valência, eletronegatividade e eletropositividade. Thomson comentou: “Um assunto muito importante e interessante para investigação é a natureza das forças que seria exercida entre grupos de corpúsculos e sua aplicação à teoria da combinação química”[92] .

O autor apresentou claramente a idéia de equilíbrio de átomos isolados através da ligação com outro átomo e enfatizou que as propriedades dos átomos se estabelecem a partir da relação entre eles. Ele explicou:

> Os termos eletronegatividade e eletropositividade são apenas relativos, e um elemento pode ser eletropositivo para uma substância e eletronegativo para outra. De acordo com as considerações anteriores a valência de um elemento quando ele atua como o constituinte eletronegativo de um composto pode ter uma forma de valência muito diferente quando atua como constituinte eletropositivo. . . . Vemos que deste ponto de vista a valência de um elemento não é uma quantidade constante; depende de saber se o elemento é o constituinte eletropositivo ou eletronegativo do composto...”[93] .

2.3. ALGUMAS CONSIDERAÇÕES

[92] Thomson, *The corpuscular theory of matter*, p. 120.
[93] Thomson, *The corpuscular theory of matter*, pp. 126-127.

As questões desenvolvidas por Thomson repercutiram fortemente no desenvolvimento da química. Os modelos de ligação e reação química nesse período foram, em sua maioria, construídos a partir das idéias iniciais de Thomson. Enquanto que, no campo da física das partículas, se aprofundava o detalhamento da estrutura atômica, principalmente com a introdução da teoria quântica, na química essas idéias ainda eram infrutíferas. O modelo mecânico de Thomson, composto por corpúsculos que regiam as ligações químicas, representou um valioso instrumental para a construção de modelos explicativos, principalmente em áreas da química como a físico-química e química orgânica. Um dos principais alicerces da química orgânica na segunda década do século XX foi a nova teoria de ligação química que se desenvolveu para compostos "apolares", principalmente nos trabalhos publicados por G. N. Lewis.

O caminho de pesquisa percorrido por Thomson foi um dos mais ricos na História da Ciência. No campo das teorias atômicas, ele teve a habilidade de conciliar teorias tão diferentes como as teorias do Éter e teorias corpusculares. Em seus primeiros trabalhos utilizou as idéias de Lord Kelvin, que tinham base na existência do Éter, incorporou as discussões de eletricidade de Faraday e o eletromagnetismo de Maxwell, bem como analogias com as idéias de Prout (átomo de H primordial) e Mayer (imãs flutuantes) e nos seus trabalhos em 1913[94]-1914 discutiu a influência de Planck, aceitando o átomo nuclear e propondo um modelo de ligação química que diferencia compostos polares e apolares.

[94] Em um manuscrito de 96 páginas escrito em 1913, Thomson ainda utilizava o termo "corpúsculo" em sua primeira versão e anotações substituindo-o na versão final, pelo termo "elétron" (F.51 e F.52) *Wren Library. Trinity College.* J.J. Thomson, F.51; F52.

É importante destacar que Thomson teve uma brilhante carreira acadêmica fora dos laboratórios, ou seja, em cargos de administração no *Trinity College*, Universidade de Cambridge e liderou, sob a indicação do primeiro-ministro, a construção de uma Proposta Curricular para o Ensino de Ciências para Educação Básica, Técnica e Universitária entre os anos 1916-1918[95].

Nesse contexto, é impossível pensar em Thomson apenas como o "descobridor da relação *m/e* do elétron" ou como autor do modelo do "pudim de passas"[96]. Thomson foi um dos protagonistas dessa história. Sua preocupação com o "átomo químico" levou ao aprofundamento das relações entre estrutura da matéria e transformações químicas, fornecendo uma base sólida para o desenvolvimento de outras teorias no campo da química, que têm importância teórica, experimental e pedagógica até os dias de hoje, mesmo após o desenvolvimento da química quântica.

---

[95] Nomeação do Parlamento Britânico para presidir o Comitê de reestruturação do ensino de ciências. *Wren Library. Trinity College.* J.J. Thomson, E.21; E.22.

[96] Cabe destacar que essa analogia é bastante equivocada e representa um modelo de átomo estático, absolutamente contraditório com o modelo dinâmico proposto por Thomson.

CAPÍTULO 3

A PROPOSTA DE NAGAOKA

De forma geral, o primeiro modelo atômico com núcleo abordado nos livros de Química e Física, e muitas vezes também nos textos de História da Ciência foi o proposto por Ernest Rutherford em 1911. Todavia, essa discussão já existia em períodos anteriores à proposta de Rutherford . Aqui destacaremos o modelo proposto pelo físico Hantaro Nagaoka (1865-1950), em 1903 no Japão e apresentado à comunidade científica ocidental em um artigo publicado em 1904 no *Philosophical Magazine*[97]*.* Esse artigo e uma série de outros publicados no Japão e na revista *Nature* detalharam o modelo atômico nuclear, chamado Saturniano, proposto por Nagaoka.

3.1. NAGAOKA E A CIÊNCIA NO JAPÃO

Hantaro Nagaoka[98], um dos mais respeitados cientistas do Japão, nasceu em Nagasaki em 15 de agosto de 1865 e morreu em Tóquio em 11 de dezembro de 1950. Nagaoka teve toda sua formação e o início de suas atividades de pesquisa no Japão na Era Meiji[99]. Graduou-se em Física na Universidade de Tóquio, em 1887 e atuou como professor na mesma Universidade entre 1900 e 1925, sendo considerado um pioneiro em promover

---

[97] O *Philosophical Magazine* era um dos periódicos mais importantes na área das ciências físicas no período, tendo entre seus editores J.J. Thomson e Ernest Rutherford.

[98] Para mais informações biográficas ver Eri Yagi, " Nagaoka, Hantaro". *In*: Charlton Coulston Gillispie (org.), *Dictionary of Scientific Biography* (New York: Charles Scribner's Sons, 1981). Pp. 606-607.

[99] Era Meiji (1867 – 1912) foi o período em que o Japão foi governado pelo Imperador Mutsuhito (1852-1912), também chamado Meiji.

a Física no Japão. Desenvolveu pesquisas sobre estrutura atômica, geofísica, física-matemática, espectroscopia e ondas de rádio.[100]

Durante a vida de Nagaoka, o Japão viveu um período de grandes transformações que propiciaram o desenvolvimento de uma 'nova ciência' e a formação de cientistas como ele. Nesse período, aconteceu a chamada Restauração Meiji, que restabeleceu o poder absoluto ao imperador e o fim do regime feudal japonês (Shogunato) que durou mais de 250 anos, abrindo o caminho para o desenvolvimento 'ocidentalizado' do Japão.

As transformações políticas, econômicas e sociais foram profundas e rápidas desde 1853 com a chegada de uma esquadra naval americana[101], comandada pelo Comodoro Matthew Calbraith Perry (1794-1858). Enviado pelo presidente americano Millar Fillmore (1800-1874), seu objetivo era fazer tratados de comércio com o Japão. Pressionado pelo poderio estadunidense, o último Shogun assinou, em 1854, o tratado de Kanagawa abrindo portos ao comércio estadunidense. Seguiram-se tratados semelhantes com Rússia, Inglaterra e França encerrando um longo período de isolamento do Japão e iniciando um período de modernização-ocidentalização acelerado[102].

Com o final do Shogunato, o novo Estado centralizador teve autonomia para intervenção na economia, abrindo o Japão para o capitalismo, investindo na industrialização, importando mão-de-obra estrangeira, criando universidades e afirmando-se politicamente com a abolição dos direitos feudais sobre a terra e as pessoas em 1869, o fim dos clãs em 1871 com a promulgação da primeira

---

[100] Eri Yagi, "Research group of the committee for the publication of Hantaro Nagaoka's biography." *Japanese Studies in the History of Science* 10 (1971): 23-24, na p. 23.

[101] Os navios de Guerra estadunidenses, feitos de aço, foram chamados de *Kurofune* – navios negros – pelos japoneses acostumados a ver apenas navios feitos de madeira (Hideomi Tuge, *Historical development of science and technology in Japan: series on japanese life and culture*, vol. 5 (Tóquio: Kokusai Bunka Shinkokai, 1961): 89-137, na p. 89.

[102] Hideomi Tuge, Historical development of science and technology in Japan: series on japanese life and culture, vol. 5 (Tóquio: Kokusai Bunka Shinkokai, 1961): 89-137, nas p. 89-90.

constituição japonesa em 1889, que estabeleceu uma monarquia constitucional[103].

Em cerca de meio século, o Japão promoveu o estabelececimento de infra-estrutura comercial, industrial, de transporte, de energia e educação. Fortalecendo a sua economia, passou de um país feudal em meados do século XIX à grande potência capitalista na Ásia do início do século XX. Na Era Meiji também surgiram os grandes conglomerados empresariais originados nos clãs familiares (Mitsubishi, Mitsui, Sumitomo, Yasuda, entre outros) em atuação até hoje[104].

Os investimentos na área de ciência e tecnologia, na Era Meiji, demandaram a importação de técnicos para a construção de ferrovias, instalação de um sistema de energia, desenvolvimento da mineração e da construção civil, bem como a telegrafia, ou seja, a construção da infra-estrutura necessária ao Japão para aproximar-se dos países ocidentais desenvolvidos.

Centros educacionais em ciência e tecnologia foram criados, para a transposição da ciência ocidental para o Japão, e demandaram também a presença de professores estrangeiros para comandar esse processo. Alguns desses centros deram origem a Universidade de Tóquio, que foi fundada em 1877, com os departamentos de Direito, Ciência, Literatura e Medicina. Em 1886 foi proclamada Universidade Imperial tendo o compromisso com o governo e nação japonesa: “O objetivo da Universidade Imperial deve ser ensinar e estudar as ciências e artes práticas assim como satisfazer as

---

[103] Tuge, *Historical development of science and technology in Japan: series on japanese life and culture*, p. 93.
[104] *Ibid*, p. 97.

demandas do Estado”[105]. A pós-graduação também teve início, ocorrendo a titulação dos primeiros 2 grupos de 25 doutores (10 em cada área: direito, literatura, ciência, engenharia e medicina), em 1888 . Cabe destacar o papel preponderante que essa Universidade teve para o desenvolvimento da ciência ocidental no Japão[106]. Nesse período também foram fundadas as Universidades Imperiais de Tohoku, Kyushu e Hokkaido .

Nagaoka teve sua formação acadêmica nessa Universidade dominada pela ciência e professores ocidentais. As primeiras investigações de Nagaoka foram sobre magnetização e magnetoestrição sob orientação do físico britânico Cargill Gilston Knott (1856-1922), que atuou no Japão entre 1883 e 1891. Os primeiros artigos[107] sobre a magnetização de metais submetidos a diferentes situações demonstram que Nagaoka tinha conhecimento dos trabalhos de Thomson sobre o tema, e também apontavam que existia relação entre a estrutura das ‘moléculas’ metálicas e as propriedades investigadas. Destacamos que os estudos desenvolvidos nesse período, de forma geral, tinham aplicações práticas na indústria nascente japonesa.

A apropriação da ciência ocidental também se deu pelo envio de estudantes japoneses ao exterior, em 1872 aproximadamente 380 japoneses estudavam fora do Japão[108] bem como pela tradução de livros para uso nas escolas de tecnologia e universidade criadas.

---

[105] Tuge, *Historical development of science and technology in Japan: series on Japanese life and culture,* p 101.
[106] Mitsutomo Yuasa, “History of science and technology in Japan.” *Japanese Studies in the History of Science* 10(1971): 1-16, na p. 6.
[107] Hantaro Nagaoka, “Combined effects of the Torsion and Longitudinal stress on the magnetization of Nickel. Tokyo Sugaku-Butsurigaku kwai Kiji (Journal of the Physical Society of Japan). 4 (2, 1888): 44-47; “On the magnetization and retentiveness of nickel wire under combined torsional and longitudinal stresses”. Tokyo Sugaku-Butsurigaku kwai Kiji (Journal of the Physical Society of Japan) 4 (2, 1888): 47-49.
[108] Tuge, *Historical development of science and technology in Japan: series on Japanese life and culture,* p. 100.

Nagaoka foi um dos cientistas que, após concluir seu doutorado, partiu para o exterior para se aprofundar, *in loco*, na ciência ocidental. Ele foi para a Universidade de Berlim em 1893 e logo em seguida, em 1894, para Universidade de Munique onde estudou com Ludwig Boltzmann. Essa política científica japonesa teve como objetivo formar uma elite de cientistas para assumir o lugar dos professores estrangeiros na Universidade e garantir o desenvolvimento de ciência e tecnologia independente dos países ocidentais. Política semelhante também foi adotada, desde o início dos anos de 1880, para a substituição dos técnicos estrangeiros por técnicos formados na Universidade de Tóquio e da Faculdade Técnica de Tóquio[109].

No programa de substituição dos professores ocidentais, Nagaoka retornou ao Japão assumindo como professor no Departamento de Física da Universidade de Tóquio, entre 1900 e 1925, sendo responsável pela pesquisa em Física e pela formação de novas gerações de físicos japoneses.

Além das universidades, seguindo o modelo ocidental também foram criadas, nessa era, sociedades científicas para promover o desenvolvimento da ciência e tecnologia. A primeira foi a Sociedade de Matemática de Toquio (*Toio Sügaku Kaisha*) fundada em 1877 e transformanda em Sociedade de Física e Matemática, em 1884.

A Sociedade de Química de Tóquio (*Toio Kagaku Kai*) e a Sociedade de Química Industrial (*Nihon Kögio Kagaku Kai*) foram fundadas na Era Meiji. A primeira iniciou em 1878 com 26 membros que chegaram a aproximadamente 20.000 após a Segunda Guerra Mundial com as fusão das duas sociedades.

[109] Yuasa, “History of science and technology in Japan”, p. 9.

Essas sociedades promoveram o grande desenvolvimento da Indústria Química no Japão.[110]

Cabe destacar também que no Japão foi fundada a primeira Sociedade de Sismiologia do mundo em 1880, para aprofundar as pesquisas sobre os terremotos frequentes dessas Ilhas do Pacífico.[111] Data desse período também a primeira Academia de Ciência do Japão, a Academia de Tóquio (Toio *Gakushikai In*), que foi criada pelo Ministério da Educação em 1879.[112]

A Era Meiji estabeleceu as bases para o desenvolvimento científico independente do Japão. Porém, com a morte do Imperador, teve início uma nova era – a Era Taisho (1912-1926). Nesta houve um grande desenvolvimento da indústria japonesa, principalmente química. A primeira Guerra Mundial provocou falta de abastecimento de produtos europeus, gerando a necessidade de produção de produtos que eram anteriormente importados: "Como resultado, no 4º. Ano da Taisho, Hodogaya Soda Co. começou a produzir soda por eletrólise, a Akita Refinaria da Óleo do Japão Co. construiu um equipamento de destilação sucessiva [fracionada], e Shinagawa da Mitsui & Co. começou a produzir bakelite."[113]. Este foi apenas o começo do desenvolvimento da indústria química japonesa.

Na Era Taisho se consolidaram novas organizações de ciência e tecnologia que propunham o desenvolvimento de uma ciência que levasse à indepência tecnológica de países estrangeiros como podemos ver pelo manifesto para o estabelecimento do Instituto de Pesquisa Física e Química, publicado em abril de 1915. Mitsutomo Yuasa comentou:

---

[110] Tuge, *Historical development of science and technology in Japan: series on Japanese life and culture*, p. 102.
[111] *Ibid*, p. 105.
[112] *Ibid*, p. 102.
[113] Yuasa, "History of science and technology in Japan", p. 10.

> Desde a Restauração Meiji, a civilização japonesa tem feito notáveis progressos, mas isto foi principalmente graças à nossa imitação a civilizações européias e americanas. Isto é especialmente verdade para a química e suas aplicações. É mais lamentável que tenhamos sido responsáveis por muito poucas invenções originais de nível internacional. Nossos cientistas simplesmente usam os resultados de pesquisas feitas em países ocidentais. Embora alguns tentem produzir trabalhos originais, eles não podem atingir seus objetivos por falta de instalações adequadas e apoio financeiro. Não devemos permanecer nessa situação. Deveríamos criar um bom instituto para encorajar esse tipo de pesquisa, e acelerar o progresso da indústria em geral a partir de sua fundação. Finalmente, nós esperamos contribuir com nossas investigações para o desenvolvimento cultural do mundo, e amortizar nossa divída intelectual com os países ocidentais.[114]

Durante esse período também aconteceram as primeira conferências científicas internacionais no Japão e a visita de Albert Einstein que produziu fortes efeitos sobre o campo da física.[115]

A Era seguinte - Showa (1926-1960), foi uma era de contrastes. Ela abrangeu o ápice do desenvolvimento japonês no período, inclusive com o Prêmio Nobel de Física em 1949 para Yukawa Hideki por sua teoria dos

---

[114] Yuasa, "History of science and technology in Japan", p. 11.
[115] Tuge, *Historical development of science and technology in Japan: series on Japanese life and culture* p. 132.

mesotrons;[116] bem como a desolação provocada pela 2ª Guerra Mundial e as bombas atômicas jogadas sobre o Japão.

No início desse período, foi criada a Associação Japonesa para o Avanço da Ciência, em 1932, tendo o irmão do Imperador como presidente honorário e o Presidente da Academia Imperial Japonesa como secretário-geral. Esta Associação também tinha como objetivo o desenvolvimento de ciência e tecnologia genuiamente japonesa[117].

Nesse período, Nagaoka, um dos fundadores do Instituto de Pesquisa em Física e Química de Tóquio; foi secretário-geral da Associação Japonesa para o avanço da ciência (1939 – 1947) e presidente da Academia Imperial do Japão; e também atuou como presidente da Universidade de Osaka nas décadas de 1930 e 1940.[118]

Na Era Showa foram criadas universidades nas colônias japonesas conquistadas no final da era anterior. Por exemplo, Formosa foi anexada após o término da guerra sino-japonesa e a Coréia após a guerra russo-japonesa. Em 1926 foi fundada a Universidade Imperial de Seul, na Coréia e em 1927 a Universidade Imperial de Taihoku em Taipei[119].

3.2. NAGAOKA NA EUROPA

Após concluir o doutorado, Nagaoka, em 1893, partiu para Berlim e Munique. Lá freqüentou cursos de Teoria Cinética dos Gases com Ludwig Boltzmann e começou sua incursão no mundo da teoria atômica. Primeiramente, teve contato com as idéias de Boltzmann, que pensava o

---

[116] *Ibid*.
[117] *Ibid*, p. 133.
[118] Yagi, "Research group of the committee for the publication of Hantaro Nagaoka's biography", p. 23.
[119] [119] Tuge, *Historical development of science and technology in Japan: series on Japanese life and culture* p. 133.

átomo como impenetrável, e tendo pequenas regiões sensíveis que em contato ou sobrepostas poderiam produzir atração química. No curso de Boltzmann tomou conhecimento do trabalho de Maxwell sobre a teoria cinética dos gases e acabou lendo dois volumes da obra *Maxwell's Scientific Papers*, admirando-se pelo trabalho sobre a estabilidade do movimento dos anéis de Saturno, pelo qual Maxwell ganhou o prêmio Adams de 1856.[120].

Segundo Yagi, Nagaoka ficou fascinado pelo curso de Boltzmann, inclusive pedindo transferência para a Universidade de Viena, quando Boltzmann assumiu como professor lá. Entretanto, parece que Nagaoka ficou desapontado quando Boltzmann repetiu o curso que ele já tinha feito em Munique, e logo pediu transferência para Berlim novamente e retornou ao Japão em 1896.[121]

Em 1900 Nagaoka participou do *1º. Congresso Internacional de Física*, realizado em Paris, onde apresentou seu trabalho sobre magnetoestrição. Nesse Congresso, é possível que, o interesse de Nagaoka pela estrutura atômica tenha sido estimulado pelos trabalhos do casal Curie e de Henri Poincaré. Os Curie trabalhavam com radioatividade e pensavam na complexidade da estrutura atômica e Poincaré sugeria que a estrutura do átomo seria passível de investigação considerando o fato de que cada elemento possui o seu próprio espectro de linhas.[122]

---

[120] Eri Yagi, "On Nagaoka's Saturnian atomic model (1903)." *Japanese Studies in the History of Science* 3 (1964): 29-47, na p. 32.
[121] *Ibid*, p. 32.
[122] *Ibid*, pp. 32-33.

Já, em 1910 Nagaoka participou de dois congressos científicos internacionais (Bruxelas e Viena)[123] representando o Japão e realizou algumas visitas a pesquisadores de diferentes universidades européias. Ele esteve em Manchester com Rutherford; em Leyden com Heike Kamerlingh-Onnes, Felix Ehrenhaft e Hendrik Lorentz; em Berlim com Max Planck, Ludwig Janicki, Erich Regener e Heinrich Rubens; em Viena com Stefan Meyer; em Graz com Hans Benndorf; em Bolonha com Augusto Righi; em Karlsruhe com Otto Lehmann; em Genebra com Jean Edouard Charles Sarasin; em Zurique com Peter Weiss; em Munique com Hermann Ebert e Peter Paul Koch; em Amsterdam com Pieter Zeeman; em Bonn com Alexander Pflueger; em Heidelberg com Philipp Lenard; em Würzburg com Wilhelm Wien; em Marburg com Emil Take; em Göttingen com Woldemar Voigt e Johann Emil Wiechert; em Breslau com Otto Lummer e Clemens Schaefer.[124]

3.3. NAGAOKA E A ESTRUTURA ATÔMICA

Em 5 de dezembro de 1903 Hantaro Nagaoka leu o artigo "Motion of particles in an ideal atom illustrating the line and band spectra and the phenomena of radioactivity" ("Movimento de partículas num átomo ideal explicando os espectros de bandas e linhas e o fenômeno da radioatividade")[125], na Sociedade de Física e Matemática de Tóquio. Nele propôs seu modelo saturniano de átomo. Logo em seguida, Nagaoka publicou

---

[123] Lawrence Badash, "Nagaoka to Rutherford, 22 February 1911." *In*: Weart, Spencer & P. Melba (ed.) *History of physics: readings from physics today*. (New York: American Institute of Physics, 1985): 103-107, na p. 104.

[124] Carta de Hantaro Nagaoka contando de suas viagens para Ernest Rutherford. (Ernest Marsden, *Correspondence of Lord Rutherford of Nelson. V.1-9.* London: Royal Society, 1956).

[125] Hantaro Nagaoka, "Motion of particles in an ideal atom illustrating the line and band spectra and the phenomena of radioactivity." *Tokyo Sugaku-Butsurigakukwai Kiji-Gaiyo* (Journal of the Physical Society of Japan) 2 (7, 1904): 92-107.

os principais resultados de sua pesquisa na revista *Nature*[126], bem como num artigo semelhante no *Philosophical Magazine*[127], em 1904[128].

Segundo Yagi[129] o modelo proposto por Nagaoka foi construído partindo da crítica ao modelo Aepinus proposto por Lorde Kelvin, em 1902, modelo baseado na doutrina de Aepinus (séc. XVIII) do fluído único da eletricidade[130], bem como que Nagaoka, em 1908, continuava discordando do modelo de Lorde Kelvin dizendo ser difícil acreditar que os elétrons se movam livremente numa esfera carregada positivamente e disse que os elétrons estão situados fora da esfera carregada positivamente. Cabe destacar que não há citação de Kelvin nos artigos publicados por Nagaoka no *Philosophical Magazine,* na Revista *Nature*, bem como no *Tokyo Sugaku-Butsurigakukwai Kiji-Gaiyo* de 1904, e a única fonte dessa informação de que dispusemos foi o artigo de Yagi publicado em 1964[131].

Já a partir dos títulos dos 3 artigos publicados no *Tokyo Sugaku-Butsurigakukwai Kiji-Gaiyo, Nature* e *Philosophical Magazine* e considerando as primeiras palavras deste último "Desde a descoberta da regularidade das linhas espectrais..."[132] ficou evidente o enfoque principal adotado por Nagaoka na discussão de sua hipótese atômica: a relação entre a espectroscopia e a

---

[126] Hantaro Nagaoka, "On a Dynamical system illustrating the spectrum lines and the phenomena of radio-activity." *Nature* 69 (1791, 25 February 1904): 392-393.

