

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ
ESCOLA POLITÉCNICA DE SAÚDE JOAQUIM VENÂNCIO
LABORATÓRIO DE VIGILÂNCIA EM SAÚDE

João Pedro Souza de Oliveira

OS PRIMÓRDIOS DA FISSÃO NUCLEAR: Rutherford e o conceito de transmutação