[127] Hantaro Nagaoka, "Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity." *Philosophical Magazine [6]* 7 (41, maio 1904): 445-455. A única diferença do artigo publicado no periódico Japonês foi a inclusão de um parágrafo, ao final, falando de fluorescência e fosforescência e ampliando a indicação de uso de sua teoria para as questões de afinidade química e valência entre os possíveis objetos de investigação, além dos apontados no artigo japonês.

[128] Como detalharemos mais adiante o trabalho de Nagaoka é citado por Ernest Rutherford em seu famoso artigo sobre a estrutura atômica de 1911, por John William Nicholson em seus artigos sobre o espectro do Nebúlio e sobre a constituição da coroa solar, artigos que apresentam as bases de suas teorias atômicas.

[129] Yagi, "On Nagaoka's saturnian atomic model (1903)", p. 33.

[130] Este fluido elétrico seria constituído por minúsculas partículas penetrantes à matéria ordinária. Aponta que a força entre duas partículas do fluido elétrico e entre duas partículas da matéria ordinária é repulsiva; e a força entre uma partícula do fluído elétrico e uma partícula da matéria ordinária é atrativa.

[131] Yagi, "On Nagaoka's saturnian atomic model (1903)", p. 29-47.

[132] Nagaoka, "Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity", p. 445.

estrutura dos átomos. Rejeitando a interpenetrabilidade entre cargas positivas e negativas[133], o modelo de Nagaoka constava de uma massa central grande[134] carregada positivamente, atraindo os elétrons, cargas negativas de mesma massa, que giravam em um anel circular, distribuídos em intervalos angulares iguais, repelindo-se uns aos outros. As atrações e repulsões são compreendidas segundo as leis de Coulomb. Nagaoka assim se expressou:

> O sistema que vou discutir consiste num grande número de partículas de massa igual, distribuídas num círculo a intervalos angulares iguais e repelindo-se umas às outras com forças inversamente proporcionais ao quadrado da distância; no centro do círculo, está uma partícula de grande massa atraindo as outras partículas de acordo com a mesma lei de força. Se essas partículas em repulsão estão girando com aproximadamente a mesma velocidade em torno do centro que as atrai, o sistema será geralmente estável, para pequenas perturbações, desde que a força de atração seja suficientemente grande. O sistema difere do sistema saturniano analisado por Maxwell por ter partículas se repelindo e não satélites se atraindo. O presente caso será evidentemente realizado aproximadamente se substituirmos esses satélites por elétrons negativos e o centro atrativo por uma partícula carregada positivamente. As investigações sobre raios

---

[133] Provavelmente por influência de Boltzmann (Eri Yagi, "The development of Nagaoka's Saturnian atomic model II (1904-1905) – Nagaoka's theory of the structure of matter." *Japanese Studies in the History of Science* 11(1972): 73-89, na p. 74.

[134] Grande em referência à massa dos elétrons, sendo praticamente igual à massa total do átomo.

> catódicos e radioatividade mostraram que este sistema é concebível como um átomo ideal.[135]

Nagaoka obteve as equações do movimento do anel de seu modelo a partir do artigo de Maxwell citado anteriormente. Seu modelo difere do de Maxwell pela existência de repulsão entre os elétrons em oposição à atração entre satélites, porém "as equações aqui consideradas são aproximadamente da mesma forma que as usadas por Maxwell, mas elas podem ser convenientemente deduzidas pelo uso da equação de Lagrange"[136].

3.3.1. A ESTABILIDADE

Para Nagaoka, se os elétrons girassem com quase a mesma velocidade em torno do centro que os atrai com uma força suficientemente grande, o sistema inteiro permaneceria geralmente estável para pequenas perturbações[137]. A condição apontada por ele, segundo Yagi, é $E \approx 10^4\ e$, sendo E a carga da partícula central e *e* a carga de um elétron[138], relação que não se encontra descrita em valores nas publicações de Nagaoka em inglês, onde apenas encontramos a afirmação "Nós percebemos primeiro que *E* deve ser muito grande comparado com *e*"[139].

Para defender a estabilidade de seu sistema, Nagaoka parece ter usado Larmor:

---

[135] Nagaoka, "Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity", pp. 445-446.
[136] Nagaoka, "Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity", p. 447.
[137] Nagaoka "On a Dynamical system illustrating the spectrum lines and the phenomena of radio-activity.", p. 392.
[138] Yagi, "On Nagaoka's saturnian atomic model (1903)", p. 30.
[139] Hantaro Nagaoka, "Motion of particles in an ideal atom illustrating the line and band spectra and the phenomena of radioactivity." *Tokyo Sugaku-Butsurigakukwai Kiji-Gaiyo* (Journal of the Physical Society of Japan) 2 (7, 1904): 92-107, na p. 94.

> Quando o movimento estável do orbital em uma molécula é assim constituído, a soma das acelerações vetoriais de todos os íons ou elétrons é constantemente nula, não haverá nenhuma radiação, ou muito pouca, a partir dele (para ondas comparadas por bastante tempo com suas dimensões) e, portanto, este movimento estável será permanente [140].

No modelo de Nagaoka, os elétrons estavam organizados em intervalos angulares iguais da órbita circular, girando com a mesma velocidade angular.

3.3.2. ESPECTROSCOPIA E RADIOATIVIDADE

Nagaoka indicou que o sistema atômico nos fenômenos de radioatividade e nos espectros não era necessariamente neutro, mas a carga central era muito grande se comparada com as cargas negativas dos elétrons do anel mais externo. Ele comentou: “Recentes investigações mostram que o átomo químico está associado a numerosos elétrons negativos; que nos elementos mais leves somam diversas centenas, enquanto que nos átomos pesados seu número pode chegar a cem mil”[141].

As vibrações desses elétrons, na perspectiva de Nagaoka, poderiam determinar características importantes nos fenômenos espectroscópicos e radioativos.

---

[140] Larmor, *Philosophical Magazine*, dez. 1897 *apud* Yagi, “On Nagaoka’s” Saturnian atomic model (1903)”, p. 34.

[141] Hantaro Nagaoka, “Reply to Mr. Schott's remark on the motion of particles in an ideal atom illustrating the line and band spectra and the phenomena of radioactivity.” *Tokyo Sugaku-Butsurigakukwai Kiji-Gaiyo (Journal of the Physical Society of Japan)* 2 (11, 1904): 140-141, na p.140.

Para Nagaoka "A vibração transversal (ao plano do anel) das partículas está relacionada ao espectro de bandas, logo não é afetada pela força magnética externa"[142] e as vibrações paralelas ao plano da órbita circular, correspondem ao espectro de linhas.

Uma das preocupações de Nagaoka era explicar o efeito Zeeman no espectro de linhas[143]. Utilizando a teoria de Lorentz para o efeito Zeeman, Nagaoka mostrou que ondas radiais e angulares rodando em órbitas circulares viajam em diferentes velocidades. Quando uma força magnética externa é aplicada perpendicularmente ao plano das órbitas, as séries de espectro de linhas se tornam dubletos, com aplicação do campo magnético. Ele também mostrou que forças magnéticas paralelas ou perpendiculares ao plano do anel não produzem efeito sensível sobre as vibrações transversais, logo, não afetam significativamente o espectro de bandas. Em suas palavras: "Observa-se que o efeito Zeeman é apenas peculiar ao espectro de linhas, enquanto o espectro de bandas não é afetado por forças magnéticas"[144].

Para ele, o número de linhas no espectro estava relacionado ao número de anéis no átomo. Ele explicou:

> Quando há diversos anéis de elétrons negativos, nós podemos esperar a presença de muitas linhas de absorção, a linha devida à coincidência ao período de incidência das ondas eletromagnéticas com a vibração da partícula positiva será geralmente encontrada na região do infravermelho,

---

[142] Hantaro Nagaoka, "Extension of Deslandres's formula for band spectrum." *Tokyo Sugaku-Butsurigakukwai Kiji-Gaiyo* (Journal of the Physical Society of Japan) 2 (10, 1904): 129-131, na p. 129.

[143] O efeito Zeeman em espectros de banda ainda não tinha sido identificado nesse período (Eri Yagi. "The development of Nagaoka's saturnian atomic model II (1904-1905) – Nagaoka's theory of the structure of matter." *Japanese Studies in the History of Science* 11(1972): 73-89, na p. 41.

[144] Nagaoka, "Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity", pp 101, 452.

> enquanto a linha devida aos elétrons negativos pode ser encontrada na parte do espectro que é visível ou ultravioleta[145].

O estudo sistemático da distribuição de freqüências num espectro de bandas foi primeiramente desenvolvido por Henry-Alexandre Deslandres. Ele chegou à conclusão de que o fenômeno das bandas é geralmente devido às moléculas e não aos átomos isolados . Em suas palavras:

> A investigação sobre a dispersão de várias substâncias tem revelado a existência de oscilações próprias para diferentes substâncias na região não visível no espectro do infravermelho. Essas ondas são, muito provavelmente, devidas à oscilação da carga positiva. Drude chegou à conclusão semelhante partindo de um ponto diferente.[146]

E continuou:

> Levando em conta a grande massa da carga central, não será fácil definir a vibração perpendicular ao plano do anel, mas com uma faísca elétrica ou outras formas de força elétrica intensa, a carga central pode ser levada a vibrar. A vibração terá, no entanto, sua contribuição no movimento do anel

---

[145] Hantaro Nagaoka, "Dispersion of light due to electron-atoms." *Tokyo Sugaku-Butsurigakukwai Kiji-Gaiyo (Journal of the Physical Society of Japan)* 2 (18, 1905): 280-285, na p. 285.
[146] Hantaro Nagaoka, "The structure of an atom." *Tokyo Sugaku-Butsurigakukwai Kiji-Gaiyo* (Journal of the Physical Society of Japan) 2 (17, 1904): 240-247, na p. 246.

> circundante e dos elétrons, desse modo, excitando a vibração perpendicular ao plano da órbita. Produzirá, de fato, o espectro de bandas.[147]

Nagaoka considerava que, dentre as várias táticas moleculares que contribuem para a oscilação da carga positiva na direção-*z*, s está aquela que é causada pela combinação de diferentes átomos para formar uma molécula complexa. As cargas estando muito próximas umas das outras, a vibração de suas partes influenciará o movimento da carga central e produzirá o espectro de bandas. Assim, segundo ele, se chegava a um resultado, fortemente apoiado por numerosos trabalhos em análises espectrais, que o espectro de bandas é um fenômeno normalmente inerente às moléculas e não aos átomos.[148]

Nagaoka explicou a radioatividade pela desintegração de seu modelo atômico:

> Se o movimento dos anéis adquire uma vibração de grande amplitude produzindo um colapso, os elétrons se dispersam em todas as direções em alta velocidade, e os 'elétrons positivos'[149] do centro são ejetados. Considerava que elementos de grande massa atômica, como por exemplo, o Rádio, poderiam perder elétrons mais facilmente e, essa perda poderia causar a desintegração do átomo. No caso, os que saíam no anel

---

[147] Nagaoka, "The structure of an atom", p. 247.
[148] *Ibid*, pp. 246-247.
[149] Importante destacar o uso do termo elétrons positivos, não muito comum, usado, por ele em artigo de 1903.

> formariam os raios β, e as cargas positivas centrais formariam os raios α[150].

Em outro trabalho ele acrescentou:

> O movimento do anel não estará oscilando, mas ao longo do tempo, se a perturbação é persistente, adquirirá uma amplitude tal que produzirá a quebra de anel. Neste caso, as partículas voarão fora com velocidades enormes e a partícula central participará do mesmo movimento, devido à lei de conservação do centro de massa[151].

Ao finalizar seu artigo do *Philosophical Magazine*, no último parágrafo, Nagaoka chamou a atenção para a existência de vários problemas. Ele comentou:

> Existem vários problemas que serão, eventualmente, passíveis de resolução através da hipótese de um sistema saturniano, como a afinidade química e a valência, eletrólise e muitos outros temas relacionados com átomos e moléculas. O cálculo aproximado e principalmente a exposição não detalhada dos vários fenômenos acima delineados pode servir

---

[150] Nagaoka, "On a dynamical system illustrating the spectrum lines and the phenomena of radio-activity", p. 392.
[151] Nagaoka, "Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity", p. 454.

> como dica para uma solução mais completa da estrutura atômica.[152]

3.4. A CRÍTICA DE SCHOTT

George Augustus Schott[153] (1868-1937) foi o principal crítico do modelo proposto por Nagaoka. A publicação das idéias de Nagaoka na revista *Nature*[154] em 25 de fevereiro de 1904 suscitou imediatamente a resposta de Schott, redigida em 29 de fevereiro[155] e publicada em 10 de março em *Nature*[156].

No artigo de 25 de fevereiro, Nagaoka apresentou sucintamente sua hipótese do átomo saturniano, com partícula central positiva e um grande número de pequenas partículas negativas (elétrons) girando em círculos em torno do centro, semelhante ao modelo proposto por Maxwell para os anéis de saturno e considerando que: "Se as partículas em repulsão estão girando ao redor do centro, o sistema permanecerá geralmente estável para pequenas oscilações"[157].

Este posicionamento de Nagaoka levou Schott a discordar:

> O Professor Nagaoka sustenta que tal sistema é geralmente estável, mas como resultado de investigação através do

---

[152] Nagaoka, "Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity", p. 455.
[153] Para mais informações biográficas ver A.W. Conway "Professor G.A. Schott". 1868-1937. *Obituary Notices of fellows of the Royal Society,* 2 (7, jan. 1939): 451-454.
[154] Hantaro Nagaoka, "A Dynamical system illustrating the spectrum lines." *Nature* 70 (1806, 9 jun. 1904): 124-125, nas pp. 124-125.
[155] Juntamente também foi publicado um *p.s.* de Schott datado de 7 de março de 1904.
[156] George A. Schott, "A dynamical system illustrating the spectrum lines and the phenomena of radio-activity", *Nature* 69 (1793, 10 março, 1904a): 437.
[157] Nagaoka, "On a dynamical system illustrating the spectrum lines and the phenomena of radio-activity", p. 392.

> método usado por Maxwell para o anel de Saturno, eu cheguei à conclusão, há uns cinco anos atrás, que o sistema é instável se a lei da força elétrica for do inverso do quadrado e a força magnética for negligenciada. Consequentemente, eu pensei que o resultado não teria valor para publicação, mas em vista da carta do Prof. Nagaoka pode ser agora de interesse para seus leitores.[158]

No artigo de 25 de fevereiro Nagaoka também apresentou sucintamente suas idéias sobre a relação entre as freqüências de vibração (transversal – perpendicular ao plano das órbitas; radial e angular) dos elétrons em revolução e a estabilidade do átomo. Para vibrações perpendiculares ao plano dos anéis (transversal) Nagaoka defendia que

> Se supusermos que as partículas são elétrons negativos, podemos facilmente provar que as vibrações transversais não serão sensivelmente afetadas pelo campo magnético externo. Esta é outra característica do espectro de bandas.[159].

Ele partiu da equação de freqüência:

$$n = \omega - am^2 + bm^4 + \ldots\ldots$$

Considerando valores grandes para *m* como ponto de partida. Para freqüência radial e angular o ponto de partida é a equação:

---

[158] Schott, "A dynamical system illustrating the spectrum lines and the phenomena of radio-activity", p. 437.

[159] Nagaoka, "On a dynamical system illustrating the spectrum lines and the phenomena of radio-activity", p. 392.

$$n = C / \sqrt{1 - Am^2 + Bm^4 + \ldots}$$

E os anéis são considerados “quase-estáveis” para perturbações com componentes radiais e angulares proporcionais a e^{kvt}, onde *k* é uma constante, v é o número de partículas no anel e *t* o tempo. Se a perturbação continuar por um longo tempo o átomo pode se desintegrar[160]. Assim, o átomo considerado por Nagaoka deveria ter um grande peso atômico quando v é grande para garantir sua estabilidade. Cabe salientar que Nagaoka não abordou a neutralidade do átomo, bem como a possível relação numérica entre cargas positivas e negativas.

Schott elaborou sua primeira crítica[161] a Nagaoka, a partir das considerações curtas apontadas por Nagaoka em *Nature.* Ele partiu das equações apontadas por Maxwell para caso da estabilidade dos anéis de saturno, que havia sido utilizada por Nagaoka para explicar sua hipótese. Substitui-se a massa de Saturno por $+ qe^2 / Ma^3$ e os satélites pelas cargas $- e^2 / Ma^3$, onde *e* é a carga do elétron e M a massa de cada elétron num anel de raio *a*, *qe* é a carga central, os sinais são relativos à atração ou repulsão entre as cargas apontadas chegando às equações para as freqüências e velocidade angular, efetuando cálculo com diferentes números de partículas e verificando a sua estabilidade, considerando um átomo neutro. A partir da equação da freqüência transversal, Schott comentou sobre a instabilidade do sistema para 8 ou mais elétrons e a partir da equação para perturbações radiais e tangenciais também conclui que o sistema é instável para número pares

[160] Nagaoka, “On a dynamical system illustrating the spectrum lines and the phenomena of radio-activity”, p. 392..
[161] Schott, “A dynamical system illustrating the spectrum lines and the phenomena of radio-activity”, p. 437.

(excluindo então 2, 4 e 6) e também para os impares 3,5 e 7. Apontou também a possível instabilidade para dois ou três anéis.

A tréplica de Nagaoka escrita em 20 de abril e publicada na *Nature* em 9 de junho de 1904 e também no *Tokyo Sugaku-Butsurigakukwai Kiji-Gaiyo* procurava desqualificar as críticas de Schott enfatizando que estavam falando de modelos com características diferentes. Schott pensava em um átomo neutro, Nagaoka não:

> Esses que leram o artigo de Maxwell sobre a estabilidade dos anéis de Saturno admitirão, sem o comentário do Prof. Schott, a futilidade em discutir um sistema *eletricamente neutro* com uma carga positiva central e anel de elétrons negativos como satélites[162].

Para Nagaoka, a carga central era muito grande se comparada com as cargas negativas nos anéis, o que poderia gerar estabilidade para o sistema. Ele considerava que: "recentes investigações mostram que átomo químico está associado a numerosos elétrons, que no elemento mais leve remontam a várias centenas, enquanto que em átomos pesados o número pode chegar a cem mil"[163]. Ele construiu um sistema estável mesmo, considerando o grande número de elétrons que seria necessário para estabilidade de seu átomo ideal.

Nagaoka assumiu que a carga central positiva poderia formar um sistema neutro com todos os elétrons, mas apenas uma pequena fração dos últimos estaria localizada no anel e a oscilação desses elétrons mereceria ser

---

[162] Hantaro Nagaoka, "A Dynamical system illustrating the spectrum lines", *Nature* 70 (1806, 9 jun. 1904): 124-125, na p. 124.
[163] *Ibid.*

investigada. Em relação, aos elétrons negativos restantes esses poderiam descrever suas órbitas isoladas ou formar algum outro sistema regular.[164]

Boa parte das críticas de Schott ficou sem efeito com o argumento de uma carga positiva central muito grande, em comparação com o total de cargas negativas do anel[165]: "Sem dúvida o seu anel é quase estável se a carga positiva central é suficientemente grande, mas é admissível a deixar de fora da conta do resto do sistema?"[166].

Além disso, Schott[167] apontou também erros nos sinais de equações apresentadas no artigo "Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity" publicado por Nagaoka no *Philosophical Magazine*[168]. Nagaoka apresentou uma equação para velocidade angular ($\omega^2 = S + \mu K$) (equação 11 p. 450) e o sinal de K está errado, pois o sinal positivo representa uma atração, quando na verdade o sistema é de repulsão entre elétrons.

Considerando essa repulsão, Nagaoka apresentou uma equação (9) para freqüência transversal na pág. 449 ($n' = \pm\sqrt{S - \mu J}$) derivada da equação (14) considerada por Maxwell na pág. 315 ($n'^2 = S + 1/\mu RJ$) com sinais trocados corretamente e substituindo devidamente o primeiro termo para a atração entre a carga central e os elétrons e o segundo termo para repulsão entre os elétrons no anel. Chegou a uma equação (12) completamente equivocada para o movimento em questão na página 450:

---

[164] Hantaro Nagaoka, "A Dynamical system illustrating the spectrum lines", *Nature* 70 (1806, 9 jun. 1904): 124-125, na p. 124.
[165] Schott, "Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity", p. 387.
[166] George A. Schott, "On a dynamical system illustrating the spectrum lines", *Nature* 70 (1808, 23 junho 1904): 176.
[167] Schott, "Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity", p. 385.
[168] *Ibid*, pp. 445-455.

$$n^4 - (3\omega^2 - 2S + \mu\,(L + N))n^2 - \mu N\,(\omega^2 + 2S - \mu L) + \mu^2 M^2 = 0$$

Em comparação ao modelo para a atração entre os satélites de saturno proposto por Maxwell na equação (22) da pág. 316:

$$n^4 - \{3\omega^2 - 2S + 1/\mu\, R\,(L - N)\}n^2 - 4\omega\, 1/\mu\, RMn + (\omega^2 + 2S - 1/\mu\, RL)$$

$$1/\mu\, RN + 1/\mu^2\, R^2M^2 = 0$$

Fazendo os devidos acertos nas equações, Schott fez cálculos para determinar a estabilidade do átomo de Nagaoka. Considerando um número de 10 elétrons, Schott chegou ao número de 120 revoluções por segundo no anel e a perturbação do anel poderia aumentar 2,7 vezes durante 1/120 de revolução. Ele comentou: “É difícil ver como um sistema desse tipo pode representar, até mesmo, uma coisa tão instável como o átomo rádio; eu penso que nem é justificável Nagaoka falar do seu sistema, como 'geralmente estável'”[169].

Nagaoka ampliou a defesa de seu modelo frente aos questionamentos de Schott em artigo publicado no Japão, deixando claro que cálculos que consideravam o átomo uma esfera não se aplicavam ao seu modelo. Segundo ele havia “muitas razões para acreditar que o átomo é chato, mesmo quando há muitos anéis de elétrons e elétrons desgarrados provavelmente descrevem órbitas elípticas. O raio do anel de elétrons negativos girando em torno da carga positiva será com certeza maior que *a* (raio do núcleo), deduzido a partir da hipótese de átomos esféricos”[170]. Além disso, qualificou seu átomo como um modelo ideal que teria, apenas, utilidade de investigação, mas que poderia levar à elucidação da estrutura do átomo que existia na natureza.

---

[169] Schott, “Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity”, p. 386.
[170] Nagaoka, “The structure of an atom”, p. 240.

O debate terminou com um pedido de desculpas de Schott, porém não sem apontar as limitações do ponto de vista considerado por Nagaoka

> Dispensada esta objeção [relação entre cargas], gostaria de salientar que existem limites máximos para o sistema central carregado positivamente, ou para velocidade do anel superior à da luz. Pode muito bem ser que este limite seja demasiado baixo para um sistema estável ser alcançado, a discussão desta questão devem ser reservadas para outro momento[171].

Schott continuou publicando artigos no campo da espectroscopia e também sobre teoria eletrônica e propôs que:

> Em qualquer teoria que assuma que a matéria consiste de cargas elétricas, agindo uma sobre a outra apenas com forças eletromagnéticas, para obter estabilidade, é necessário ter ambas as cargas - positivas e negativas, e uma ou ambas devem estar em movimento, mais ou menos rápido. Considerando o átomo como permanente, ou quase isso, as órbitas de todas as cargas devem ser fechadas e das dimensões do átomo; considerado-o eletricamente neutro, exceto quando ionizados, cargas positivas ou negativas devem estar presentes em quantidade igual[172].

---

[171] Schott, “On a dynamical system illustrating the spectrum lines”, p. 176.
[172] Schott, “Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity”, p. 189.

Após abandonar seu modelo, em 1908, Nagaoka continuou acreditando no vínculo entre estrutura atômica e espectroscopia e deu início a seus experimentos em espectroscopia para investigar o arranjo dos elétrons[173] no átomo. As discussões sobre a influência de um campo magnético sobre a emissão de luz [174] também influenciaram decisivamente o trabalho de Nagaoka, e entre 1909 e 1911, ele publicou vários artigos sobre o efeito Zeeman.

3.5. ALGUMAS CONSIDERAÇÕES

A principal diferença entre o pensamento de Thomson e Nagaoka a respeito do assunto de que estamos tratando, foram suas concepções sobre a eletricidade, ou melhor, sobre as possibilidades de interpenetração entre diferentes cargas elétricas. Assim, no modelo proposto por Thomson, os elétrons giram dentro de uma esfera de carga positiva dispersa. Contrariamente, no modelo de Nagaoka, a carga positiva se restringe a uma partícula material central onde os elétrons não podem penetrar.

Segundo Yagi, a partir dessa diferença essencial ambos apresentaram pontos de vista semelhantes para questões como radioatividade, efeito Zeeman e linhas espectrais[175]. Isso não é tão claro a partir da leitura de originais de ambos, pois Thomson se posicionou sobre radioatividade enquanto que apenas teceu pequenos comentários sobre efeito Zeeman e linhas espectrais. O destaque nos textos de Thomson é a relação entre a estrutura do átomo e as propriedades químicas.

---

[173] Caminho de investigação que frutificou nos trabalhos de Nicholson e Bohr.

[174] Pieter Zeeman, "On the influence of Magnetism on the Nature of the Light Emitted by substances", *Philosophical Magazine [6]* 5 (43, 1897): 226.

[175] Eri Yagi, "The development of Nagaoka's saturnian atomic model II (1904-1905) – Nagaoka's theory of the structure of matter." *Japanese Studies in the History of Science* 11(1972): 73-89, na p. 74.

Uma discussão sempre presente na História da Ciência é a possível influência do trabalho de Nagaoka sobre o modelo proposto por Rutherford a partir dos experimentos com dispersão de partículas α. No entanto, isso é negado por Rutherford em carta encaminhada a Nagaoka:

> Você (Nagaoka) irá notar que a estrutura assumida no meu átomo é de algum modo semelhante ao sugerido por você em artigo de alguns anos atrás. Eu ainda não analisei o seu artigo, mas eu lembro que você escreveu sobre esse assunto.
>
> Recentemente eu fiz uma apresentação preliminar de meus resultados na Sociedade de Literatura e Filosofia de Manchester e espero em breve publicar no Philosophical Magazine[176].

É possível destacar que ambos os modelos acreditam na mesma disposição da(s) carga(s) positiva(s) no átomo. Todavia, a origem dos dois trabalhos é absolutamente diversa: espectroscopia para Nagaoka e dispersão de partículas α que atravessam a matéria para Rutherford. Enquanto um teve preocupação em discutir a organização dos elétrons, o outro procurava determinar a organização da carga elétrica positiva no átomo.

O modelo atômico proposto por Nagaoka teve um baixo impacto. A partir de 1908, Nagaoka iniciou seu trabalho experimental em espectroscopia, abandonando seu modelo atômico. Além de ter estado sujeito às críticas de Schott, tornara-se insustentável a partir da determinação do número de

---

[176] Carta de Rutherford para Nagaoka, 20 de março de 1911. *in* Eri Yagi, "The development of Nagaoka's saturnian atomic model II (1904-1905) – Nagaoka's theory of the structure of matter.", Appendix I.

elétrons por Thomson. Este, em 1906, chamou a atenção que, para substâncias elementares, o número de elétrons é da mesma ordem que o peso atômico da substância[177]. Todavia, seu pressuposto inicial da relação entre as propriedades espectroscópicas, constância do momento angular e a estrutura do átomo mostrou-se fundamental para o desenvolvimento dos modelos da teoria quântica.

[177] Yagi, "The development of Nagaoka's saturnian atomic model II (1904-1905) – Nagaoka's theory of the structure of matter", p. 88.

CAPÍTULO 4

A PROPOSTA DE RUTHERFORD

4.1 A VIDA E A CARREIRA

No início do século XX Ernest Rutherford (1871-1937) destacou-se principalmente por suas investigações em radioatividade e física nuclear. Embora todas as suas investigações possam ser incluídas atualmente no campo que chamamos de física, ele recebeu o Prêmio Nobel de Química em 1908 "por suas investigações na desintegração dos elementos, e na química das substâncias radioativas", como pode ser visto no *website* da Fundação Nobel[178].

Ernest Rutherford[179] nasceu entre as colônias de Brightwater e Spring Grover, próximo a Nelson na Nova Zelândia em 30 agosto 1871, numa família numerosa e empobrecida de imigrantes ingleses e escoceses e morreu como Lorde Rutherford – Barão de Nelson, em Cambridge na Inglaterra em 19 outubro 1937. Suas cinzas foram depositadas junto a Isaac Newton na Abadia de Westminster em Londres.

Os diversos biógrafos de Rutherford parecem concordar que as principais características do cientista devem ter sido herdadas de seus pais e

---

[178] http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1908/index.html. Consultado em 10/02/2009.

[179] Para mais informações biográficas, veja: A.S. Eve, *Rutherford: Being the life and letters of the Rt Hon. Rutherford, O.M.* (New York: MacMillan Co./ Cambridge, University Press, 1939;) Lawrence Badash, "Rutherford, Ernest". *In*: C.C. Gillispie, *Dictionary of scientific biography.* V.12.(New York: Charles Scribner's sons, 1981), pp 25-36; A.S Eve & J. Chadwick, "Lord Rutherford: 1871-1937", *Obituary Notices of Fellows of the Royal Society* 2 (6, jan. 1938): 394-423; David Wilson, *Rutherford: Simple genius*.(Cambridge: MIT Press, 1983).

de sua vida na Nova Zelândia: sua simplicidade, sua integridade, a forma econômica de viver, o grande entusiasmo pelo trabalho e a reverência à educação. A documentação biográfica encontrada sobre Lorde Rutherford fala desse homem simples, amável, alegre e disposto a auxiliar seus colegas, alunos e amigos.

Rutherford entrou na escola em Foxhill, com 5 anos, e aos 16 anos recebeu uma bolsa de estudos para o *Nelson College*, escola secundária próxima, com uma clássica educação inglesa. Na educação média foi muito bem sucedido em várias disciplinas, particularmente nas disciplinas matemáticas[180].

Em 1889 recebeu uma bolsa de estudos para Universidade mais próxima - o pequeno *Canterbury College* em Christchurch - onde parece ter sido influenciado por seu professor Alexander W. Bickerton, um entusiasta da ciência cujas teorias cosmológicas nunca foram levadas a sério, e por Charles Henry H. Cook, um rigoroso e ortodoxo matemático. Após ter concluído os três anos de curso, Rutherford recebeu seu diploma de graduação (B.A.). Seu conhecimento em matemática o habilitou a permanecer mais um ano. Obteve sua pós-graduação (M.A) em 1893, com duas honras de primeira classe em matemática e física-matemática. Neste tempo o talento especial de Rutherford era aparente e ele foi encorajado a permanecer por mais um ano em Canterbury. Ele iniciou sua pesquisa com a magnetização do ferro sob descargas de alta freqüência, trabalho que deu a ele o *B.Sc* em 1894 e resultou na publicação de seus primeiros artigos científicos no *Transactions of the New Zealand Institute* em 1894 e 1895.[181]

---

[180] Lawrence Badash, “Rutherford, Ernest” p. 25
[181] *Ibid*, pp. 25-26

Suas atividades até meados de 1895 são incertas, mas ele continuou nessa linha de pesquisa com Bickerton, ensinando na escola de meninos e se apaixonou por sua futura esposa – Mary Newton - a filha da dona da pensão onde morava. O casamento foi acontecer somente em 1900, quando Rutherford atuava no Canadá.[182]

Em 1895, a vida de Rutherford passou por uma grande transformação. A *Royal Comission*[183] destinou uma bolsa de pesquisa para o mais promissor estudante da Nova Zelândia, em qualquer ramo da pesquisa científica. O jovem químico J. C. Maclaurin foi o agraciado, mas por razões familiares, não pode aceitá-la, e Ernest Rutherford foi indicado para receber a bolsa e continuar suas pesquisas em uma universidade na Inglaterra.

Rutherford precisou pedir dinheiro emprestado para poder pagar sua passagem para a Inglaterra, e seguiu com uma carta de recomendação do Prof. Bickerton, que assim o descreveu:

> O Sr. Rutherford tem uma grande fertilidade ou capacidade de organização, um conhecimento muito completo em métodos analíticos e gráficos de matemática e um pleno conhecimento dos recentes avanços na ciência da eletricidade e métodos de medidas absolutas. Pessoalmente o Sr. Rutherford é gentilmente prestativo e, portanto, disposto a ajudar outros estudantes com as suas dificuldades, colocando-se à disposição de todos os que tenham sido postos em contato

[182] Lawrence Badash, "Rutherford, Ernest", p. 26.
[183] Esse comitê organizador da grande exposição de Londres, em 1851, continuou existindo após a exposição para promover a educação em artes e ciências no Reino Unido e fomentava a formação de jovens promissores através de bolsas de estudos (Edward N. da C. Andrade, *Rutherford and the nature of atom*, Gloucester/Mass.: P. Smith, 1978, p. 22).

> com ele. Todos nós lhe desejamos de coração uma tão bem sucedida carreira na Inglaterra, tal como teve na Nova Zelândia.[184]

Rutherford pretendia trabalhar no Laboratório Cavendish, em Cambridge, com J. J. Thomson. Thomson acabara de publicar o *Recent Researches in Electricity and Magnetism*, que o tornara conhecido mundialmente. Em 24 de setembro de 1895 Thomson escreveu para Rutherford, que já estava em Londres, aceitando-o em seu laboratório e sugerindo que ele deveria tornar-se membro da Universidade. Como as normas da Universidade de Cambridge até aquele momento não permitiam a entrada de pesquisadores que tivessem sua graduação em outra Universidade, foi criada uma nova categoria de membros - "estudantes pesquisadores" - permitindo o ingresso de graduados em outras universidades que podiam atuar sob uma série de restrições de conduta. Rutherford foi o primeiro "estudante pesquisador" graduado em outra universidade, a atuar no Laboratório Cavendish.[185].

O ano de 1895 sem dúvida foi marcante na vida do jovem Rutherford. Além das mudanças produzidas em sua vida pessoal e acadêmica, esse ano marcou a descoberta dos Raios X por Wilhelm Röntgen (1845-1923). Essa descoberta atravessaria as trilhas de investigação de Rutherford e produziria mudanças que o levariam às investigações sobre radioatividade, que o tornaram um cientista reconhecido mundialmente.

---

[184] Edward N. da C. Andrade, *Rutherford and the nature of atom,* Gloucester/Mass.: P. Smith, 1978, p. 22.
[185] *Ibid*, pp. 26-27.

A excitação de Rutherford em trabalhar com Thomson transpareceu em uma carta para sua noiva na Nova Zelândia:

> ... eu tive um encontro com Thomson em Cambridge .... Fui ao laboratório e encontrei Thomson e tive uma conversa longa e boa com ele. Ele é muito agradável e não está fossilizado em tudo. No que diz respeito à aparência ele é um homem de estatura média, moreno, e muito jovem ainda: barba, mal-feita, e usa o cabelo bastante longo. Seu rosto é bastante longo e fino, tem uma boa cabeça e tem dois sulcos verticais pouco acima seu nariz [...] Ele chamou-me para almoçar no Scroope Terrace, onde eu encontrei a sua esposa, uma mulher alta e morena [...] estava esquecendo de mencionar as coisas importantes que vi - o único menino da casa - 3 ½ anos - um jovem robusto de aparência saxônica, mas o mais bonito garoto que vi para essa idade. Prof J. J. gosta muito dele e jogou com ele durante o almoço, enquanto com a Sra. J.J. se desculpava pela informalidade. Eu gostei muito do Sr. e da Sra [Thomson].[186]

A relação que começou nesse momento permaneceu durante toda a vida de Rutherford.

Em Cambridge, Rutherford deu prosseguimento às investigações que havia iniciado na Nova Zelândia e em junho de 1896 fez sua primeira

---

[186] Carta de Rutherford para Mary Newton – Thomson, 3 de outubro de 1895, *apud* Andrade, *Rutherford and the nature of atom*, p. 290.

comunicação na *Royal Society* cujos resultados foram publicados no *Philosophical Transactions* daquela sociedade. Enquanto isso do outro lado do canal da Mancha, Henri Becquerel anunciava a descoberta da radioatividade, outro fato que marcaria a produção futura do jovem neozelandês.

J. J. Thomson percebeu a potencialidade do jovem Rutherford e em 1896 o chamou para trabalhar com ele nas investigações que vinha realizando sobre condução de eletricidade em gases e o efeito dos recém descobertos Raios X. Rutherford comentou a respeito:

> Neste quadrimestre letivo estou trabalhando com o professor sobre os raios Röntgen. Estava um pouco cheio de meu velho assunto e estou feliz com a mudança. Espero que seja uma coisa boa para eu trabalhar com o professor por algum um tempo. Tenho feito uma pesquisa para mostrar que posso trabalhar por mim mesmo.[187]

Esta pesquisa resultou em publicação conjunta em novembro de 1896 no *Philosophical Magazine* e no estabelecimento de uma relação de respeito pelo trabalho de professor e aluno que permaneceria por toda a vida de ambos.

Além da investigação dos Raios X, Rutherford iniciou investigações utilizando Urânio radioativo, produzindo seus primeiros artigos no campo[188] que começava a se delinear nas pesquisas desenvolvidas na França por Becquerel e pelo casal Curie.

---

[187] Carta de Rutherford para Mary Newton, 24 de abril de 1896, *apud*, Andrade, *Rutherford and the nature of atom*, p. 33.

[188] Nos artigos produzidos pelo casal Curie sobre a descoberta do Rádio, apareceu pela primeira vez a palavra francesa *radio-activité* traduzida para o inglês *radioactivity* pela revista *Nature* em 16 de novembro de 1898. (Andrade, *Rutherford and the nature of atom*, p. 54.)

Em 1898 Rutherford foi para a Universidade McGill, no Canadá, sob a recomendação de J. J. Thomson que se referiu a ele nos seguintes termos: "Eu nunca tive um aluno com mais entusiasmo e capacidade de investigação original como Sr. Rutherford e estou certo de que se fosse escolhido ele iria estabelecer uma importante escola de Física em Montreal"[189].

No Canadá, Rutherford desenvolveu trabalhos em radioatividade com químico Frederick Soddy (1877 - 1956), que o levaram a receber o Prêmio Nobel de Química em 1908.

Na McGill Rutherford detectou e classificou as radiações do Urânio sobre as quais comentou:

> Esses experimentos mostram que a radiação do urânio é complexa e que podem ser detectados, pelo menos, dois tipos distintos de radiação - uma que é muito facilmente absorvida, que será designada por conveniência de radiação α, e a outra do tipo mais penetrante, que será denominada de radiação β[190].

Além dessas radiações, Rutherford identificou o que chamou de radiação gama.

Juntamente com Soddy, propôs a teoria da desintegração radioativa e também determinou a relação entre carga e massa das partículas alfa e propôs

---

[189] Andrade, *Rutherford and the nature of atom*, p. 50.
[190] Ernest Rutherford, “Uranium radiation and the electrical conduction produced by it.” *Philosophical Magazine [5]* 67 (1899): 109-163, na p. 115.

que estas eram átomos de hélio expelidos nos sucessivos estágios de uma desintegração radioativa[191]

No verão de 1900, Rutherford foi à Nova Zelândia para se casar com Mary Newton, retornando com ela para Montreal onde nasceu sua única filha Eileen Mary, em 1901[192].

Em junho de 1903, Rutherford foi eleito *Fellow* da *Royal Society* de Londres e em seu laboratório na McGill desenvolveu uma de suas características mais fortes como pesquisador – a orientação de jovens pesquisadores de todo o mundo. Dentre eles, estava o alemão Otto Hahn, que viria a receber o Prêmio Nobel de Química em 1944 pela fissão nuclear.[193] No Canadá Rutherford, Soddy e seus colaboradores parecem ter estabelecido as bases da pesquisa em radioatividade de origem britânica.

Em 1903 Rutherford determinou a relação entre a carga e a massa das partículas alfa e logo no ano seguinte mostrou que, havia uma alta probabilidade de que as partículas alfa consistissem em átomos de Hélio expelidos em sucessivos estágios de uma desintegração radioativa. Em 1905 foi publicada a segunda edição (ampliada) do importante livro – Radio-activity – de Rutherford, detalhando os pontos controversos de sua teoria da desintegração radioativa que ficaram sem explicação na primeira edição de 1904.[194]

Os trabalhos sobre radioatividade que Rutherford desenvolveu no Canadá podem ser considerados dos mais relevantes de sua produtiva carreira. Suas descobertas em radioatividade continuaram presentes em suas

---

[191] Andrade, *Rutherford and the nature of* atom, p. 67.
[192] *Ibid*, p. 61.
[193] *Ibid*, p. 74, 88.
[194] *Ibid*, p. 87, 67, 91.

investigações posteriores e influenciaram decisivamente o campo de pesquisa que se constituiu desde a descoberta de Becquerel e as investigações do casal Curie na França.

No início de janeiro de 1907 Rutherford escreveu uma carta solicitando seu afastamento da Universidade McGill[195] retornando para a Inglaterra assumindo a direção do laboratório de física de Manchester[196]. Este, sob seu comando se tornou um dos mais importantes do mundo e influenciou uma geração de jovens físicos (Marsden, Darwin, Geiger, Bohr, Chadwick, entre outros)[197].

Manchester estaria mais uma vez relacionada à história atômica. Após as investigações de Dalton e a formação de J. J. Thomson foi o momento de Ernest Rutherford inserir, mais uma vez, o nome dessa cidade inglesa, berço da revolução industrial, na história do átomo moderno.

Em Manchester, Rutherford continuou suas investigações em radioatividade, principalmente com suas partículas favoritas. Ele e Hans Geiger (1882-1945) procuravam desenvolver novos métodos que possibilitassem a contagem[198] das partículas alfa nos fenômenos investigados e também buscavam explicar os fenômenos onde diferentes tipos de matéria eram bombardeados com as radiações descobertas, e os resultados (penetrabilidade, permeabilidade, espalhamento) eram detalhadamente investigados. Essas investigações levaram Rutherford a propor seu modelo de átomo nuclear em 1911.

---

[195] Ernest Marsden, *Correspondence of Lord Rutherford of Nelson. V.1-9.* London: Royal Society, 1956.
[196] Rutherford assumiu o comando de um novo laboratório, planejado e bem equipado por seu antecessor – Arthur Schuster, que desenvolveu trabalhos em ótica e espectroscopia.
[197] Andrade, *Rutherford and the nature of atom*, pp. 100-103.
[198] O conhecido contador Geiger foi inventado em 1913.

4.2. O ÁTOMO DE RUTHERFORD

O desenvolvimento de métodos elétricos de contagem de partículas mais precisos bem como dos métodos cintilográficos permitiram que Hans Geiger (1882-1945) e Ernest Marsden (1889-1970) desenvolvessem experimentos entre 1908 e 1910 sobre o comportamento das partículas alfa e beta quando atravessavam a matéria, bem como seu espalhamento.

Foram realizados muitos experimentos bombardeando finíssimas lâminas de diferentes metais com partículas alfa e beta. As investigações com partículas beta não foram muito adiante. Todavia, os resultados obtidos com as partículas alfa foram surpreendentes e levaram à continuidade das investigações.

Utilizando o método cintilográfico, Geiger pôde perceber que ao bombardear as lâminas metálicas com partículas alfa, um pequeno número dessas partículas não atravessava o metal e retornava com pequenos ângulos de desvio. Ele percebeu que para maiores ângulos de desvio era encontrado um número menor de partículas que sofriam desvio, bem como que a quantidade de partículas que retornavam aumentava com o aumento do peso atômico do metal.

Em 1909, com assistência de Ernest Marsden, jovem[199] estudante de graduação em Manchester, Geiger identificaria resultados surpreendentes como Rutherford relatou:

> Um dia Geiger veio para mim e disse, 'Você não acha que o jovem Marsden, a quem estou treinando nos métodos

[199] Em 1909 Ernest Marsden tinha 20 anos.

> radioativos, deveria começar uma pequena investigação?' Agora, eu pensava que tinha também, então disse 'Por que não deixá-lo ver se algumas partículas alfa podem ser espalhadas através de grandes ângulos?' Eu posso lhe dizer, com confiança, que não acreditava que haveria, pois sabia que a partícula alfa era uma partícula maciça muito rápida, com muita energia, e você poderia mostrar que, se o espalhamento fosse devido ao efeito cumulativo de uma série de pequenos espalhamentos, a chance de uma partícula alfa ser espalhada para trás era muito pequena. Então eu me lembro que dois ou três dias mais tarde, Geiger veio até mim, com grande excitação, dizendo 'Nós fomos capazes de obter algumas das partículas alfa retornando para trás ..." Foi o evento mais incrível já aconteceu na minha vida. Foi quase tão incrível quanto se você disparasse uma bala de 15 polegadas em pedaço de papel e ela voltasse e batesse em você[200].

Geiger e Marsden realizaram muitos experimentos onde investigaram três pontos: "(I) A quantidade relativa de reflexão a partir de diferentes metais. (II) A quantidade relativa de reflexão a partir de metais de espessura variável. (III) A fração de partículas α incidentes, que são refletidas"[201]. Eles puderam identificaram que quando lâminas metálicas muito finas eram bombardeadas com partículas alfa, a grande maioria das partículas atravessava essas lâminas, mas uma quantidade muito pequena dessas partículas retornava com

---

[200] Rutherford, *apud* Andrade, *Rutherford and the nature of atom*, p. 111.
[201] Hans Geiger, & Ernest Marsden, "On a diffuse reflection of the alfa-particles." *Proceedings Royal Society [A]* 82 (1909): 495-500, na p. 495.

grandes ângulos de desvio que poderiam a chegar a 90º ou até retornar na mesma direção de incidência das partículas alfa[202].

As investigações realizadas por Geiger e por Marsden foram comunicadas à *Royal Society.* A primeira comunicação ocorreu em maio de 1909 (lida em 17 de junho)[203]. Nesta, eles apenas mostravam os resultados dos experimentos com lâminas de vários metais (estanho, ouro, platina, chumbo, prata, cobre, ferro e alumínio). Uma segunda comunicação mais detalhada foi feita por Geiger em 1 fevereiro de 1910 (lida em 17 de fevereiro)[204].

No artigo publicado em 1910, Geiger além de apresentar os resultados obtidos, fez uma descrição mais detalhada dos experimentos e destacou o ouro dentre os metais testados. Em suas palavras:

> O ouro pareceu ser a substância mais adequada para essas medições comparativas [de espessura], uma vez que podem ser obtidas lâminas muito finas e uniformes, e, além disso, seu poder de dispersão é maior do que o de qualquer outro material disponível.[205]

Os resultados obtidos com lâminas de ouro acabariam tendo um lugar de destaque no artigo publicado em seguida por Rutherford e na história que se

---

[202] Andrade, *Rutherford and the nature of atom*, p. 112.
[203] Hans Geiger & Ernest Marsden. "On a diffuse reflection of the alfa-particles." *Proceedings Royal Society [A]* 82 (1909): 495-500.
[204] Hans Geiger, "The scattering of the α-particles by matter." *Proceedings of the Royal Society [A]* 83 (1910): 492-504.
[205] *Ibid*, p. 497.

conta sobre o dito “experimento de espalhamento de partículas alfa de Rutherford” que o teria levado a propor seu modelo atômico.

Destacamos que, no seu artigo, Geiger utilizou teorias de propagação do som como analogia para descrever os fenômenos observados. Ele comentou:

> Em sua ‘Teoria do Som’ (segunda edição, p.39, 1894) Lord Rayleigh enfrenta um problema semelhante, ou seja, a composição dos vetores unitários cujas direções são acidentais. Aplicando as deduções lá apontadas ao nosso caso, teríamos que a deflexão mais provável varia de acordo com a raiz quadrada do número de átomos que atravessam. Em outras palavras, o ângulo de espalhamento mais provável deverá aumentar a uma taxa proporcional à raiz quadrada, da espessura da matéria atravessada[206].

Geiger concluiu que:

> Em todos os experimentos precedentes o espalhamento foi medido pelo ângulo mais provável através do qual uma partícula α retornou passando através da lâmina de espalhamento sob investigação. (1) O ângulo mais provável de espalhamento aumenta para pequenas espessuras proporcionalmente à raiz quadrada da espessura da matéria

[206] Geiger, “The scattering of the α-particles by matter”, p. 499.

> atravessada pela partícula α, aproximadamente. Para maiores espessuras o ângulo de espalhamento aumenta mais rapidamente. (2) O ângulo provável através do qual uma partícula α retorna na passagem através de um átomo é proporcional ao seu peso atômico. O valor real deste ângulo no caso do ouro é de cerca de 1/200 de um grau. (3) O ângulo mais provável de espalhamento aumenta rapidamente com a diminuição da velocidade da partícula α, sendo, para uma primeira aproximação, inversamente proporcional à terceira potência da velocidade.[207]

Após a publicação desses resultados Rutherford deve ter permanecido algum tempo buscando alguma idéia que pudesse dar conta dessas observações e, no início de 1911, segundo Geiger:

> Um dia Rutherford, obviamente, no melhor dos espíritos, entrou em minha sala e disse que agora ele sabia como o átomo parecia ser e como explicar as grandes deflexões das partículas alfa. No mesmo dia eu iniciei um experimento para testar as relações esperadas por Rutherford entre o número de partículas dispersas e o ângulo de espalhamento.[208]

Em 7 de março de 1911 Rutherford fez uma comunicação na Sociedade de Literatura e Filosofia de Manchester apresentando as principais

---

[207] Geiger, "The scattering of the α-particles by matter", p. 504.
[208] Geiger, *apud* Andrade, *Rutherford and the nature of atom*, p. 114.

idéias sobre a estrutura do átomo nuclear tendo como ponto de partida os experimentos realizados com partículas α e β por Geiger, Marsden e Crowther e que logo em seguida foram publicadas no *Philosophical Magazine*[209] em maio de 1911.

O átomo proposto nesse momento consistia em "uma carga central concentrada em um ponto e rodeada por uma distribuição esférica uniforme de carga elétrica oposta, de mesmos valores" [210].

Como é possível perceber, nesse artigo, Rutherford, inicialmente, não definiu a carga das partículas conforme é defendido em muitos textos que contam essa história. Ou seja, a partícula central poderia ser positiva ou negativa, assim como as partículas que giravam em torno desse centro. Ele apenas é colocou que essas cargas teriam sinal oposto[211]. Além disso, propôs que "a carga central do átomo é aproximadamente proporcional ao seu peso atômico."[212]

No artigo do *Philosophical Magazine,* Rutherford iniciou apresentando suas considerações sobre as experiências realizadas, apontando que:

> É bem conhecido que as partículas α e β sofrem deflexão em sua trajetória retilínea quando encontram com átomos de matéria. Esta dispersão é muito mais acentuada para as

---

[209] Ernest Rutherford, "The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom." *Philosophical Magazine [6] 2*1 (125, maio 1911): 669-688.
[210] Ernest Rutherford, "The scattering of α and β rays and the structure of the atom." *Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society* 4 (55, 7 março 1911): 18-20, na p. 18.
[211] Rutherford assumiria, definitivamente, que o centro do átomo era carregado positivamente e os elétrons negativos giravam em torno desse centro no livro *Radioactive substances and their radiactions,* em 1913.
[212] Rutherford, The scattering of α and β rays and the structure of the atom", p. 19.

> partículas β do que para as α, levando em conta o momento e energia muito menor das primeiras. [213]

Rutherford apresentou na seqüência os resultados dos experimentos e a discordância entre esses dados e os cálculos possíveis de realizar a partir do modelo atômico de J. J. Thomson

> Entretanto, as observações de Geiger e Marsden sobre o espalhamento de raios α indicam que algumas das partículas α, cerca de 1 em 20.000 atravessaram desviando num ângulo médio de 90 graus na passagem através de uma lâmina de folha de ouro em torno 0,00004 cm[214].

Parecia a Rutherford ser razoável supor que a deflexão através de um grande ângulo fosse devida a um único encontro atômico e que a possibilidade de um segundo encontro desse tipo produzir uma grande deflexão, na maioria dos casos deveria ser extremamente pequena[215].

Além dos experimentos desenvolvidos por Geiger e Marsden com partículas alfa, Rutherford discutiu também os resultados conseguidos por Crowther com partículas beta[216]. Crowther compartilhava da idéia de uma carga positiva uniforme em todo átomo proposta por Thomson, mas Rutherford considerou que de acordo com os resultados experimentais encontrados seria necessário outra forma para distribuição das cargas no átomo e propôs que o

---

[213] Rutherford, "The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom", p. 669.
[214] *Ibid.*
[215] *Ibid.*
[216] James A. Crowther, "On the scattering of homogenous β-rays and the numbers of electrons on the atom". *Proceedings of the Royal Society of London [A]* 84 (570, 15 set. 1910): 226-247.

átomo seria constituído por “uma carga central supostamente concentrada em um ponto, e que as únicas grandes deflexões das partículas α e β são devidas, principalmente, à sua passagem através do forte campo central."[217]

No final do artigo, Rutherford fez algumas considerações sobre o artigo publicado por Nagaoka em 1904:

> É interessante notar que Nagaoka tinha considerado matematicamente as propriedades do átomo saturniano que ele supôs consistir de uma massa atrativa central circundada por anéis de elétrons em rotação. Ele mostrou que esse seria um sistema estável se a força atrativa fosse grande. [218]

Essa inclusão parece ter ocorrido após questionamento do próprio Nagaoka depois que ele havia tomado conhecimento da primeira apresentação das investigações de Rutherford na Sociedade de Literatura e Filosofia de Manchester.

Segundo Heilbron, a instabilidade eletrodinâmica do modelo de Rutherford estava posta, sendo importante destacar que:

> A instabilidade que levou à rejeição inicial do modelo nuclear foi mecânica: ela não foi derivada da drenagem de energia por radiação, que desempenha um papel tão importante na tradicional histórica contada. Na verdade, como mostrou Thomson, a radiação total devida a um anel de *p* de elétrons,

[217] Rutherford, “The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom”, p. 686.
[218] *Ibid*, p. 688.

> simetricamente distribuídos, descrevendo a mesma órbita circular diminui muito rapidamente à medida que aumenta *p*; para valores moderados de *p* no anel - o átomo - tem quase a vida eterna. [219]

De acordo com Andrade, isso resultou no pífio impacto de sua publicação “The scientific world was equally indifferent” ("O mundo científico era igualmente indiferente")[220] não merecendo citações[221] além das referências de seus colaboradores de laboratório ou sequer debates sobre sua proposta.

Rutherford no período estava desenvolvendo suas investigações no campo da Radioatividade e chegou à sua proposta de modelo atômico para explicar a inesperada deflexão das partículas alfa ao atravessar lâminas metálicas, propondo a existência de um centro de cargas no átomo.

Continuou suas investigações sobre radioatividade, elegendo o núcleo como responsável por tais fenômenos. Assim, podemos dizer que Rutherford focou seus trabalhos no núcleo e na interação de partículas radioativas e a matéria.

A maioria dos físicos das partículas naquele momento vinha tentando explicar a estrutura do átomo, a relação entre os fenômenos elétricos e o átomo, as ligações químicas e a tabela de Mendeleev. Dessa forma, o foco das investigações era o elétron, tendo surgido várias teorias eletrônicas. Além da apontada instabilidade eletrodinâmica, esse fator também levou o trabalho de Rutherford, que não abordava os elétrons, a não ser de muito interesse para

---

[219] John L. Heilbron, “J. J. Thomson and the Bohr atom.” *Physics Today* 30 (4, abril 1977): 23-30, na p. 23.

[220] Andrade, *Rutherford and the nature of atom*, p. 122

[221] A *Nature* publicou apenas uma pequena nota sobre a publicação de Rutherford, junto às demais publicações do período, sem nenhum destaque.

essa comunidade de cientistas, pois não contemplava o interesse geral desses pesquisadores.

O modelo proposto por Rutherford só passaria a adquirir alguma consideração dois anos depois (1913), ao ser usado como ponto de partida para o modelo proposto por Bohr. Cabe destacar que o dinamarquês, apesar de utilizar o modelo nuclear de Rutherford, enfocava a dinâmica dos elétrons, sua distribuição, propriedades, etc. Por isso logo interessou à maioria dos pesquisadores da área no período.

Rutherford prosseguiu suas investigações no campo da Radioatividade, sendo responsável direta ou indiretamente pelas descobertas das partículas constituintes do núcleo (prótons e nêutrons), deixando sua marca na história do átomo clássico.

CAPITULO 5

A PROPOSTA DE NICHOLSON

5.1. A VIDA E A CARREIRA

John William Nicholson (1881-1955) teve produção destacada no campo da matemática e da astronomia. Para as finalidades deste trabalho, destacaremos suas contribuições nos campos da astroquímica e física das partículas. Seus trabalhos sobre os espectros de nebulosas e da coroa solar, parecem ter marcado o início da utilização da quantização do momento angular dos elétrons girando num átomo para explicar os espectros dos elementos vinculados à estrutura extranuclear do átomo. Esta constituiu uma questão básica para o desenvolvimento de toda a teoria quântica do átomo a partir de Bohr.

Nicholson nasceu em 1 novembro de 1881 em Darlington (Inglaterra), filho mais velho de John William Nicholson e de Alice Emily Kirton, e morreu em Oxford (Inglaterra) no dia 10 de outubro de 1955, após ter estado por longo período doente. John William Nicholson Jr. foi seu filho mais velho e teve um irmão e duas irmãs[222].

---

[222] Russel McCormach, "Nicholson, John William", *in:* C.C. Gillispie, ed., *Dictionary of Scientific Biography.* V.9. (New York: Charles Scribner's Sons, 1981), pp. 106-107.

Até 1898 estudou na *Middlesbrough High School*, onde demonstrou grande aptidão pelas matemáticas e ciências. Quando jovem teve grande interesse em entomologia, colecionando borboletas e insetos em geral[223].

Nicholson estudou em Manchester de 1898 a1901, tendo se graduado (BSc) em física em 1902 e feito seu mestrado (MSc) em 1905. Além da sólida formação em física no tempo em que permaneceu em Manchester iniciou a amizade com Arthur Stanley Eddington (futuro Sir Arthur Eddington), que permaneceu por toda a sua vida[224].

Em 1902 partiu para o *Trinity College* de Cambridge, onde teve atuação que mereceu obtendo várias distinções: em 1904, a *tripos* de matemática e o 12º *Wrangler*; em 1906 ganhou a bolsa de estudos Isaac Newton. Também nesse período ele completou sua formação na Universidade de Londres, graduando-se (BSc) em matemática e física experimental em 1903 e doutorado (DSc) em 1906[225].

John Nicholson demonstrava ser um excelente estudante e com disposição para realizar mais de uma atividade ao mesmo tempo. Enquanto concluía o mestrado em Manchester, já estudava em Cambridge. Logo em seguida concomitante com as atividades em Cambridge onde obteve o título mestre (MSc), aprofundava sua formação em matemática e física experimental em Londres.

No período que Nicholson permaneceu em Cambridge atuou no laboratório Cavendish, obtendo uma série de distinções acadêmicas por suas investigações. Em 1907 recebeu Prêmio Smith e foi eleito *fellow* da *Royal*

---

[223] Russel McCormach, "Nicholson, John William", *in:* C.C. Gillispie, ed., *Dictionary of Scientific Biography*. V.9. (New York: Charles Scribner's Sons, 1981), pp. 106-107.
[224] Wilhelm Wilson. "John William Nicholson. 1881-1955." *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society* 2 (November. 1956): 209-214, na p. 209.
[225] Russel McCormach, "Nicholson, John William", p.106.

Astronomical Society em 1911. Nesse período, Nicholson desenvolveu suas pesquisas sobre a estrutura dos átomos e iniciou suas publicações[226].

Em 1912, após uma criteriosa seleção e justificada[227] por sua extensa produção bibliográfica e experiência anterior como conferencista[228], foi indicado pelo senado da Universidade de Londres, assumindo em primeiro de janeiro de 1913, como professor de Matemática no *King's College.* Lá foi colega de Charles G. Barkla que era o titular em Física, e também colaborou [no King's] com Thomas R. Merton na medida e interpretação da intensidade das linhas espectrais[229].

O período em Londres lhe propiciou mais distinções. Recebeu em 1913 e 1917 o Prêmio Adams e foi eleito *Fellow* da *Royal Society of London*, em 1917. Além da Sociedade de Astronomia e da Royal Society, ele também foi membro da *London Mathematical Society*, *Société de Physique*, *Röntgen Society* e *Physical Society*. Foi presidente da *Röntgen Society*, vice-presidente da *Physical Society* e também Presidente (1920-30) do Comitê de tabelas matemáticas da *British Association*[230].

Em outubro de 1921 Nicholson foi para Oxford, tendo sido *Fellow* do *Balliol College*, permanecendo vinculado ao *College* até 1932. Em 1922[231] assumiu como lente (*Lecturer*) em Matemática, cargo que ocupou até 1930.

---

[226] Russel McCormach, "Nicholson, John William", p.106.

[227] Em consulta aos arquivos do *King's College – London*, foi possível identificar uma controvérsia antes da posse de Nicholson. Havia um 'candidato' já atuando no *College* e que deveria ter prioridade no momento da seleção, segundo alguns integrantes do Conselho Superior. Mas afinal permaneceu o critério da produtividade e excelência acadêmicas apresentadas por Nicholson. (*King's College* – London, Senate Minutes 205 e 211 de 23 de outubro de 1912).

[228] Nicholson teve também uma rápida passagem como conferencista na *Queen's University* em Belfast.

[229] John Jones, "Nicholson, John William", in H. C. G. Matthew & B. Harrison, ed., *Oxford dictionary of national biography*. (Oxford: University Press, 2004): 433-434, na p. 434.

[230] Wilson. "John William Nicholson. 1881-1955.", p. 212.

[231] O *Oxford Dictonary of National Biography* informou seu ingresso como *Lecturer* em 1927. Todavia na consulta a documentos do *Balliol College* encontramos a data apresentada (1922), o que nos parece

Durante o resto de sua vida, Nicholson permaneceu em Oxford, onde se casou em 1922, com Dorothy Maude Wrinch (1894–1976), matemática e feminista, *Fellow* do *Girton College* de Cambridge. A então Dra. Dorothy Wrinch Nicholson mudou-se para Oxford, assumindo como tutora no *Lady Margaret Hall*. Eles tiveram uma filha Pamela Wrinch Nicholson[232] (1927-1975) e separaram-se, oficialmente, em 1938[233].

O período de atuação no *Balliol College* foi definitivo para manifestação de sérios problemas mentais que afastariam Nicholson definitivamente da pesquisa científica.

Encontramos documentos que atestam a ocorrência da primeira internação de Nicholson em 1924 no The *Cassel Hospital for Functional Nervous Disorder*, em Kent. O médico responsável informou: "Na minha opinião ele está doente desde 1916. Naquele período ele teve uma grande crise de ansiedade e seu sistema nervoso começou a dar sinais de esgotamento"[234] Nesse mesmo documento, o médico apontou a ocorrência de um acidente com Nicholson no verão de 1923 e que este poderia ter agravado sua saúde mental e torná-lo mais suscetível ao alcoolismo. Entretanto, ao final, o diretor médico informou à direção do *Balliol College* que Nicholson estaria apto para retornar às suas atividades e não oferecia risco para si ou para os outros.

Em 5 de maio de 1930 J. W. Nicholson foi novamente internado, desta vez no *Norwood Sanatorium* em Oxford para tratamento de alcoolismo, onde

---

muito mais coerente frente ao reconhecimento que Nicholson teve ao ingressar em Oxford, muito diferente do que poderá ser percebido em 1927.

[232] Pamela, em sua adolescência já vivendo nos Estados Unidos com a mãe e o padrasto, retiraria definitivamente o sobrenome do pai, assinando-se apenas Pamela Wrinch. (Material concerning the affairs and lunacy of JW Nicholson FRS, 1921 – 1940. *Balliol College Archives and Manuscripts*, Balliol College, Oxford University).

[233] Jones, "Nicholson, John William", p. 434.

[234] Documento datado de 24 de setembro de 1924. (Material concerning the affairs and lunacy of JW Nicholson FRS, 1921 – 1940. *Balliol College Archives and Manuscripts*, Balliol College, Oxford University).

teve um prognóstico de pronto restabelecimento conforme parecer enviado pelo médico responsável por seu tratamento para o *Balliol College* [235].

Entretanto, seus problemas parecem ter continuado. Conforme relato de ex-aluno de Nicholson, suas atitudes em suas últimas conferências no *Balliol* eram muito estranhas o que deve ter resultado na nova internação, em 12 de outubro do mesmo ano, no Hospital Warneford, em Oxford. Um novo boletim datado de 20 de outubro do mesmo ano informou que a doença de Nicholson era bastante séria e que, mesmo que ele pudesse retornar às suas atividades no *College*, se esperava que pudesse realizar um trabalho de menor responsabilidade[236]. Mas Nicholson nunca mais retornou às atividades acadêmicas. Mesmo permanecendo internado no hospital, ele continuou recebendo seu pagamento do *Balliol College* até o final do ano letivo de 1932 e posteriormente. Conforme análise de documentos do *College*, foi mantida uma pensão que garantiu a permanência de Nicholson no hospital até sua morte em 1955[237].

Consultando os documentos de Nicholson no Arquivo do *Balliol College* encontramos o atestado de óbito onde está registrada a morte de John William Nicholson, com 73 anos de idade, em 10 de outubro de 1955 no Hospital Warneford de Oxford, tendo como *causa mortis* a degeneração do miocárdio e arteriosclerose[238].

---

[235] Documento datado de 16 de maio de 1930. (Material concerning the affairs and lunacy of JW Nicholson FRS, 1921 – 1940. *Balliol College Archives and Manuscripts,* Balliol College, Oxford University). .

[236] Material concerning the affairs and lunacy of JW Nicholson FRS, 1921 – 1940. *Balliol College Archives and Manuscripts,* Balliol College, Oxford University.

[237] (Material concerning the affairs and lunacy of JW Nicholson FRS, 1921 – 1940. *Balliol College Archives and Manuscripts,* Balliol College, Oxford University).

[238] Atestado de Óbito. (Material concerning the affairs and lunacy of JW Nicholson FRS, 1921 – 1940. *Balliol College Archives and Manuscripts,* Balliol College, Oxford University).

Nicholson estava separado de sua esposa desde 1938. Ela e a filha haviam se mudado para os Estados Unidos. Mesmo após o novo casamento de sua ex-esposa com o biólogo Otto Charles Glaser (1880–1951), em 1941, Nicholson não alterou o testamento feito em 1922. Ele a manteve como beneficiária de sua herança[239].

5.2. UM POUCO DAS INVESTIGAÇÕES DE JOHN W. NICHOLSON

Como já mencionamos antes, Nicholson desenvolveu grande parte de suas pesquisas nos campos da matemática e astronomia (astrofísica e astroquímica) e para as finalidades dessa tese destacaremos apenas algumas publicações dos campos da física e da astroquímica.

Seus artigos foram publicados, com raras exceções[240], em dois periódicos: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* e *Philosophical Magazine* divididos pelo tema abordado. As características assumidas de acordo com o periódico de publicação são claramente percebidas, não apenas pelo assunto, mas também pela forma de estruturação do texto e pelos referencias utilizados, todavia uma marca atravessa a maioria das publicações de Nicholson: a exaustiva discussão matemática. Sua marca de físico-matemático está presente em quase toda sua produção.

Desde o início de suas publicações, é possível identificar uma grande variedade de temas como ondas eletromagnéticas, som, corrente elétrica, condutores elétricos, raios X, espectroscopia e modelos atômicos. É importante destacar que o período entre 1911 e 1917 foi praticamente dedicado aos

---

[239] Jones, "Nicholson, John William", p. 434.

[240] Após sua eleição como *Fellow* da *Royal Society*, em 1917, é possível perceber um maior número de publicações suas nos periódicos dessa Sociedade, mas a maioria delas é constituída por artigos escritos em colaboração com alunos, colegas ou mesmo com a própria esposa.

estudos sobre espectroscopia e à teoria atômica, tema que continuou presente, junto a outras investigações, até sua última publicação em 1925 .

Nicholson nunca chegou a escrever um livro sozinho, mas contribuiu no livro *Problems of Modern Science*, editado por Arthur Dendy em 1922; participou com Arthur Schuster na 3ª edição do *An Introduction of the Theory of Optics* publicado em 1924 e editou com Sir Joseph Larmor o *Scientific Papers of S. B. McLaren* em 1925.

Dentre as investigações realizadas entre 1905 e 1911 podemos destacar um artigo onde ele tratou do espalhamento do som[241], utilizando a teoria de Lord Rayleigh. Esta já havia sido considerada por Geiger em sua teoria sobre o espalhamento das partículas alfa, conforme já vimos.

Destacamos também que antes das publicações dos artigos sobre a estrutura atômica de 1911, foi possível identificar a construção de suas idéias sobre o movimento dos elétrons a partir do estudo do movimento de esferas eletrificadas em artigos publicados em 1910[242]. O primeiro tem data de conclusão de 28 de maio e o segundo tem apenas a data de publicação – novembro. Em abril de 1911, ele publicou um terceiro artigo onde estabeleceu relação entre os anteriores e a radiação de elétrons em movimento[243]. Encontramos nessa publicação um dos pontos de partida para sua teoria atômica: considerar que o elétron não está sujeito a contração quando em movimento.

---

[241] John W. Nicholson, "The scattering of sound by spheroids and disks", *Philosophical Magazine [6]* 14 (81, set. 1907): 364-377.
[242] Nicholson, "The accelerated motion of an electrified sphere", *Philosophical Magazine [6]* 20 (1910): 610-618.
[243] Nicholson, "On the damping of the vibrations of a dielectric sphere, and the radiation from a vibrating electron", *Philosophical Magazine [6]* 21 (124, april 1911): 438-446.

Além dos artigos sobre o movimento de esferas carregadas, Nicholson também publicou um artigo[244] sobre teoria eletrônica em metais, onde mostrou ter conhecimento das teorias desenvolvidas por Drude, Riecke, Schuster, Lorentz, Jeans e principalmente por Thomson em teoria eletrônica. Como pudemos perceber diversas trilhas de investigação convergem em Nicholson nesse momento, propiciando que ele construísse e apresentasse suas teorias sobre a estrutura atômica.

5.3. O ÁTOMO DE NICHOLSON

Nicholson desenvolveu sua teoria sobre a constituição da matéria concomitante com os estudos dos espectros da coroa solar e das nebulosas. Sua primeira comunicação sobre o tema aconteceu em Portsmouth num Encontro da *British Association*, em 11 de agosto de 1911. Os primeiros artigos publicados foram escritos em Cambridge e publicados no *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* – "The Spectrum of Nebulium", em novembro de 1911; "Constitution of solar corona I: Protofluorine", em dezembro; e também no *Philosophical Magazine* - "A Structural Theory of the Chemical Elements", em dezembro de 1911.

Esses primeiros trabalhos sobre a estrutura do átomo supõem um núcleo maciço e elétrons em órbitas, não tendo referência nas investigações de espalhamento desenvolvidas no laboratório de Rutherford[245], sendo provavelmente derivados das idéias de Nagaoka *(Philosophical Magazine,* 1904) e Thomson (*Philosophical Magazine*, 1904). Ao que tudo indica, como

---

[244] Nicholson, "On the number of electrons concerned in metallic conduction", *Philosophical Magazine [6]* 22 (1911): 245-266, nas pp. 245-246.

[245] As investigações parecem ter acontecido ao mesmo tempo para Nicholson em Cambridge e Rutherford e seu grupo em Manchester.

sugere a documentação, Nicholson foi o primeiro a usar este modelo com sucesso para prever linhas espectrais de corpos celestes antes mesmo destas serem observadas.

Para Nicholson, cada distribuição eletrônica corresponderia a uma emissão específica no espectro de raias dos átomos[246]. Em seus artigos, discutiu questões sobre a dimensão dos átomos bem como as questões do momento angular e da inserção das idéias de Planck na explicação dos modelos de átomo, apontando que o momento angular do átomo poderia somente assumir certos valores discretos.

Em seus estudos sobre o "*protofluorine*", citou o trabalho de Planck pela primeira vez, introduzindo que o momento angular de um átomo pode somente aumentar e diminuir em valores discretos, mais tarde ele definiu essas mudanças discretas do momento angular como múltiplos inteiros de h / 2π.

Cabe destacar que Bohr seguiria outro caminho, introduzindo a constante de Planck (h) pela equação da energia cinética do elétron, ½ nhw (w – freqüência de revolução do elétron), como se o elétron girando fosse um oscilador de Planck, o que é equivalente a equação do momento angular de revolução do elétron nh /2π.

Observando os espectros da coroa solar, Nicholson identificou que os comprimentos de onda (λ) aparecem em progressão aritmética, eram conhecidas as linhas λ=3534,5; λ= 4359 e λ= 5303,3. Determinando que a diferença comum dos valores de $\lambda^{1/3}$ é 1103, previu então a próxima linha para

[246] Nesse período ainda ocorreu um debate sobre a origem das freqüências identificadas nos espectros dos elementos, seja em diferentes modos de vibração de um tipo de sistema ou em vibrações de sistemas de diferentes tipos. (Harold A. Wilson "The Theory of Spectral Series". *Philosophical Magazine[6],* 23 (136, april 1912): 660-663.

λ=6374,8. Posteriormente Deslandres e Carrasco encontraram essa linha (λ=6374,6) no espectro registrado durante um eclipse[247].

O artigo publicado no *Philosophical Magazine* em 1911 apresentava uma estrutura diferente dos artigos publicados concomitantemente pela *Royal Astronomical Society*. O destaque nesse artigo era a estrutura dos átomos, tendo as questões de análise dos espectros celestes como dados que justificavam sua proposta. Parece que nesse artigo Nicholson buscava o reconhecimento da comunidade da física que investigava a estrutura atômica[248], utilizando seus referenciais e temas principais – tabela periódica, radioatividade, peso atômico - para justificar um trabalho que foi desenvolvido majoritariamente a partir da astroquímica.

Nicholson teve um grande cuidado nessa publicação, começando do seguinte modo: "Este artigo traz uma consideração preliminar da teoria estrutural dos elementos químicos"[249] e mais adiante "o artigo é especulativo"[250], afirmações que poderiam auxiliar na sua defesa frente às possíveis críticas. O artigo mostra que J. J. Thomson, sem dúvida representou para Nicholson uma de suas principais referências, como podemos ver pelo trecho seguinte:

> Do ponto de vista desenvolvido neste trabalho, a eletricidade positiva existe em unidades de raio muito pequeno se comparado

---

[247] Russel McCormmach "The atomic theory of John William Nicholson." *Archive for History of Exact Science* 3 (1966): 161-184, na p. 171.

[248] As publicações anteriores de Nicholson no *Philosophical Magazine* tinham uma estrutura completamente diferenciada, assentando suas análises em equações matemáticas. Enquanto o artigo de 1911 tinha um caráter bem mais hipotético e qualitativo, lembrando muito o tipo de produção de J. J. Thomson em teoria atômica.

[249] John Nicholson, "A structural theory of the chemical elements." *Philosophical Magazine [6]* 22 (dez. 1911): 864-889, na p. 864.

[250] *Ibid*, p. 865.

> com o dos elétrons, e é a fonte de quase toda a massa do átomo. O sistema em revolução é, portanto, um planetário, sendo notável que Rutherford, em um estudo recente, tenha concluído que o sistema planetário é o mais provável, a partir das evidências fornecidas por experimentos de espalhamento. A concepção de Thomson sobre distribuição uniforme no volume é essencial para os cálculos do presente teoria[251].

Apesar dos trabalhos de Nicholson terem sido desenvolvidos de forma concomitante com as investigações de Rutherford, no momento da publicação desse artigo, Nicholson já tinha conhecimento da publicação do modelo de Rutherford. Entretanto, como já vimos antes esse modelo não fornecia bases suficientes dentro da eletrodinâmica tradicional, para estabilidade do modelo, assim, para seus cálculos, Nicholson acabou privilegiando o modelo de Thomson, embora possamos identificar que suas concepções tendem ao átomo nuclear:

> Evidentemente a dificuldade é extrema considerando os átomos sob o ponto e vista do Sir J. J. Thomson, mas, é preciso ter em mente, foi apenas um ponto de vista provisório adotado principalmente por razões de simplicidade matemática.[252]

A utilização desse modelo para seus cálculos foi apontada como um dos principais equívocos de sua teoria inicial que propunha a existência de

---

[251] Nicholson, “A structural theory of the chemical elements”, pp. 865-866.
[252] *Ibid*, p. 866.

elétrons positivos e estava mais próxima das idéias propostas em Nagaoka, em 1904, do que das idéias de Rutherford de 1911.

A proposta de constituição dos átomos a partir de substâncias primárias ou “protyles” é detalhada nesse artigo:

> Os elementos simples, ou melhor, os constituintes a partir dos quais, propomos a construção de todos os outros, consistem em anéis únicos, de elétrons girando ao redor de pequenos núcleos de eletricidade positiva. Estes núcleos são pequenos em comparação com o elétron, e fornecem quase toda a massa do átomo. O número dessas substâncias, cuja existência é declarada, é quatro, mas apenas três são utilizadas nas construções que se seguem[253].

As quatro *substâncias primárias* ou “protyles” apontadas por Nicholson são os hipotéticos: (I) *Coronium* – átomo contendo um único anel com dois elétrons girando ao redor de um núcleo positivo; (II) Hidrogênio[254] - átomo contendo um único anel com três elétrons girando ao redor de um núcleo positivo; (III) *Nebulium* - átomo contendo um único anel com quatro elétrons girando ao redor de um núcleo positivo; (IV) *Protofluorine* - átomo contendo um único anel com cinco elétrons girando ao redor de um núcleo positivo. Destacamos que para essas *substâncias primárias* Nicholson considerou que a carga do núcleo era sempre suficiente para garantir a neutralidade do átomo.[255]

---

[253] Nicholson, “A structural theory of the chemical elements”, p. 867.
[254] Para Nicholson existia diferença entre o átomo de Hidrogênio e seu ‘protyle” hidrogênio, que contém 3 elétrons.
[255] Nicholson, “A structural theory of the chemical elements”, pp. 867-868.

Pela combinação de três[256] dessas substâncias primárias se formariam todos os átomos conhecidos, chamados de compostos[257], e para discutir a estabilidade do modelo proposto por ele, Nicholson apontou as restrições de Schott ao modelo de Nagaoka, e partiu da seguinte hipótese:

> se *n* elétrons estão girando a distâncias iguais ao redor do mesmo círculo, e cada um tem uma aceleração de mesmo valor em direção ao centro, e a soma vetorial dessas acelerações é igual a zero. Esta é condição de Larmor para a ausência de radiação[258].

Por esse motivo, a primeira *substância primária* possui dois elétrons, e não apenas um, para garantir estabilidade.

Para a melhor compreensão de sua hipótese, Nicholson apresentou exemplos da constituição de átomos a partir das *substâncias primárias:*

Por exemplo, se um elemento consistisse de um composto de *nebulium* e *protofluorine,* ele poderia ser um átomo feito de dois anéis coplanares de quatro e cinco elétrons, respectivamente, e dois núcleos positivos. A característica essencial é que estes dois núcleos não devem fundir-se em um. Os elementos separados existem em um sentido, mas não no sentido químico, no qual os dois elementos que existem lado a lado, como unidades separadas, mantidos juntos talvez pela transferência de elétrons de um para o outro[259].

---

[256] Segundo Nicholson, o *Coronium* não era utilizado.
[257] Nicholson diferenciou seus compostos (atômicos), dos compostos químicos (moleculares).
[258] Nicholson, "A structural theory of the chemical elements", p. 868.
[259] *Ibid*, p. 870.

Além disso, ele desenvolveu cálculos que justificam os pesos atômicos a partir dos pesos atômicos hipotéticos das *substâncias primárias* para muitos elementos químicos, entre metais, não-metais, gases nobres e elementos radioativos.

O primeiro artigo sobre o espectro do *Nebulium* publicado no *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* em novembro de 1911, apontava questões semelhantes às discutidas no artigo do *Philosophical Magazine* e mais uma vez tinha suas referências nos modelos de Thomson e Nagaoka. Destacava que o elemento hipotético seria responsável pelas riscas, do espectro das nebulosas, que não são associadas ao Hidrogênio ou ao Hélio, e também previa o aparecimento de uma linha em λ= 4352,9[260] em espectros de nebulosas.

Este artigo, concluído em 25 de outubro de 1911, assim como os demais sobre o tema, publicados pela *Royal Astronomical Society* apresentavam as características da produção no campo da física matemática, ricamente sustentados em equações matemáticas para decifrar as relações eletrodinâmicas no átomo e sua correspondente manifestação nos espectros.

Nicholson considerou que:

> ω é a velocidade angular do anel de elétrons em constante movimento. Isto não irá causar confusão com a ω, uma enésima parte da unidade, usada anteriormente. O raio das órbitas é *a*, portanto, $ma\omega^2$ deve ser a força normal em direção ao centro, agindo sobre um elétron. O núcleo positivo gera uma atração

[260] Em evento da *Royal Astronomical Society* de março de 1912 foi anunciada a descoberta de uma linha λ= 4353 em espetros da Nebulosa de Orion. Nicholson, New nebular line, jun 1912. (Nicholson, " new nebular," p.693.)

> radial ve^2/a^2, e a ação combinada dos outros elétrons gera uma repulsão radial $e^2S_n/4\alpha^2$.[261]

Nicholson calculou as equações para os períodos de vibração do *Nebulium*, que permitiram confirmar a concordância com as linhas encontradas no espectro conhecido bem como propor a existência de outras que ainda não haviam sido observadas.

Além disso, apontando que os elétrons giravam em velocidades pequenas comparadas com a velocidade da luz, Nicholson calculou o raio do *Nebulium* que coincidiu com a mesma ordem de grandeza (10^{-8}) dos valores do raio atômico conhecidos no período.

O artigo seguinte publicado no *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* em dezembro de 1911 fez um estudo semelhante ao desenvolvido para o *Nebulium*, dessa vez para o *Protofluorine*, o elemento hipotético encontrado no espectro da coroa solar. Destacamos aqui a apresentação de argumentos que corroboravam sua escolha de um modelo do tipo saturniano:

> A instabilidade de um único átomo tem sido usada contra o modelo de Nagaoka, mas em uma massa de gás, por exemplo, em que elétrons estão livres para se deslocar de átomos instáveis para estáveis, a crítica não me parece válida contra a existência de modelos átomos deste tipo. Existem muitos fenômenos físicos que podem facilmente receber uma explicação, se átomos

[261] John Nicholson, "The spectrum of nebulium", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 72 (1, nov. 1911): 49-64, p. 53.

> *individuais* de um corpo não podem manter estáveis todos os seus elétrons.[262].

O artigo publicado em junho de 1912 sobre a constituição da coroa solar merece uma atenção especial, pois citou pela primeira vez a teoria de Planck sobre a radiação do corpo negro e os *quanta* de energia:

> A constante da natureza, em termos de seus espectros, parece poder ter sido expressa por Planck, na sua recente teoria quântica da energia. É evidente que o modelo de átomo com que lidamos tem muitas das características essenciais de um oscilador de Planck. Eles possuem uma freqüência principal ω/2π, onde ω é a velocidade angular dos elétrons dentro do átomo, e vimos, na discussão dos espectros, que esta é normalmente a freqüência uma linha forte do espectro de um átomo. Não é desejável, neste trabalho, dar qualquer explicação detalhada dos princípios da teoria de Planck, mas iremos dispor de seus principais resultados[263].

As bases da teoria quântica do átomo estavam definitivamente lançadas na ciência inglesa[264], buscando explicar o que a eletrodinâmica convencional não explicava, pois ainda, nas palavras de Nicholson: "não é

---

[262] John Nicholson, “Constitution of solar corona I.: protofluorine”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 72 (2, dez. 1911): 139-150, na p.148.
[263] John Nicholson, “Constitution of solar corona II”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 72 (8, june 1912): 677-692, na p. 677.
[264] Em nossa pesquisa encontramos que nesse período, na França e Alemanha, Hass e J. Perrin haviam sugerido a existência de um vínculo entre as teorias atômica e quântica.

possível representar a dinâmica mais recente por conjuntos de equações diferenciais"[265].

De forma diferenciada dos artigos anteriores Nicholson, nesse artigo, conduziu suas investigações a partir da energia envolvida nos sistemas atômicos

> Vamos examinar a energia de um 'único' sistema atômico, constituído por um anel de *n* elétrons equidistantes girando em um círculo de raio *a* em torno de uma carga positiva v*e*, onde *e* é a carga elétrica. Para um único elétron, a equação da energia, como na teoria de órbitas, é uma força atrativa ve^2/r^2 em uma distância *r*, do tipo
>
> $$\tfrac{1}{2}mv^2 = \mathrm{D} - \int \frac{ve^2}{r^2}\,dr = \mathrm{D} + \frac{ve^2}{a},$$
>
> Onde *m* e *v* são a massa e a velocidade de um elétron, e D é uma constante. Quando *n* elétrons estão presentes juntos, as distâncias que os separam tem vários valores de magnitudes de *2a sin r/n*, de modo que a energia potencial do sistema atômico, seria *nve/a* na ausência da ação mútua entre cargas negativas, é alterada para:
>
> $$-\frac{ne^2}{a}(v - \tfrac{1}{4}\mathrm{S}_n),$$
>
> Onde:

[265] Nicholson, “Constitution of solar corona II”, p. 677.

$$S_n = \sum_{r=1}^{n-1} \operatorname{cosec} r\pi/n.$$

A equação da energia é:

$$\tfrac{1}{2}mnv^2 = \frac{ne^2}{a}(\nu - \tfrac{1}{4}S_n) + D,$$

Onde D é a energia numa configuração padrão. Em D está incluída qualquer energia intrínseca que os elétrons e o núcleo podem possuir - como, por exemplo, a que pode estar envolvida na sua expansão, se o ponto de vista de Schott para expansão eletrônica é aceita como a causa da finura de linhas espectrais[266].

E apresentou a hipótese que se tornaria a grande referência para todos os estudos posteriores, inclusive de Bohr, de quantização do momento angular:

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

[266] Nicholson, “Constitution of solar corona II” , p. 678.

> aumentar ou diminuir em valores discretos quando elétrons saem ou retornam[267].

A partir dessa consideração, Nicholson estabeleceu os cálculos para relação entre a energia e as freqüências de emissão dos átomos do *protofluorine* e chegou a expressar o espectro na forma de uma série, que não era do tipo Balmer, Kaiser e Runge ou Rydberg[268].

Para estabelecer os comprimentos de ondas das emissões Nicholson considerou que os elétrons não contribuíam definitivamente para o peso do átomo:

> O valor de M [massa do núcleo positivo] é, naturalmente, desconhecido, mas é um ponto de vista essencial considerar que o peso atômico desta substância é comparável com o de hidrogênio, que o valor de m / M [massa do elétron / massa do núcleo] deve ser muito pequena. Na verdade, acredita-se geralmente que os elétrons não contribuem muito para o peso atômico[269].

Considerando que o núcleo é o responsável principal pelo peso atômico do átomo, bem como que este núcleo é capaz de movimento, Nicholson também estabeleceu a contribuição dessa vibração nuclear para os espectros identificados para o *protofluorine*, encontrando equações

---

[267] Nicholson, "Constitution of solar corona II", p. 679.
[268] Nicholson destacou que essas respectivas séries diziam respeito a elementos com estrutura mais complicada que o *protofluorine*, que teriam mais de um anel no sistema atômico. (Nicholson, "Constitution of solar corona II", p. 681.
[269] Nicholson, ""Constitution of solar Corona II," pp. 681-682.

semelhantes às encontradas por Thomson para seu modelo, porém com coeficientes diferentes.

A seqüência da discussão sobre a constituição da coroa solar foi publicada em artigo[270] no final do ano de 1912. O ponto de partida continuou sendo o espectro da coroa solar e a possível utilização da teoria quântica para sua explicação:

> A teoria quântica, aparentemente, não tem sido utilizada para explicação da 'série' espectros, que consiste em um grande número de linhas relacionadas dadas para um átomo relativamente simples. No entanto, na opinião do autor, ela fornece, em certos casos, a verdadeira explicação, e somos levados a supor que as linhas de uma série podem não emanar do mesmo átomo, mas a partir de átomos cujos momentos angulares tenham, por radiação ou por outra forma, decaído por diferentes quantidades discretas de um valor padrão. Por exemplo, nessa visão, existem vários tipos de átomo de hidrogênio, idêntico em propriedades químicas e até no peso, mas diferentes em seus movimentos internos [271].

Nicholson acreditava que as linhas dos espectros eram definidas pelo estado do átomo (neutro ou carregado), ou seja, para Nicholson o átomo é nuclear e cada distribuição eletrônica corresponde a uma emissão específica no espectro de raias dos átomos.

---

[270] Jonh Nicholson, "Constitution of solar corona III," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 72 (1912): 729-739.
[271] *Ibid*, pp. 729-730.

Após essas publicações Nicholson aprofundou a discussão sobre os espectros do Hidrogênio e do Hélio em artigos que estabeleceram um diálogo com as idéias publicadas por Bohr, produzindo críticas que discutiremos após o detalhamento das idéias de Bohr.

CAPÍTULO 6

A PROPOSTA DE BOHR

6.1. A VIDA E A CARREIRA

Niels Henrik David Bohr (1885–1962)[272] foi um dos mais influentes cientistas do século XX e vem recebendo um tratamento especial por parte dos historiadores da ciência. O número de artigos e livros sobre suas contribuições assim como sobre sua vida é extenso. A maioria deles apresenta apenas a grande relevância do trabalho de Bohr em teoria atômica e na formulação do princípio da correspondência, sem destacar a importância do trabalho de seus contemporâneos para a construção de suas idéias, reforçando a imagem de um jovem gênio criativo e solitário em seu trabalho inédito.

Neste capítulo procuraremos dar subsídios que permitam ao leitor conhecer outros aspectos relacionados à contribuição de Bohr. Tomaremos como referências os trabalhos dos principais autores que identificam o trabalho de Bohr imerso nas discussões de seu tempo e no contexto da comunidade científica do início do século XX, bem como o estudo de documentos originais de Bohr e seus correspondentes.

Niels Bohr nasceu em Copenhague no dia 7 de outubro de 1885 e morreu no dia 18 de novembro de 1962, na sua cidade natal. Niels era o segundo numa família de três filhos. Seu pai – Christian Bohr - foi professor de

---

[272] Para mais informações biográficas sobre Niels Bohr, veja: R. E. Peierls, *Atomic Histories* (New York: Charles Scribners's Sons, 1981); Ruth Moore, *Niels Bohr: The man, his science & the world they changed*, Cambridge/MA/London: MIT Press, 1985.

psicologia da Universidade de Copenhague e sua mãe – Ellen Adler – pertencia a uma importante família judia da Dinamarca. Niels e seus irmãos tiveram uma ótima educação formal, cultural e esportiva. Seu irmão Harald, foi considerado mais brilhante que Niels. Na Universidade de Copenhague onde estudou física, matemática, química e astronomia, Niels se tornou um investigador perspicaz. Seu primeiro projeto de investigação foi a precisa determinação da tensão superficial da água e lhe rendeu uma medalha de ouro da Academia de Ciências[273]. Mesmo com toda sua produção acadêmica, Bohr nunca escreveu um único livro. Suas produções, em geral, são em geral conferências, que foram publicadas, e artigos, e estão em torno de cerca de cento e cinqüenta[274].

Niels e Harald cresceram numa atmosfera de discussões acadêmicas e filosóficas na casa de seus pais. Eles podiam ouvir em silêncio os debates entre seu pai e amigos, lembrando que Christian Bohr estudava as bases físicas dos processos psicológicos e suas discussões deviam circular em torno de questões epistemológicas da biologia[275].

Em Copenhague, Bohr fez a graduação, mestrado e doutorado[276], concluído em 1911. Foi orientado pelo físico Christian Christiansen (1843-1917). O assunto da tese foi a aplicação da teoria dos elétrons à explicação das propriedades físicas dos metais. Era um trabalho puramente teórico que dava continuidade à dissertação de mestrado de 1909, e descrevia o comportamento dos elétrons num metal como um gás movendo-se mais ou

---

[273] Leon Rosenfeld "Bohr, Niels Henrik David" *in* GILLESPIE, C. C., org. *Dictionary of scientific biography.* V.2, New York: Charles Scribner's sons, 1981, 239.
[274] Ruth Moore, *Niels Bohr: The man, his science & the world they changed. (*Cambridge/ Massachusetss/ London: MIT Press, 1985), p. vii.
[275] Rosenfeld "Bohr, Niels Henrik David", p. 240.
[276] A tese de Bohr foi traduzida para o inglês somente após sua morte. A defesa pública foi realizada no tempo-recorde de 90 minutos, em 13 de maio 1911 (John L. Heilbron & Thomas Kuhn, "The genesis of the Bohr atom." *Historical Studies in the Physical Sciences* 1(1969): 211-290, na p. 214).

menos livremente[277]. Ele teve muitos problemas para um tratamento quantitativo adequado com base na eletrodinâmica tradicional[278], e saiu convencido de que era fundamental uma ruptura com física teórica clássica. Em suas palavras: "posso assumir que há forças na natureza de um tipo completamente diferente da mecânica usual"[279]. Provavelmente ele considerou a teoria quântica de Planck como um dos caminhos para resolver esses problemas[280].

6.1.1. BOHR EM CAMBRIDGE

Após defender sua tese, em setembro de 1911 Bohr encaminhou-se para Cambridge[281] – Inglaterra para continuar seus estudos sobre a teoria dos elétrons, no Laboratório Cavendish dirigido por J. J. Thomson. Bohr considerava o Laboratório Cavendish o mais importante do mundo, no campo da constituição da matéria, e admirava o trabalho de J.J. Thomson: "Primeiramente eu considerava Cambridge como o centro da Física [...] e Thomson como o homem mais maravilhoso [...], um gênio que mostrou o caminho para todos"[282]. Entretanto, apesar dessa grande admiração por Thomson, Bohr não obteve a recepção que esperava por parte do diretor do Laboratório.

Em sua primeira noite em Cambridge, Bohr escreveu para sua noiva Margrethe: "eu precisava contar para você um pouco do quão excitado eu

---

[277] Bohr tinha como referência o trabalho de H.A. Lorentz (1905) que dizia que o gás de elétrons e as moléculas metálicas estacionárias permanecem em equilíbrio termo-mecânico, na ausência de campos externos ou diferença de temperatura; e que com o seu ação de forças externas, as moléculas atuam isotropicamente sobre os elétrons (*Ibid)*.

[278] Leon Rosenfeld "BOHR, Niels Henrik David" *in* GILLESPIE, C. C. org. *Dictionary of scientific biography*. Nova Iorque: Charles scribner's sons, 1981, p. 239.

[279] Niels Bohr, *apud*, John Heilbron e Thomas Kuhn, The genesis of the Bohr atom", p. 215.

[280] Heilbron & T. Kuhn, The genesis of the Bohr atom", p. 212.

[281] Com financiamento de uma bolsa da Fundação Carlsberg.

[282] Entrevista de Niels Bohr para John Heilbron e Thomas Kuhn, "The genesis of the Bohr atom", p. 223.

fiquei quando li o nome Cambridge”[283]. Todavia a estada não foi como Bohr esperava. Suas expectativas em relação ao seu trabalho com J. J. Thomson não foram atingidas. Em sua primeira entrevista com J. J. levou uma tradução de sua tese para leitura de Thomson. Ele comentou sobre este encontro em carta escrita ao irmão Harald, datada de 29 de setembro:

> Eu acabei de falar com J. J. Thomson [...] e expliquei a ele tão bem quanto possível minhas idéias sobre radiação, magnetismo, etc. Você deve saber o que significou para mim falar ele. Ele foi muito atencioso comigo; nós falamos sobre diversas coisas; e creio que ele pensa existir alguma coisa naquilo que eu disse. Ele prometeu ler minha tese, e me convidou para jantar com ele no próximo sábado no Trinity College, quando ele falará comigo sobre isso [...] Eu não posso lhe dizer como estou feliz e agradecido que (a tradução de) minha dissertação [tese] foi concluída e pude entregá-la a Thomson[284].

Nesse primeiro encontro além da tese, Bohr levou um artigo do próprio Thomson (sobre a teoria dos elétrons nos metais) no qual Bohr fez questão de apontar, em seu inglês deficiente[285],os erros cometidos por Thomson. De acordo com John Helbrun e Thomas Kuhn, “Bohr pode indicar os erros que descobriu, mas foi completamente incapaz de explicar seus argumentos”[286].

---

[283] Carta de Bohr para sua noiva Margrethe, apud, Ruth Moore, *Niels Bohr: The man, his science & the world they changed. (*Cambridge/ Massachusetss/ London: MIT Press, 1985), p. 31.
[284] Niels Bohr, *apud*, John Heilbron e Thomas Kuhn, “The genesis of the Bohr atom”, p. 224.
[285] Nesse momento Bohr lia Dickens para aperfeiçoar seu inglês (Ruth Moore, *Niels Bohr: The man, his science & the world they changed*, p. 33).
[286] Heilbron & Kuhn, “The genesis of the Bohr atom”, p. 225.

Parece-nos que essa não foi a melhor estratégia para um primeiro encontro. Ao que tudo indica, Thomson parece nunca ter chegado a ler a tese de Bohr e ao mesmo tempo nunca chegou a ter uma relação amistosa com o jovem dinamarquês.

Apesar disso, Bohr começou seus trabalhos com tubos de descarga de raios catódicos no laboratório Cavendish e tratou de conhecer vários pesquisadores como John E. Littlewood, Lorrain Smith e Samuel B. McLaren[287] aos quais foi apresentado por carta de seus professores de Copenhague. Freqüentou os seminário de James Jeans e Joseph Larmor e dois cursos de Thomson, além de tentar publicar sua tese pela *Cambridge Philosophical Society*[288].

Em carta enviada para seu amigo Carl W. Ossen no final de 1911, Bohr deixou claro seu interesse pela teoria de Planck:

> Neste momento eu estou muito entusiasmado com a teoria quântica (eu penso em seu lado experimental), mas ainda não estou certo se isso é devido à minha ignorância. Posso dizer o mesmo, em mais alto grau, sobre minha relação com a teoria dos magnétons.[289]

A associação entre os dois temas apontados na carta também pode ser percebida no primeiro artigo da trilogia de 1913, que fixa o momento angular e

---

[287] Heilbron & Kuhn, "The genesis of the Bohr atom", p. 229.
[288] Sua tese foi considerada muito longa para publicação e Bohr decidiu não fazer os cortes sugeridos. Além disso, muitos de seus achados já haviam sido publicados por outros autores (Heilbron & Kuhn, "The genesis of the Bohr atom", pp. 229-230)
[289] Essa teoria sobre as propriedades magnéticas de certos metais foi proposta por Pierre Weiss (Heilbron & Kuhn, "The genesis of the Bohr atom", p. 230).

o relaciona com o valor da constante de Planck. De acordo com Heilbron e Kuhn, Bohr poderia ter criado essa relação por si só ou ter descoberto na literatura que havia sido desenvolvida por várias pessoas no outono de 1911. Weiss foi um dos autores que relacionou os magnétons com a constante de Planck e além dele, Abraham e Gans também o fizeram. Ao que tudo indica, Bohr teve acesso ainda em 1911 a estes textos[290].

6.1.2. BOHR EM MANCHESTER

Niels Bohr encontrou Ernest Rutherford, o promissor jovem doutor neozelandês, ganhador do prêmio Nobel em 1907 que parece ter se tornado uma inspiração para ele[291]. A partir daí se originou uma forte amizade que perdurou até a morte de Rutherford (1937).

Esse primeiro encontro aconteceu no começo de novembro de 1911 na casa da Profa. Lorrain Smith[292], exatamente quando Rutherford retornava do primeiro Congresso Solvay - tema da primeira conversa entre os dois. Logo em seguida, Bohr reencontrou Rutherford no jantar anual do Laboratório Cavendish. Foi após esses encontros desenvolvem-se as negociações em torno da possibilidade de uma estadia de Bohr em Manchester.[293]

Em Manchester, entre março e julho de 1912, Bohr tratou de aprofundar seus conhecimentos sobre radioatividade e realizou medidas da absorção dos raios α pelos metais buscando calcular a perda de energia

[290] Heilbron & Kuhn, “The genesis of the Bohr atom”, p. 232.
[291] Rosenfeld “BOHR, Niels Henrik David”. p. 240.
[292] Lorrain Smith foi aluna do pai de Bohr e nesse momento era professora de psicologia na Universidade de Manchester. (Heilbron & Kuhn, “ The genesis of the Bohr atom”, p. 233)
[293] Heilbron & Kuhn, “The genesis of the Bohr atom”, p. 233.

quando da passagem pela matéria[294]. Ele ampliou sua compreensão do modelo atômico de Rutherford ao mesmo tempo em que desenvolveu as bases para a publicação de seus artigos “Sobre a constituição de átomos e moléculas” que foram apresentados em 1913. Neles Bohr propôs seu modelo para explicar o átomo proporcionando uma mudança radical na compreensão da estrutura atômica. Além de desenvolver seu trabalho bastante próximo de Rutherford, que fazia questão de acompanhar pessoalmente o trabalho desenvolvido por seus estudante e assistentes, Bohr teve a oportunidade de conhecer pesquisadores como G. Hevesy, C.G Darwin, H. Geiger e o jovem E. Marsden que foram importantes interlocutores ao longo de sua vida.

Em sua estada em Manchester, Bohr, mesmo trabalhando com radioatividade não deixou de continuar suas investigações teóricas sobre a teoria eletrônica dos metais conforme cartas enviadas para seu irmão Harald e analisadas por Heilbron [295].

Em junho de 1912 podemos encontrar os primeiros indícios da produção teórica que resultaria na famosa trilogia. Em carta a seu irmão Bohr comentou:

> Há alguns dias atrás tive uma pequena idéia para entender a absorção das partículas α,[...] estive trabalhando numa pequena teoria sobre isso, o que pode não ser muito em si, mas talvez possa jogar um pouco de luz sobre algumas questões relativas à

[294] Niels Bohr publicou sobre esta investigação em janeiro de 1913, o artigo “Decrease of speed of electrified particles on passing through matter” no *Philosophical Magazine*, pp.10-31.
[295] Heilbron & Kuhn, “The genesis of the Bohr atom”, pp. 211-290.

estrutura dos átomos. Estou pensando em publicar um pequeno artigo sobre isso em breve[296].

6.2. O MODELO DE BOHR

Em julho 1913 iniciou-se a publicação da reverenciada trilogia de Bohr "Sobre a constituição de átomos e moléculas", no *Philosophical Magazine*, e que teve continuidade nos meses de setembro e novembro do mesmo ano com a publicação das partes II e III. Na primeira parte, Bohr apresentou sua teoria da constituição dos átomos, detalhando sua proposta para o átomo de hidrogênio; na segunda parte, Bohr ampliou sua discussão para átomos com mais elétrons girando em torno do núcleo do átomo e finalmente no último artigo da trilogia ele se preocupou com as moléculas, ou seja, discutiu a ligação entre os átomos.

Os pontos principais das partes II e III da trilogia já estavam praticamente claros para Bohr em julho de 1912 e muitas idéias da parte I foram registradas num memorando produzido ao final de suas atividades em Manchester << Primeiro esboço das idéias contidas na memória 'Sobre a constituição de átomos e moléculas' (escritas para mostrar estas considerações ao Prof. Rutherford) (junho e julho de 1912) >>[297] Bohr utilizava o termo "Kern" para o núcleo do átomo de Rutherford e já apresentava claramente sua escolha por esse modelo frente ao de J. J. Thomson e há um destaque grande para as propriedades químicas e formação de moléculas, temas que são discutidos nas partes II e III, levando a supor que o 1º. artigo foi

---

[296] Carta de Niels Bohr para seu irmão Harald, datada de 12 de junho de 1912, *apud*, Heilbron & Kuhn, "The genesis of the Bohr atom", p. 237.

[297] "The Rutherford memorandum (1912)" in Leon Rosenfeld (ed.) *Niels Bohr collected works.* V.2. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1981. pp. 135-158.

provavelmente o último a ser concluído, pois apresenta idéias que não aparecem nesse primeiro esboço.

A inclusão do espectro de raias do hidrogênio, espectro atômico, fórmula de Balmer, parece ter sido de última hora. Essas questões, além de não aparecerem nas anotações anteriores de Bohr, foram também negadas por ele até cerca de um mês antes de enviar o primeiro manuscrito para Rutherford. Em carta enviada para Rutherford em 31 de janeiro de 1913, Bohr foi explicito "Não trato, de modo nenhum, da questão do cálculo das freqüências correspondentes às riscas do espectro visível."[298].

No final de 1912 parece que Bohr assumiu as trilhas que o levariam a produzir definitivamente sua teoria aliando seus pressupostos teóricos a dados experimentais. Isso se deu pelo contato com os trabalhos de Nicholson, que são citados pela primeira vez no cartão de Natal enviado para seu irmão Harald:

> P.S.: Embora não fique bem num cartão de Natal, um de nós [Bohr e esposa assinam o cartão] gostaria de dizer que a teoria de Nicholson não é incompatível com a sua própria. De fato, os cálculos seriam válidos para o estado final, químico, dos átomos, enquanto Nicholson se referiria a átomos emitindo radiação, quando os elétrons estão em processo de perda de energia antes de terem ocupado as suas posições finais. Assim, a radiação teria lugar por impulsos (o que é muito ao seu favor) e Nicholson

[298] Ulrich Hoyer "Introduction" in Leon Rosenfeld (ed.) *Niels Bohr collected works.* V.2. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1981. p. 108.

> estaria a considerar os átomos enquanto o seu conteúdo de energia é ainda tão grande que emitem luz no espectro visível. Depois, a luz é emitida no ultravioleta, até que toda energia que pode ser radiada se perca.[299]

6.2.1 O PRIMEIRO ARTIGO

A primeira parte da trilogia foi enviada para Rutherford[300] em 6 de março de 1913. Bohr iniciou seu primeiro artigo apresentando um pouco sobre as teorias sobre a estrutura atômica disponíveis no período: o modelo de Rutherford "os átomos são constituídos por um núcleo carregado positivamente, rodeado por um sistema de elétrons ligados pelas forças atrativas do núcleo"[301]; e o modelo de J. J. Thomson "o átomo é formado por uma esfera de eletrização positiva uniforme, dentro da qual os elétrons se movem em órbitas circulares"[302].

Bohr iniciou suas argumentações sobre os modelos destacando que o modelo de Thomson permitia a determinação de sua extensão linear e o sistema apresentava um equilíbrio estável e que o modelo de Bohr não permitia essa determinação e que do ponto de vista da eletrodinâmica clássica era instáve. Esta questão da dimensão do átomo é discutida ao longo do texto, demonstrando a preocupação de Bohr em relacionar suas hipóteses com os dados experimentais disponíveis sobre as dimensões do átomo. A partir dessa

---

[299] Ulrich Hoyer "Introduction" in Leon Roselfeld (ed.) *Niels Bohr collected works.* V.2. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1981. p. 108.
[300] Rutherford era editor do Philosophical Magazine.
[301] Niels Bohr, "On the constitution of atoms and molecules." *Philosophical Magazine [6]* 26 (151, julho 1913): 1-25, na p. 1.
[302] *Ibid*, p. 2.

discussão Bohr introduziu a necessidade de novas explicações sobre a estrutura atômica:

> a eletrodinâmica clássica não consegue descrever o comportamento de sistemas de dimensões atômicas. [...] parece necessário introduzir nas leis em questão uma quantidade alheia à eletrodinâmica clássica, a constante de Planck, ou quantum elementar de ação.[303]

Bohr deixou clara sua escolha pelo modelo de Rutherford:

> Este artigo é uma tentativa para mostrar que a aplicação das idéias acima [movimento elétrons e constante de Planck] mencionadas ao modelo atômico de Rutherford constituem uma base para uma teoria da constituição dos átomos. Mostrar-se-á, além disso, que a partir desta teoria somos conduzidos a uma teoria da constituição das moléculas.[304]

Este modelo oferecia uma instabilidade do ponto de vista de eletrodinâmica tradicional, o que era absolutamente oportuno para o desenvolvimento das idéias de Bohr. Tomando como verdadeiro esse modelo foi possível desenvolver suas conseqüências, pensando separadamente os fenômenos químicos ordinários e os fenômenos nucleares.

---

[303] Bohr, "On the constitution of atoms and molecules", p. 2.
[304] *Ibid*, pp. 2-3.

Bohr também procurou localizar seu trabalho no contexto os debates contemporâneos:

> Contudo, a maneira de considerar um problema desta espécie sofreu alterações essenciais em anos recentes devido ao desenvolvimento da teoria da radiação de energia e à confirmação direta dos novos pressupostos introduzidos nesta teoria, encontrada em experiências relacionadas com fenômenos muito diferentes tais como calores específicos, efeito fotoelétrico, raios de Röntgen, etc. O resultado da discussão destas questões parece ser um reconhecimento geral de que a eletrodinâmica clássica não consegue descrever o comportamento de sistemas de dimensões atômicas.[305]

É compreensível a influência dos trabalhos sobre calor específico e raios Röntgen na discussão atômica, assim como, também poder-se-ia considerar as investigações sobre radiação do corpo negro. Todavia os debates sobre o efeito fotoelétrico parecem estar fora do contexto desse primeiro artigo de Bohr. A partir dessa leitura, podemos considerar que a participação de Rutherford no 1º. Congresso Solvay tenha influenciado o trabalho que vinha sendo desenvolvido por Bohr, em Manchester, nesse período. Todavia, a situação das investigações naquele momento não era suficiente para Bohr afirmar "ser de reconhecimento geral que a eletrodinâmica clássica não conseguia descrever o comportamento de sistemas de dimensões

[305] Bohr, "On the constitution of atoms and molecules", p. 2.

atômicas”[306]. A citação das atas do congresso Solvay parece ser apenas um argumento para favorecer seu ponto de vista. Todavia, as posições apresentadas naquele congresso não caracterizavam hegemonias na comunidade científica. Talvez representassem justamente o oposto: o debate de idéias que muitas vezes eram divergentes.

Bohr introduziu também nesse artigo a discussão sobre o espectro de emissão do hidrogênio, como comprovação experimental de suas hipóteses: “Será mostrado que é possível, sob o ponto de vista adotado, explicar de maneira simples a lei do espectro de linhas do hidrogênio.”[307]

Nesse ponto, o autor apresentou o principal sustentáculo experimental de sua teoria – os espectros de linhas – além disso, podemos perceber a utilização do adjetivo – simples - para qualificar o trabalho que ele desenvolveu ao vincular estrutura atômica, teoria de Planck e leis dos espectros de linha, como uma possível comparação com a complexidade de outras teorias, como a de Nicholson, que tentavam explicar esses vínculos também.

A partir da escolha do modelo de Rutherford e da teoria de Planck, e das questões da dimensão do átomo e dos espectros de emissão, Bohr desenvolveu seus argumentos considerando “em primeiro lugar que não há radiação de energia. Neste caso, o elétron descreverá órbitas elípticas estacionárias”[308] e a teoria da radiação de Planck que determina que a irradiação de energia em um sistema atômico não acontece de maneira contínua, conforme seria esperado considerando a eletrodinâmica clássica. Bohr assinalou que foi Einstein o primeiro a destacar a importância da teoria de

---

[306] Bohr, “On the constitution of atoms and molecules”, p. 2.
[307] *Ibid*, p. 3.
[308] *Ibid.*

Planck para a discussão dos sistemas atômicos e que a primeira tentativa de produzir esta integração foi desenvolvida por Hass, entre 1910 e 1912. Ele procurou “explicar o significado e o valor da constante de Planck baseada no modelo atômico de J. J. Thomson, por intermédio das dimensões lineares e da freqüência de um átomo de hidrogênio”[309].

Bohr introduziu a constante de Planck para análise de um sistema atômico supondo que esse se comporta com um vibrador atômico. Bohr esclareceu:

> Agora o ponto essencial na teoria da radiação de Planck é que a irradiação de energia por um sistema atômico não tem lugar da maneira contínua admitida na eletrodinâmica usual, mas que, pelo contrário, se dá por emissões distintamente separadas, sendo a quantidade de energia irradiada numa só emissão por um vibrador atômico de frequência *v* igual *a* τhv, em que τ é um número inteiro e *h* uma constante universal e a partir da equação da energia cinética
>
> $$W = \tau h \frac{\omega}{2}, \qquad (2)$$
>
> fazendo as devidas substituições para obter W máxima considerando $\tau = 1$ e E = *e,* e substituindo os devidos valores experimentais obtém

[309] Bohr, “On the constitution of atoms and molecules”, p. 6.

$$2a = 1.1 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{cm}, \quad \omega = 6.2 \cdot 10^{15}\ \frac{1}{\mathrm{sec}}, \quad \frac{W}{e} = 13\ \mathrm{volt}.$$

valores que de acordo com dados experimentais “são da ordem de grandeza das dimensões lineares dos átomos, das frequências ópticas e dos potenciais de ionização.[310]

Na continuidade do artigo Bohr fez uma descrição dos trabalhos desenvolvidos por Nicholson e apontou que ele chegara a resultados semelhantes aos seus.

sistemas da espécie considerada neste trabalho, nos quais as forças entre as partículas variam na razão inversa do quadrado da distância, são discutidos, em relação com a teoria de Planck, por J. W. Nicholson. Numa série de artigos, este autor mostrou que parecia possível explicar o aparecimento de raias de origem até aqui desconhecida nos espectros das nebulosas estelares e no da coroa solar, supondo estarem presentes nestes corpos certos elementos hipotéticos de constituição exatamente indicada. Admite-se que os átomos destes elementos são formados simplesmente por um anel com alguns elétrons em torno de um núcleo positivo de dimensões desprezívelmente pequenas. As razões entre as frequências correspondentes às raias em questão são comparadas com as razões entre as frequências correspondentes a diferentes modos de vibração do anel de

[310] Bohr, “On the constitution of atoms and molecules”, p. 5.

> elétrons. Nicholson obteve uma relação com a teoria de Planck mostrando que as razões entre os comprimentos de onda dos diferentes conjuntos de raias do espectro coronal podem ser explicadas com grande rigor supondo que a razão entre a energia do sistema e a frequência de rotação do anel é igual a um múltiplo da constante de Planck. A quantidade a que Nicholson se refere como sendo a energia é igual a duas vezes a quantidade que acima representámos por W. No último artigo citado Nicholson achou necessário dar à teoria uma forma mais complicada representando, contudo, a razão entre a energia e a frequência ainda por uma função simples de números inteiros.[311]

Aqui temos a primeira referência de Bohr aos trabalhos de J. W. Nicholson, onde podemos destacar alguns aspectos: Há um erro na data citada por Bohr, pois os dois primeiros artigos (p.49 e p.139) são de 1911, sendo apenas os três últimos de 1912. A forma de citação é distanciada utilizando o termo “este autor”, diferentemente de todas as outras referências ao longo do texto.

Na continuação do artigo, Bohr comentou:

> Deve notar-se que a teoria [de Nicholson] na forma dada não parece ser capaz de explicar as bem conhecidas leis de Balmer

[311] Bohr, “On the constitution of atoms and molecules”, pp. 6-7.

> e Rydberg que relacionam as frequências das linhas nos espectros de raias dos elementos ordinários.[312]

Mais uma vez destacamos como, parece que em algumas semanas Bohr se apropriou da discussão sobre as linhas espectrais chegando aos trabalhos de Rydberg sobre a classificação das séries espectrais e à fórmula de Balmer através da qual conseguiu através incorporar o quantum de ação na descrição dos sistemas atômicos e também apresentar dados experimentais que concordavam com sua teoria.

Após a exposição de seu principal argumento experimental (feita através do relato dos trabalhos de Nicholson) Bohr sistematizou seus pressupostos básicos para levar a cabo a solução dos problemas que ele considerava não resolvidos em Nicholson:

> Tentar-se-á agora mostrar que as dificuldades em questão desaparecem se considerarmos os problemas sob o ponto de vista adotado neste artigo. Antes de continuarmos é útil enunciar de novo, resumidamente, as idéias que caracterizam os cálculos da p. 5. Os principais pressupostos utilizados são:
>
> (1) Que o equilíbrio dinâmico dos sistemas nos estados estacionários pode ser discutido por meio da mecânica ordinária, enquanto a passagem dos sistemas entre diferentes estados estacionários não pode ser tratada nessa base.

[312] Bohr, “On the constitution of atoms and molecules”, p. 7.

> (2) Que este último processo é seguido pela emissão de uma radiação *homogênea,* para a qual a relação entre a frequência e a quantidade de energia emitida é a dada pela teoria de Planck.[313]

Explicitamente estão postos um pilar de sustentação na física clássica e outro na teoria quântica nascente, fato que deverá acompanhar todo o trabalho desenvolvido por Bohr. A partir desses pressupostos básicos, Bohr desenvolveu a explicação do espectro de emissão do hidrogênio, considerando a equação da energia cinética para os estados estacionários e efetuando seus cálculos para a energia envolvida transição entre esses sistemas de acordo com a teoria de Planck, comentando: "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"[314] obtendo séries que típicas de Balmer.

Seus resultados não parecem estar completamente de acordo com as observações de Fowler de espectros estelares e tubos de descarga contendo misturas de hidrogênio e hélio. Todavia Bohr atribuíu tais diferenças ao Hélio:

> A razão porque o espectro considerado não é observado nos tubos de hélio usuais pode ser porque nesses tubos a ionização do hélio não é tão completa como na estrela referida ou nas experiências de Fowler, nas quais se dá uma descarga forte através de uma mistura de hidrogênio e hélio. A condição para o aparecimento do espectro será, de acordo com a teoria acima

[313] Bohr, "On the constitution of atoms and molecules", p. 7
[314] *Ibid*, p. 8.

> proposta, que os átomos de hélio estejam presentes num estado em que perderam ambos os seus elétrons. Depois, é necessário supor que a quantidade de energia gasta para remover o segundo elétron do átomo de hélio deverá ser muito maior do que a que foi utilizada na remoção do primeiro. Além disso, sabe-se, como resultado de experiências feitas com raios positivos, que os átomos de hidrogênio podem adquirir carga negativa; por conseguinte, a presença de hidrogênio nas experiências de Fowler pode criar condições para que saiam mais elétrons de alguns átomos de hélio do que sairiam se só o hélio estivesse presente.[315]

Este se tornaria o grande foco do debate que vai se estabelecer entre Bohr e Nicholson. Bohr procurará mostrar que feitos os devidos ajustes sua teoria é capaz de explicar espectros de emissão de elementos com maior número de elétrons, o que Nicholson rebate veementemente .

Confirmando sua preocupação com a física clássica, bem como com as questões já levantandas por Nicholson, Bohr introduziu a discussão sobre o momento angular[316]:

> Embora não esteja, obviamente, em questão a fundamentação mecânica dos cálculos apresentados neste artigo, é, todavia, possível dar uma interpretação muito simples para o resultado do cálculo da p. 5 empregando símbolos tirados da mecânica

[315] Bohr, “On the constitution of atoms and molecules”, pp. 10-11.
[316] O momento angular é o caminho encontrado por Nicholson para inserção da teoria de Planck.

usual[317]. Representando o momento angular do elétron em torno do núcleo por M, temos imediatamente para uma órbita circular $\pi M = {}^{T}/_{\omega}$, sendo ω a frequência de revolução e T a energia cinética do elétron; para uma órbita circular temos, além disso, T = W (ver p. 3) e de (2), p. 5, obtemos consequentemente:

$$M = \tau M_0,$$

Onde:

$$M_0 = \frac{h}{2\pi} = 1.04 \cdot 10^{-27}.$$

Por conseguinte, se assumirmos que a órbita do elétron nos estados estacionários é circular, o resultado do cálculo da p. 5 pode ser expresso pela simples condição: o momento angular do elétron em torno do núcleo, num estado estacionário do sistema, é igual a um múltiplo inteiro de um valor universal, independente da carga do núcleo. A possível importância do momento angular na discussão dos sistemas atômicos em relação com a teoria de Planck é realçada por Nicholson.[318]

Através dessa recorrência a eletrodinâmica tradicional e aos trabalhos de Nicholson, Bohr chegou a generalização que utilizaria como ponto de partida nos demais artigos da trilogia:

[317] Destaque à busca de explicações que se assentem na mecânica clássica, caracterizando um período de transição entre as explicações de modelo atômico
[318] Bohr, “On the constitution of atoms and molecules”, p. 15.

> Para um sistema formado por um núcleo e por um elétron girando à sua volta, este estado [permanente] é, de acordo com o que foi dito antes, determinado pela condição de o momento angular do elétron em torno do núcleo ser igual a $^{h}/_{2\pi}$.[319]

Juntamente com os pressupostos iniciais vem a se caracterizar os conhecidos Postulados de Bohr:

> 1. Que a energia não é emitida (ou absorvida) da maneira contínua admitida pela eletrodinâmica clássica, mas apenas 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 da mecânica clássica, não se verificando estas leis 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 freqüência 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 constituído por um elétron que roda em volta 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

[319] *Ibid*.,, p. 22.

durante a formação da configuração e a freqüência 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 um sistema atômico – isto é, o estado no qual a energia emitida é máxima – é determinado pela condição de ser igual a $h/2\pi$ o momento angular de cada elétron em torno do centro da sua órbita.[320]

De acordo com Leon Rosenfeld, essas hipóteses têm um caráter arrojado do ponto de vista de inclusão da teoria quântica ao propor que a freqüência de uma radiação emitida ou absorvida por um átomo não coincidisse com qualquer freqüência do seu movimento interno deve ter parecido à maior parte dos físicos contemporâneos como quase impensável[321].

Pode se dizer que, ao mesmo tempo, apresentam um caráter conservador do ponto de vista de manter sua sustentação na física clássica.

6.2.2. OS ARTIGOS 2 E 3

O segundo[322] e terceiro artigos[323] da trilogia de Bohr detalham um pouco mais a estrutura do átomo isolado e da formação de moléculas com mais de um átomo. Nesses artigos podemos identificar o predomínio das explicações clássicas, bem como uma forma bastante semelhante aos

---

[320] Niels Bohr, "On the constitution of atoms and molecules: part III – systems containing several nuclei." *Philosophical Magazine [6]* 26 (nov. 1913): 857-875, nas pp. 874-875.
[321] Rosenfeld, "Bohr, Niels Henrik David", p. 240.
[322] Niels Bohr, "On the constitution of atoms and molecules: part II – systems containing only a single nucleus." *Philosophical Magazine [6]* 26 (153, set. 1913): 476-502.
[323] Bohr, "On the constitution of atoms and molecules: part III," pp. 857-875.

trabalhos de J. J. Thomson vinculando propriedades químicas, bem como radioatividade com a hipótese atômica proposta. Destacamos que Bohr tomou como ponto de partida o modelo nuclear de Rutherford:

> Devido às pequenas dimensões do núcleo, a sua estrutura interna não terá influência considerável sobre a constituição do aglomerado de elétrons e, consequentemente, não terá qualquer efeito sobre as propriedades físicas e químicas ordinárias do átomo. Estas últimas propriedades, segundo a teoria, dependerão inteiramente da carga total e da massa do núcleo; a estrutura interna do núcleo só terá influência nos fenômenos de radioatividade[324].

Diferentemente do artigo anterior, Bohr apresentou seus cálculos para a estabilidade dos sistemas atômicos "introduzindo a condição de constância universal do momento angular do elétron"[325] e determinando as respectivas freqüências de vibração. A partir dessas relações com cálculos semelhantes aos apresentados no artigo 1, Bohr começou a detalhar o vínculo entre a distribuição eletrônica e as propriedades dos elementos. Ele esclareceu:

> Atendendo à concepção geral de formação dos átomos e utilizando o conhecimento das propriedades dos elementos correspondentes, procurar-se-á obter, nesta seção e na seguinte, indicações sobre as configurações dos elétrons cuja existência

[324] Bohr, "On the constitution of atoms and molecules: part II" p. 477.
[325] *Ibid*, p. 478.

> nos átomos é prevista. Nestas considerações suporemos que o número de elétrons existentes no átomo é igual ao número indicativo da posição do elemento correspondente na série de elementos dispostos por ordem crescente dos pesos atômicos. Admitir-se-á que apenas haverá exceções a esta regra nos lugares da série em que se observam desvios em relação à lei de variação periódica das propriedades químicas dos elementos.[326]

Além do vínculo entre a estrutura atômica e as propriedades dos elementos, vinculando também a Tabela Periódica, nesse artigo Bohr fez considerações sobre os fenômenos radioativos, considerando que estes estão vinculados ao núcleo dos átomos e não à distribuição eletrônica.

No terceiro artigo, Bohr se preocupou em aplicar sua teoria, baseada no modelo atômico de Rutherford, à constituição das moléculas:

> De acordo com a teoria sobre a estrutura dos átomos de Rutherford, a diferença entre o átomo de um elemento e a molécula de uma combinação química é que o primeiro é formado por um aglomerado de elétrons rodeando um único núcleo positivo de dimensões extremamente pequenas e de massa grande em comparação com a dos elétrons, enquanto a última contém pelo menos dois núcleos a distâncias um do outro comparáveis com as distâncias que separam os elétrons no aglomerado que os envolve[327].

---

[326] Bohr, “On the constitution of atoms and molecules: part II”, pp. 486-487.
[327] Bohr, “On the constitution of atoms and molecules: part III”, p. 857.

Mais uma vez a base dos cálculos e das conclusões estava assentada sobre a mecânica clássica, apenas com a introdução do pressuposto assumido a partir de Nicholson:

> Como nos artigos anteriores, admitiremos que as condições de equilíbrio podem ser deduzidas por intermédio da mecânica ordinária. Todavia, ao determinarmos as dimensões absolutas e a estabilidade dos sistemas empregaremos a hipótese principal da Parte I. De acordo com ela o momento angular de qualquer elétron em movimento em torno do centro da sua órbita é igual a um valor universal $h/2\pi$, sendo h a constante de Planck[328].

Bohr identificou que os cálculos, semelhantes aos desenvolvidos para um átomo, se tornariam muito complexo quando são consideradas moléculas com vários átomos que contenham muitos elétrons. Dessa forma, acaba restringindo suas considerações a sistemas que contém um número pequeno de átomos[329] como a molécula de hidrogênio e fazendo algumas considerações sobre moléculas mais complexas e suas possíveis estruturas considerando sua teoria.

Bohr concluiu suas publicações reafirmando suas bases na física clássica e suas hipóteses que trilhavam um caminho ainda incerto:

---

[328] Bohr, "On the constitution of atoms and molecules: part III", p. 858.
[329] *Ibid*, p. 863.

> É evidente a conexão íntima entre a presente teoria e as modernas teorias da radiação do corpo negro e do calor específico; como, à luz da eletrodinâmica clássica, o momento magnético devido a um elétron girando em órbita circular é proporcional ao momento angular[330].

Este último parágrafo do artigo final de Bohr em 1913 é bem característico do momento de transição, onde as novas idéias se apresentam juntamente com as idéias que as antecedem, fato reforçado na carta enviada a Rutherford em 6 março de 1913, anexa à primeira versão da primeira parte da trilogia:

> Espero que concorde em que adotei um ponto de vista razoável em relação à questão delicada da utilização simultânea da antiga mecânica e dos novos pressupostos introduzidos pela teoria da radiação de Planck. Estou ansioso por saber o que pensa de tudo isso.[331]

Esta característica levou Heilbron[332] a considerar as 'inovações' de Bohr**,** como desenvolvimento do Programa de Pesquisa de J. J. Thomson, tendo em vista que os dois últimos artigos da trilogia de Bohr podem ser pensados como continuidade do Programa de Pesquisa relativo J. J. Thomson. Apenas no primeiro artigo esta vinculação pode ficar um pouco obscurecida já

---

[330] Bohr, "On the constitution of atoms and molecules: part III", p. 875.
[331] Ernest Marsden, *Correspondence of Lord Rutherford of Nelson. V.1-9.* London: Royal Society, 1956.
[332] John L. Heilbron, "Rutherford-Bohr", *American Journal of Physics* 49 (1981): 223-231.

que este está diretamente vinculado à tradição de Cambridge por apresentar a discussão sobre os espectros do hidrogênio e relação com o trabalho de Balmer e Planck. Destacamos ainda que um dos obstáculos para a reconstrução da histórica da ciência ocorre quando a ordem de apresentação e divulgação é inversa à ordem das descobertas. Nesse sentido, observamos que o primeiro artigo de Bohr é resultado de seu trabalho em 1913 e os dois seguintes são relativos ao período anterior de permanência na Inglaterra (1911 e 1912). Heilbron chamou a atenção para o paradoxo das propostas de Bohr (1913) que, por um lado deram fôlego ao Programa de Pesquisa de J. J. Thomson, confirmando sob certos aspectos suas previsões, mas por outro lado, esses trabalhos serviram para demolir algumas bases desse Programa ao possibilitar caminhos que levaram às explicações da mecânica quântica que suplantarem as idéias da mecânica clássica[333].

Não há dúvidas quanto ao impacto causado pela publicação desse artigo sobre o desenvolvimento das teorias atômicas e da constituição das moléculas. É importante registrar que esse impacto foi alto desde o primeiro momento. Imediatamente começaram a ser publicados muitos artigos que discutiam o modelo proposto por ele e também confirmações experimentais de sua teoria. Nos anos seguintes a teoria quântica se ampliou e consolidou com os trabalhos do próprio Bohr e outros como Sommerfeld, Pauli, Goudsmit e Uhlenbeck, Stern e Gerlach[334]. Bohr recebeu muitas homenagens relativas à sua contribuição à teoria quântica. Dentre elas estão: a Medalha Hughes da *Royal Society*, em 1921 e o Prêmio Nobel de Física, em 1922 consolidando sua

[333] Heilbron, “Rutherford-Bohr”, pp. 223-231.
[334] Rudolf E. Peierls, *Atomic histories*. New York: AIP Press. 1996.

posição dentro da comunidade científica bem como em relação a relevantes fatos sociais e políticos no século XX.

CAPÍTULO 7

OS DEBATES APÓS AS PUBLICAÇÕES DE BOHR

A publicação da Trilogia de Bohr, em 1913, teve um grande impacto na comunidade de físicos no período, diferentemente da publicação de Rutherford em 1911. Uma análise dos resumos publicados no *Science Abstracts: Section A- Physics* nos anos de 1913, 1914 e 1915 apontam esse alto impacto. Em julho de 1913, mês de publicação do primeiro artigo de Bohr, encontramos uma referência de Bohr em artigo[335] de Ernest Marsden (pesquisador do laboratório de Rutherford na época), referindo o uso de Planck em cálculos desenvolvidos por Bohr. Seguiram-se 19 citações em um ano e totalizaram 33 em dois anos da publicação. Destas publicações destacam-se o apoio de Ernest Rutherford, Henry G. J. Moseley, Antonius van den Broek entre outros na Inglaterra, na Alemanha, na Itália e na Holanda e as críticas de Nicholson.

Publicamente Bohr recebeu apoio de James H. Jeans, George von Hevesey, Carl W. Oseen, Hantaro Nagaoka e Arnold Sommerfeld, além das críticas de J. J. Thomson[336].

---

[335] Ernest Marsden & T.S. Taylor. "Decrease in velocity of α-particles in passing through matter." *Proceedings Royal Society [A]* 88 (1, julho 1913): 443-454, na p. 454.

[336] Rosenfeld "Introdução" In: Niels Bohr, "Sobre a constituição de átomos e moléculas", reimpressão das memórias de 1913 publicadas no *Philosophical Magazine.* Lisboa: Calouste Gulbenkian, 1969. 3ª ed., 1989.

Segundo seu filho George Thomson, J. J. Thomson foi o mais ferrenho opositor do modelo proposto por Bohr. J. J. Thomson preferia o átomo ondulatório ao átomo semi mecânico de Bohr[337]. Thomson considerou superficiais as idéias de Bohr, apontando que ele não compreendia bem o mecanismo atômico. Essa oposição de Thomson e a rápida substituição de seu programa de pesquisa pelo de Bohr obscureceu a estreita ligação entre a teoria do átomo quantizado e os ilusoriamente simples e ingênuos modelos da escola de Cambridge[338].

Todavia destacamos que as principais críticas ao modelo proposto por Bohr partiram de Nicholson através de suas publicações no *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, no *Philosophical Magazine* e na *Nature.*

7.1. A CRÍTICA DE NICHOLSON

Em dezembro de 1913 Nicholson publicou o primeiro artigo[339] que faz referências aos dois primeiros artigos de Bohr publicados nos meses de julho e setembro do mesmo ano no *Philosophical Magazine.* No artigo referido sobre o espectro das estrelas "Wolf-Rayet" Nicholson ainda não aprofundava críticas ao modelo de Bohr, considerando que:

---

[337] George Thomson, "J. J. Thomson and the discovery of the electron." In: WEART, Spencer & P. Melba (ed.) *History of physics. Readings from physics today.* (New York: American Institute of Physics, 1985): 289-293, na p. 293.
[338] John L. Heilbron, "J. J. Thomson and the Bohr atom." *Physics Today* 30 (4, abril 1977): 23-30, na p. 23.
[339] John W. Nicholson, "The spectra of Wolf-Rayet stars." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 74 (2, dec. 1913): 118-131, na p. 119.

> não está, naturalmente, em contradição com a teoria dos espectros de Bohr, na qual a natureza do processo escolhido para ligação de um elétron pelo núcleo positivo não é tratada do ponto de vista mecânico, mas sim arbitrário[340].

Mas já era possível perceber um julgamento de valor e/ou ironia na conclusão do parágrafo.

No artigo[341] seguinte publicado por Nicholson sobre o hidrogênio e o espectro de nebulosas é possível encontrar vários trechos que parecem ter sido escritos pensando na teoria de Bohr, procurando detalhar as diferenças que existem entre ambas, enfatizando que:

> A teoria atômica recente [de Bohr] nega a aplicabilidade completa da dinâmica newtoniana para as vibrações de um átomo em seu plano, talvez enquanto mantenham a freqüência normal q = w. Mas está de acordo que para as vibrações perpendiculares ao plano, a dinâmica de Newton pode ser empregada.[342]

Ao longo do artigo, Nicholson mencionou que Bohr e Rutherford chegaram a algumas conclusões semelhantes às suas por outros caminhos, destacando que para seu *protofluorine* existe uma relação simples entre o momento angular de um sistema de único anel e a constante de Planck, que

---

[340] Nicholson, "The spectra of Wolf-Rayet stars", p. 129.
[341] Nicholson,"Hydrogen and the primary constituents of nebulae", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 74 (3, jan. 1914): 204-214.
[342] *Ibid*, p. 206.

pode ser usada para determinar a dimensão do átomo e prever o comprimento de onda do sistema, mas que esse tipo de relação não pode ser aplicada imediatamente a sistemas com um único elétron, como é o caso do hidrogênio[343].

No artigo[344] seguinte publicado por Nicholson sobre os espectros do hidrogênio e do hélio, este mostrou o interesse no debate com Bohr desde a primeira linha: "O Dr. N. Bohr apresentou recentemente uma teoria de espectros que, além de sua importância para a física pura, é de grande importância para a astrofísica"[345]. Além disso, explicitou a diferença existente entre as investigações do campo da física e do campo da astronomia. Ao longo do artigo, Nicholson analisou as equações de Bohr para o hidrogênio, concluindo que suas considerações só poderiam ser válidas considerando a existência dos estados estacionários postulados por Bohr. Todavia, para Nicholson, isso só aconteceria para os átomos com 2 elétrons[346].

> Tais estados estacionários não poderiam existir sem a mais completa derrubada da dinâmica ordinária como Bohr sugeriu. A dinâmica ordinária deve falhar mesmo para a determinação dos estados estacionários.[347]

---

[343] Nicholson,"Hydrogen and the primary constituents of nebulae", p. 208.
[344] John W. Nicholson, "The spectra of hydrogen and helium", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 74 (5, march 1914): 425-442.
[345] *Ibid*, p. 425.
[346] *Ibid*, p. 441.
[347] *Ibid.*

Um dos últimos argumentos apresentados por Nicholson em artigo[348] de abril de 1914 foi a impossibilidade da teoria de Bohr para aos espectros celestes, que seriam caracterizados somente por elementos com um único anel e não teriam elétrons tão firmemente ligados como em átomos terrestres. Nicholson assim se expressou:

> Uma teoria, como a de Bohr, que descarta a dinâmica ordinária, não tem sido aplicada com sucesso para espectros astronômicos onde as linhas que não foram realmente produzidas em laboratório, e a principal razão para seu sucesso é a coincidência aproximada da constante teórica de Ridberg para os espectros, na sua aplicação aos átomos terrestres de hidrogênio e hélio[349].

Além dessa sequência de artigos publicados pela Royal Astronomical Society, no ano de 1914, Nicholson também publicou dois artigos[350] no *Philosophical Magazine* sobre a estrutura do átomo e os espectros. Nesses artigos, Nicholson retomou as críticas já apontadas nos artigos anteriores, considerando que a teoria de Bohr só seria admitida como uma tentativa que poderia dar certo para apenas dois átomos (H e He). Ele explicou que o valor do momento angular é $h/2\pi$ é válido para os elementos apontados e começou a sofrer alterações em função do número de elétrons em átomos maiores e

---

[348] John Nicholson, "The Constitution of Nebulae". *M.N. Royal Astronomical Society* 74 (6, april 1914): 486-506.
[349] *Ibid,* p. 487.
[350] John Nicholson, "The High-frequency Spectra of the Elements, and the Atomic Structure of the Atom", *Philosophical Magazine[6],* 27 (160, abril 1914): 541-564; "Atomic structure and The Spectrum of Helium". *Philosophical Magazine[6],* 28 (163, jul. 1914): 90-103.

com mais de um anel. Nesses casos ainda destacou que a forma mais aproximada para os anéis é a elíptica e que a simplificação para circular provoca várias distorções. Nicholson sintetizou:

> Como a teoria de Bohr se mostrou não ser bem sucedida quando há mais de um elétron, temos de combinar as seguintes hipóteses para tentar resolvê-la
>
> (1) Os núcleos atraem os elétrons ligados de acordo com a lei do inverso do quadrado.
>
> (2) Elétrons ligados não se repelem um ao outro de acordo com esta lei.
>
> (3) O momento angular de um elétron pode deixar de ser $\tau h/2\pi$, onde τ é um inteiro, se houver outros elétrons presentes.
>
> Como vimos, (2) e (3) não são alternativas, mas são as duas necessárias para novos progressos. A primeira hipótese é necessária até mesmo para a série de Balmer.[351]

Nicholson ainda publicou mais alguns artigos sobre as séries espectrais e a estrutura atômica, mas sua influência no campo das teorias atômicas foi desaparecendo.

---

[351] John Nicholson, "Atomic structure and The Spectrum of Helium", *Philosophical Magazine [6]* 28 (163, jul. 1914): 90-103, nas pp. 92-93.

As respostas de Bohr para Nicholson ficaram apenas nos rascunhos que nunca foram enviadas[352] até a publicação de uma resposta na revista *Nature* em 4 de março de 1915.

7.2. OS DEBATES NA *NATURE*

No período, a revista *Nature* representava um dos principais espaços de debates sobre a ciência que se produzia naquele momento e as publicações de Bohr e Nicholson mereceram um espaço importante no debate entre defensores e críticos de suas idéias sobre a estrutura atômica e suas relações com os espectros dos elementos. Este debate durou cerca de dois anos.

Logo em seguida à publicação do segundo artigo da trilogia, o próprio Bohr publicou nota[353], em 23 de outubro de 1913, na *Nature* propondo que seu modelo explicaria as novas linhas observadas por A. Fowler em espectros de misturas de H e He. No mesmo número já foi publicada a resposta de Fowler concluindo que a teoria de Bohr não era capaz de explicar as séries ordinárias do Hélio[354], e também no mesmo número um pedido de desculpas[355] de S. B. McLaren do University College para J. W. Nicholson por ter equivocadamente citado que o trabalho de Bohr era anterior ao seu.

Um dos mais fervorosos defensores da teoria de Bohr foi Moseley. Ele fez medições de comprimentos de onda de espectros de raios X de vários

---

[352] Russel McCormach, "The atomic theory of John William Nicholson." *Archive for History of Exact Science*, 3 (1966): 161-184, na p. 180.
[353] Bohr, "The spectra of helium and hydrogen." *Nature* 92 (2295, 23 oct. 1913): 231-232.
[354] Alfred Fowler "The spectra of helium and hydrogen." *Nature* 92 (2295, 23 oct. 1913): 232-233.
[355] Samuel B. McLaren, "The Theory of Radiation," *Nature* 92 (2295, 23 out. 1913): 233.

metais e utilizou seus resultados para sustentar a proposta de Bohr. Mas esta relação não estava muito clara, recebendo críticas de Frederick A. Lindemann e J. W. Nicholson. Em 1 de janeiro de 1914 Lindemann publicou nota[356] afirmando que os resultados de Moseley não confirmavam o modelo de Bohr.

Em 15 de janeiro Bohr publicou uma nota[357] reafirmando a concordância dos resultados de Moseley com seu modelo. Há uma nota do próprio Moseley garantindo que seus resultados com os espectros de raios-X poderiam sustentar tanto as idéias de Nicholson como as de Bohr[358].

Em 22 de janeiro de 1914, em uma nova nota[359], Nicholson enfatizou dessa vez a impossibilidade da existência de anéis coplanares num átomo com vários elétrons. Logo em seguida, em resposta a Sir Oliver Lodge publicou outra nota detalhando argumentando que este ponto não invalidava completamente a teoria de Bohr mas que "esta parte da teoria necessita modificação"[360].

Finalmente em 4 de março de 1915 Bohr publicou uma nota[361] em resposta a Nicholson. Nela apresentou os resultados experimentais de Evans e Fowler para sustentar sua proposta atômica para o hidrogênio e para o hélio. Bohr nunca mais se preocupou em responder os questionamentos de Nicholson. E Nicholson foi desaparecendo do cenário e a trilha do átomo de

---

[356] Frederick A. Lindemann, "Atomic Models and X-ray Spectra", *Nature* 92 (2305, 1 jan. 1914): 500-501.
[357] Niels Bohr, "Atomic Models and X-ray Spectra", *Nature* 92 (2307, 15 jan. 1914): 553-554.
[358] Henry Moseley, "Atomic Models and X-ray Spectra", *Nature* 92 (1914): 554.
[359] John W. Nicholson, "Atomic Models and X-ray Spectra", *Nature* 92 (1914): 583-584.
[360] John W. Nicholson, "Atomic Models and X-Ray Spectra", *Nature* 92 (1914): 630.
[361] Niels Bohr, "The Spectra of Hydrogen and Helium", *Nature* 95 (1915): 6-7.

Bohr, apesar dos problemas que esse modelo apresentava, levou a pesquisa da estrutura atômica na direção do átomo da mecânica quântica.

Mas esta trilha começou a ser percorrida nas estrelas, nas investigações sobre os átomos das estrelas e seus espectros, que conduziram Nicholson a propor seu modelo que foi de fundamental importância para o desenvolvimento das hipóteses de Bohr.

CAPÍTULO 8

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Trilhamos nas páginas anteriores por diversos campos e conceitos que se entrelaçaram entre o final do século XIX e início do século XX para produzir o que conhecemos, hoje, como os primeiros modelos atômicos quantizados. Átomos físicos, átomos químicos, átomos terrestres, átomos celestes, moléculas físicas e moléculas químicas se fundiram e se diferenciaram na construção de explicações que ultrapassaram campos conceituais e forçaram a afirmação de novos campos, a reestruturação de antigos conceitos e a aceitação de novos.

Além de contar um pouco dessa longa caminhada por esses diversos campos, neste trabalho procuramos, principalmente, restabelecer um lugar de destaque para as investigações no campo da astroquímica na História dos Modelos Atômicos. Desde os primeiros estudos dos espectros de corpos celestes foi possível identificar a busca de argumentos que explicassem a estrutura dos elementos que constituem estes corpos celestes. Estudos esses que na maioria do tempo se produziram paralelamente às investigações da estrutura dos átomos terrestres, mas que acabaram por fornecer a mais importante contribuição de dados experimentais para o estabelecimento das primeiras explicações quantizadas de átomo – os espectros elementares. O encontro das investigações em átomos terrestres e átomos celestes, apesar de

não ter recebido o devido destaque na História dos Modelos Atômicos, provocou uma dos mais importantes avanços investigativos em seu tempo. Finalmente os átomos celestes e terrestres se fundiram em explicações que partiram de ambos os campos chegando ao ponto em que não restavam mais dúvidas acerca da unicidade da física-química dos elementos.

Conforme detalhamos anteriormente, o tempo estudado se caracterizou por aproximações e integração dessas diferentes trilhas de investigação que levaram aos primeiros modelos de átomo quantizados. Analisando esses fatos históricos, identificando os passos de aproximação foi possível perceber, também, que os caminhos não eram de mão única. Houve também resistências e preconceitos. A construção de conhecimentos nas fronteiras de diversas áreas sempre é delicada, pois pode significar abrir mão de conceitos estabelecidos e arraigados em favor de outros que não partem de seu próprio campo conceitual, produzidos por cientistas que não fazem parte de seu círculo de respeitabilidade. As contribuições muitas vezes são publicadas em periódicos que não se costuma ler e precisamente sobre temas de que não se tem domínio.

Essa complexa equação pode gerar muitas inseguranças, despertando em alguns o audacioso desejo de trilhar por caminhos desconhecidos e em outros o retorno e apego aos seus “trilhos” mais sólidos para construir sua segurança frente às novidades que se aproximam.

A história que procuramos detalhar nesse trabalho mostrou a dinâmica de relações de uma ciência em transformação, o contínuo conflito entre o

“novo” e o “antigo” num tempo exemplar, onde o novo se aproxima por vários caminhos. Mesmo os mais jovens e audaciosos cientistas conseguem, apenas, construir leituras, hipóteses e teorias que abrem novas possibilidades explicativas, novas trilhas, mas não conseguem abandonar definitivamente as teorias precedentes “antigas”. Carregam tijolos do caminho bem conhecido para pavimentar a nova trilha que se abre rumo ao não conhecido.

Nesse trabalho as pesquisas de J. W. Nicholson e N. Bohr são exemplares desse momento de transformação. Ambos introduziram a jovem Teoria Quântica para explicar a dinâmica de um átomo que antes era explicada pela eletrodinâmica clássica. Assumiram o risco da nova trilha, porém, procuraram de várias formas, construir pontes entre o novo e o antigo, e a quase totalidade de suas bases teóricas e explicações ainda estavam assentadas numa visão eletrodinâmica clássica. Para autores como Heilbron e McCormach, esses jovens pesquisadores que acabaram conhecidos pela inserção da teoria quântica nas explicações atômicas, buscavam mesmo era uma boa e correta explicação clássica, de acordo com suas formações e sólidas convicções construídas ao longo do tempo.

Além de teorias que se afirmaram ou que foram gradualmente abandonadas, ou muito antes pelo contrário que passaram a conviver concomitantemente; neste trabalho também foi possível identificar a ascensão e a queda de grandes cientistas, ou muito antes pelo contrário, ascensão e queda concomitantes. As histórias de J. J. Thomson, H. Nagaoka, E. Rutherford, J. W. Nicholson e N. Bohr, nesse período trouxeram tudo isso, além

de um rápido panorama do entrelaçamento entre políticas científicas e relações pessoais, na típica assimetria das relações de poder que se constroem no âmago da pesquisa científica.

Thomson construiu sua respeitabilidade no campo da física com seus trabalhos em teoria eletrônica e a viu ser gradualmente diminuída com novos trabalhos no campo da radioatividade, da espectroscopia e da teoria quântica. Ao mesmo tempo, seu *status* crescia no campo da química nos estudos de ligação química e estrutura molecular.

Nagaoka, legítimo representante do rápido processo de desenvolvimento científico experimentado pelo Japão no final do Século XIX e início do XX, tornou-se um dos mais importantes cientistas japoneses. Formou e influenciou as gerações que finalmente obtiveram alguma respeitabilidade por parte da comunidade científica internacional. Mas ele próprio não conseguiu romper o antiquado rótulo de “cientista japonês” para tornar-se efetivamente um cientista respeitado no campo da física.

Rutherford teve o ápice de sua carreira em seus estudos em radioatividade que o levaram a inaugurar a física nuclear. Todavia, sua inserção inicial em teoria atômica foi praticamente desprezada por problemas sérios dentro da eletrodinâmica clássica, mas que foram resgatados imediatamente por Bohr pela inserção da Teoria Quântica. Este promoveu o trabalho de Rutherford ao *status* que hoje ocupa na História dos Modelos Atômicos, consolidadas no famoso Modelo de Rutherford-Bohr.

Nicholson sequer teve a oportunidade de desfrutar alguma respeitabilidade no campo dos modelos atômicos. Apesar da originalidade na inserção da Teoria Quântica para explicar os espectros elementares, sua produção esteve sempre associada às áreas da matemática e da astronomia que não propiciaram respeitabilidade suficiente para sustentar suas propostas, que acabaram sendo consideradas apenas como mais uma das fontes da teoria de Bohr. Nicholson parece ter procurado o reconhecimento dos pares da física que investigavam a estrutura do átomo, inclusive publicando no *Philosophical Magazine*, todavia isso não foi suficiente. Sua contribuição não mereceu destaque na história da quantização dos modelos atômicos.

Bohr desenvolveu em poucos anos uma carreira brilhante no campo da física. De desconhecido recém doutor dinamarquês que não despertou a simpatia do conceituado J. J. Thomson em Cambridge conseguiu ocupar um espaço e obter o respeito da comunidade científica da época. Muito desse começo se deve ao acolhimento de suas idéias por E. Rutherford, bem como seu apoio à publicação da teoria atômica do jovem dinamarquês que juntava um modelo de átomo instável (Rutherford) e a teoria quântica (Planck) para explicar a estrutura dos átomos e sua relação com os espectros elementares.

Esta teoria não era original e tinha problemas como foi possível identificar em nosso trabalho, e mesmo tendo a maior parte de suas bases na eletrodinâmica clássica se tornou o referencial inicial de átomo quantizado para a mecânica quântica que se estabeleceria logo em seguida. Mas esta é uma

outra história que, sem dúvida, consistiria em um excelente objeto de estudo para uma outra pesquisa. . .

BIBLIOGRAFIA

ANDRADE, Edward N. da C. *Rutherford and the nature of atom.* Gloucester/Mass.: P. Smith, 1978.

BADASH, Lawrence “Nagaoka to Rutherford, 22 February 1911.” *In:* WEART, Spencer & P. Melba (ed.) *History of physics: readings from physics today.* New York: American Institute of Physics (1985). pp. 103-107.

BRAGG, William H. “The consequences of the corpuscular hypothesis of the γ and X rays, and the range of β Rays.” *Philosophical Magazine [6]* 20 (117, set. 1910): 383-416.

BEHRENS, Carl E. “The early development of the Bohr atom.” *American Journal of Physics* 11 (3, 1943): 135-147.

_____. “Further developments of Bohr's early atomic theory.” *American Journal of Physics* 11 (5, October 1943): 272-281.

BOHR, Niels “On the constitution of atoms and molecules.” *Philosophical Magazine [6]* 26 (151, July 1913): 1-25.

_____. “On the constitution of atoms and molecules: part. II – systems containing only a single nucleus.” *Philosophical Magazine [6]* 26 (153, September 1913): 476-502.

_____. “The spectra of helium and hydrogen.” *Nature* 92 (2295, 23 October 1913): 231-232.

_____. “On the constitution of atoms and molecules: part III – systems containing several nuclei.” *Philosophical Magazine [6]* 26 (November 1913): 857-875.

_____. “Atomic models and X-ray spectra.” *Nature* 92 (2307, 15 January 1914): 553-554.

_____. “On the effect of electric and magnetic fields on spectral Lines.” *Philosophical Magazine [6]* 27 (March 1914): 506-524.

_____. “The spectra of hydrogen and helium.” *Nature* 95 (2366, 4 March 1915): 6-7.

_____. *Sobre a constituição de átomos e moléculas.* Reimpressão das memórias de 1913 publicadas no “Philosophical Magazine” com introdução de L. ROSENFELD. Tradução Egídio Namorado. Lisboa: Calouste Gulbenkian, 1969[?]. 3ª ed., 1989. Tradução do original: *On the constitution of atoms and molecules*. Copenhagen: Munksgaard International Bookselleres and Publishers, 1963.

COCKCROFT, John D. “Niels Henrik David Bohr. 1885-1962.” *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society* 9 (1963): 36-53.

CARAZZA, Bruno & Nadia Robotti. “Explaining atomic spectra within classical physics: 1897-1913.” *Annals of Science* 59 (3, July 2002): 299-320.

CHAYUT, Michael “J. J. Thomson: the discovery of the electron and the chemists.” *Annals of Science* 48 (1991): 527-544.

CROWTHER, James A. “On the scattering of homogeneous β-rays and the numbers of electrons on the atom”. *Proceedings of the Royal Society of London [A]* 84 (570, 15 September 1910): 226-247.

DeKOSKY, Robert “Spectroscopy and the elements in the late nineteenth century: the work of Sir William Crookes.” *British Journal for the History of Science* 6 (24, December. 1973): 400-423.

_____. “William Crookes and the quest for absolute vacuum in the 1870s.” *Annals of Science* 40 (1983): 1-18.

EVE, Arthur S. *Rutherford: being the life and letters of the Rt hon. Lord Rutherford*, New York: MacMillan Co. / Cambridge, University Press, 1939.

EL’YASHEVICH, Mikhail A. “Niels Bohr’s development of the quantum theory of the atom and the correspondence principle: his 1912-1923 work in atomic physics and its significance.” *Soviet Physics Uspekhi* 28 (10, October 1985): 879-909.

EL’YASHEVICH, Mikhail A., N.G. Kembrovskaya & L.M. Tomil’chik “Ridberg and the development of atomic spectroscopy: Centennial of J.R. Ridberg’s paper on the laws governing atomic spectra.” *Soviet Physics Uspekhi* 33 (12, December 1990): 1047-1060.

FLEMING, John A. “The electric theory of electricity.” *Royal Institution Library of Science. Physical Sciences* 5 (1970): 551-569. [Discurso proferido na *Royal Institution* em 30 maio. 1902].

FOWLER, Alfred “The spectra of helium and hydrogen.” *Nature* 92 (2295, 23 oct. 1913): 232-233.

FUJISAKI, C. “P. Drude’s theory of dispersion of light and atomic model (1900-1913).” *Historia Scientiarum* 22 (March 1982): 19-67.

GEIGER, Hans “The scattering of the α-particles by matter.” *Proceedings of the Royal Society [A]* 83 (1910): 492-504

GEIGER, Hans & Ernest Marsden. “On a diffuse reflection of the alfa-particles.” *Proceedings Royal Society [A]* 82 (1909): 495-500.

GILLISPIE, C. C., org. *Dictionary of Scientific Biography*. New York: Charles Scribner’s Sons, 1981, 16 vols.

HEILBRON, John L. **"**A history of the problem of atomic structure from the discovery of the electron to the beginning of quantum mechanics." Tese de doutorado.. Berkeley: UCLA, 1964.

_____. "J. J. Thomson and the Bohr atom." *Physics Today* 30 (4, April 1977): 23-30.

_____. "Rutherford-Bohr atom." *American Journal of Physics* 49 (3, March 1981): 223-231.

HEILBRON, John L. & Kuhn Thomas "The genesis of the Bohr atom." *Historical Studies in the Physical Sciences* 1(1969): 211-290.

HENTSCHEL, Klaus "Spectroscopy Portraiture." *Annals of Science* 59 (2002): 57-82.

HIROSIGE, Tetu & SIEGO Nisio "Formation of Bohr's theory of atomic constitution." *Japanese Studies in the History of Science* 3 (1964): 6-27.

_____. "The genesis of the Bohr atom model and Planck's theory of radiation." *Japanese Studies in the History of Science* 9 (1970): 35-47.

HIRSH, Richard F. "The riddle of the gaseous nebulae." *Isis* 70 (2, June 1979):196-212.

HOLMYARD, Eric J. *British Scientists.* London: J.M Dent and Sons, 1951.

JONES, John. "Nicholson, John William", in H. C. G. Matthew & B. Harrison, ed., *Oxford dictionary of national biography.* V. 40. Oxford: Oxford University Press, 2004. pp. 433-434.

KOHLER, Robert E. "The origin of G. N. Lewis theory of the shared pair bond." *Historical Studies in the Physical Sciences* 3 (1971): 343-376.

KRAGH, Helge. "Niels Bohr's second atomic theory." *Historical Studies in the Physical Sciences* 10(1979): 123-186.

_____. “The chemistry of the universe: historical roots of modern cosmochemistry.” *Annals of Science* 57 (2000): 353-368.

LEONE, Matteo & Nadia Robotti “Stelar, solar and laboratory spectra: the history of Lockyer’s proto-elements.” *Annals of Science* 57 (3, July 2000): 241-266.

LINDEMANN, Frederick A. “Atomic models and X-ray spectra.” *Nature* 92 (2305, 1 January. 1914): 500-501.

MAIER, Clifford Lawrence. *The role of spectroscopy in the acceptance of an internally structured atom 1860-1920.* Tese de doutorado. Wisconsin: Universidade de Wisconsin. 1964.

MARSDEN, Ernest (ed.) *Correspondence of Lord Rutherford of Nelson. V.1-9.* London: Royal Society, 1956.

MARSDEN, Ernest & T. S. Taylor “Decrease in velocity of α-particles in passing through matter.” *Proceedings Royal Society [A]* 88 (1, July 1913): 443-454.

McLAREN, Samuel B. “The theory of radiation.” *Nature* 92 (2295, 23 October 1913): 233.

McCORMMACH, Russel. “The atomic theory of John William Nicholson.” *Archive for History of Exact Science* 3 (1966): 161-184.

MOORE, Ruth. *Niels Bohr: The man, his science & the world they changed.* Cambridge/ Massachusetss/ London: MIT Press, 1985.

MOSELEY, Henry “Atomic models and X-ray spectra.” *Nature* 92 (2307, 15 January 1914): 554.

MOYER, Albert “Foreword”. In: *Physics for new century: papers presented at 1904 St. Louis Congress.* The history of modern physics, 1800 – 1950, vol.

5. ed. K. R. Sopka, xiii-xx. Boston: Tomash Publishers / American Institute of Physics, 1985.

NAGAOKA, Hantaro “Combined effects of the Torsion and Longitudinal stress on the magnetization of Nickel. Tokyo Sugaku-Butsurigaku kwai Kiji (Journal of the Physical Society of Japan). 4 (2, 1888): 44-47.

_____. “On the magnetization and retentiveness of nickel wire under combined torsional and longitudinal stresses”. Tokyo Sugaku-Butsurigaku kwai Kiji (Journal of the Physical Society of Japan) 4 (2, 1888): 47-49.

_____. “Motion of particles in an ideal atom illustrating the line and band spectra and the phenomena of radioactivity.” *Tokyo Sugaku-Butsurigakukwai Kiji-Gaiyo* (Journal of the Physical Society of Japan) 2 (7, 1904): 92-107.

_____. “On a Dynamical system illustrating the spectrum lines and the phenomena of radio-activity.” *Nature* 69 (1791, 25 February 1904): 392-393.

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

_____. “Motion of particles in an ideal atom illustrating the line and band spectra and the phenomena of radioactivity.” *Tokyo Sugaku-Butsurigakukwai Kiji-Gaiyo* (Journal of the Physical Society of Japan) 2 (7, 1904): 92-107.

_____. “Extension of Deslandres's formula for band spectrum.” *Tokyo Sugaku-Butsurigakukwai Kiji-Gaiyo* (*Journal of the Physical Society of Japan)* 2 (10, 1904): 129-131.

_____.“Reply to Mr. Schott's remark on the motion of particles in an ideal atom illustrating the line and band spectra and the phenomena of radioactivity.” *Tokyo Sugaku-Butsurigakukwai Kiji-Gaiyo (Journal of the Physical Society of Japan)* 2 (11, 1904): 140-141.

_____. “A Dynamical system illustrating the spectrum lines.” *Nature* 70 (1806, 9 June 1904): 124-125.

_____. “The structure of an atom.” *Tokyo Sugaku-Butsurigakukwai Kiji-Gaiyo* (*Journal of the Physical Society of Japan*) 2 (17, 1904): 240-247.

_____. “Dispersion of light due to electron-atoms.” *Tokyo Sugaku-Butsurigakukwai Kiji-Gaiyo (Journal of the Physical Society of Japan)* 2 (18, 1905): 280-285.

NAVARRO, Jaume. “J. J. Thomson on the nature of matter: corpuscles and continuum”. *Centaurus* 47 (2005): 259-282.

NICHOLSON, John W. “The scattering of sound by spheroids and disks.” *Philosophical Magazine [6]* 14 (81, set. 1907): 364-377

_____. “On the size of the tail-particles of comets, and their scattering effect on sunlight.” *Philosophical Magazine [6]* 19 (112, April 1910): 626-630.

_____. “On the damping of the vibrations of a dielectric sphere, and the radiation from a vibrating electron.” *Philosophical Magazine [6]* 21 (124, abril 1911): 438-446.

_____. “On the number of electrons concerned in metallic conduction.” *Philosophical Magazine [6]* 22 (1911): 245-266.

_____. “The accelerated motion of an electrified sphere.” *Philosophical Magazine [6]* 20 (out. 1910): 610-618.

_____.. “The accelerated motion of an electrified sphere.” *Philosophical Magazine [6]* 20 (November. 1910): 825-835.

_____.“A structural theory of the chemical elements.” *Philosophical Magazine [6]* 22 (December 1911): 864-889

_____.“The spectrum of nebulium.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 72 (1, November 1911): 49-64.

_____.“Constitution of solar corona I.: protofluorine.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 72 (2, December 1911): 139-150

_____.Constitution of solar corona II.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 72 (8, June 1912): 677-692.

_____. “Constitution of the ring nebula in Lyra (N.G.C. 6720).” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 72 (3, January. 1912): 176-177.

_____. “On the new nebular line at λ 4353.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 72 (8, June 1912): 693.

_____.. “On uniform rotation, the principle of relativity, and the Michelson-Morley experiment.” *Philosophical Magazine [6]* 24 (1912): 820-827.

_____. “Constitution of solar corona. III.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 72 (sup., 1912): 729-739.

_____. “The physical interpretation of the spectrum of the corona.” *The Observatory* 458 (February 1913): 103-112.

_____. “A possible extension of spectrum of hydrogen.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 73 (5, March 1913): 382-385.

_____. “The spectra of Wolf-Rayet stars.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 74 (2, December 1913): 118-131.

_____. “Hydrogen and the primary constituents of nebulae.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 74 (3, January 1914): 204-214.

_____. “Atomic models and X-ray spectra.” *Nature* 92 (2308, 22 January 1914): 583-584.

_____. “Atomic Models and X-Ray Spectra.” *Nature* 92 (2310, 5 February 1914): 630.

_____. “The spectra of hydrogen and helium.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 74 (5, March 1914): 425-442.

_____. “The constitution of nebulae.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 74 (6, April 1914): 486-506.

_____.. “Atomic structure and high-frequency spectra.” *Philosophical Magazine [6]* 27 (April 1914): 541-564.

_____. “On the nebular line λ 3729.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 74 (7, maio 1914): 623-628.

_____. “Atomic structure and helium spectrum.” *Philosophical Magazine [6]* 28 (163, July 1914): 90-103.

_____. “Note by Dr. Nicholson.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 75 (1, November 1914): 21-22.

_____. “Laws of series spectra.” *Proceedings of the Royal Society* 91 (1, April 1915): 255-272.

_____. “The nature of the coronium atom.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 76 (5, March 1916): 415-418.

_____. “The nature of the solar corona.” *The Observatory* 502 (July 1916): 308-312.

_____. “On continuous hydrogen radiation in celestial spectra.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 85 (3, January 1925): 253-256.

_____. The secondary spectrum of hydrogen.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 85 (5, March 1925): 449-464.

_____. A hydrogen spectrum of constant frequency-difference.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 85 (7, May 1925): 656-659.

NISIO, Sigeko. “The role of the chemical considerations in the development of Bohr atom model.” *Japanese Studies in the History of Science* 6 (1967): 26-40.

OWEN, E. A. “On the scattering of Röntgen radiation.” *Cambridge Philosophical Society Proceedings* 16 (31 out 1908 – 20 May 1910): 161-166.

PEIERLS, Rudolf E. *Atomic histories*. New York: AIP Press, 1996.

RAYLEIGH, Lord. “Joseph John Thomson. 1856-1940.” *Obituary Notices of Fellows of the Royal Society* 3 (10, December 1941): 586-609.

ROBOTTI, Nadia & PASTORINO Francesca. “Zeeman’s discovery and the mass of the electron.” *Annals of Science* 55 (2, April 1998): 161-183.

ROSENFELD, Leon (ed.) *Niels Bohr collected works.* V.2. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1981.

ROZENTAL, Stefan (ed.) *Niels Bohr, his life and work as seen by his friends and colleagues.* Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1967.

RUTHERFORD, Ernest “Uranium radiation and the electrical conduction produced by it.” *Philosophical Magazine [5]* 67 (January 1899): 109-163.

_____. “Nature of the γ rays from radium.” *Nature* 69 (1793, 10 March 1904): 436-437.

_____. *Radioactivity.* Cambridge: Cambridge University Press, 1905.

_____. “Address of the president of the mathematical and physical section.” *Science* 30 (766, 3 September. 1909): 289-302.

_____. “The scattering of α and β rays and the structure of the atom.” *Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society* 4 (55, 7 March 1911): 18-20.

_____. “The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom.” *Philosophical Magazine [6] 2*1 (125, May 1911): 669-688.

SCERRI, Eric R. “The evolution of periodic system: from its origins some 200 years ago, the periodic table has become a vital tool for modern chemists.” *Scientific American* (September 1998): 78-83.

SCHOTT, George A. “A dynamical system illustrating the spectrum lines and the phenomena of radio-activity.” *Nature* 69 (1793, 10 March, 1904): 437.

_____. “On a dynamical system illustrating the spectrum lines.” *Nature* 70 (1808, 23 June 1904): 176.

_____. “On the kinetics of a system of particles illustrating the line and band spectrum.” *Philosophical Magazine [6]* 8 (September 1904): 384-387.

_____. “On the electron theory of matter and on radiation.” *Philosophical Magazine [6]* 13 (74, February 1907): 189-213.

THOMSON, George. “J. J. Thomson and the discovery of the electron.” *In:* WEART, Spencer & P. Melba (ed.) *History of physics. Readings from physics today.* New York: American Institute of Physics. 1985. pp.289-293.

THOMSON, Joseph. J. “Cathode Rays” *Philosophical Magazine [5]* 44 (7 aug. 1897): 293-316. [facsimile from Stephen Wright, Classical Scientific Papers, Physics (Mills and Boon, 1964).]

_____. “The magnetic properties of systems of corpuscles describing circular orbits.” *Philosophical Magazine [6]* 6 (36, December 1903): 673-693.

_____. “On the scattering of rapidly moving electrified particles.” *Cambridge Philosophical Society Proceedings* 15 (26 October 1908 – 6 June 1910): 465-471.

_____. “On the structure of atom: an investigation of the stability and periods of oscillation of a number of corpuscles arranged at equal intervals around the circumference of a circle; with application of the results to the theory of atomic structure.” *Philosophical Magazine [6]* 7 (39, March 1904): 237-265.

_____. *Electricity and matter.* New: York: Charles Scribner’s Sons, 1904.

_____. *The corpuscular theory of matter.* London: Archibald Constable, 1907. 2ª. impressão.

_____. *Recollections and reflections.* New York: Macmillan, 1937.

TOPPER, David R. “‘To reason by means of images’: J. J. Thomson and the mechanical picture of nature.” *Annals of Science* 37 (1980): 31-57.

TUGE, Hideomi (ed.) *Historical development of science and technology in Japan: series on japanese life and culture,* vol. 5, Tóquio: Kokusai Bunka Shinkokai (The Society for International Cultural Relations), 1961: 89-137.

WILSON, David. *Rutherford: simple genius.* Cambridge: MIT Press, 1983.

WILSON, Harold A. “The Theory of Spectral Series”. *Philosophical Magazine[6],* 23 (136, april 1912): 660-663.

WILSON, Wilhelm. “John William Nicholson. 1881-1955.” *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society* 2 (November. 1956): 209-214.

YAGI, Eri. “On Nagaoka’s saturnian atomic model (1903).” *Japanese Studies in the History of Science* 3 (1964): 29-47.

_____. “Research group of the committee for the publication of hantaro nagaoka’s biography.” *Japanese Studies in the History of Science* 10 (1971): 23-24.

_____. “The development of Nagaoka’s saturnian atomic model II (1904-1905) – Nagaoka’s theory of the structure of matter.” *Japanese Studies in the History of Science* 11(1972): 73-89.

YUASA, Mitsutomo “History of science and technology in Japan.” *Japanese Studies in the History of Science* 10 (1971): 1-16.

ZEEMAN, Pieter “On the influence of Magnetism on the Nature of the Light Emitted by substances”, *Philosophical Magazine [6]* 5 (43, 1897): 226.

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo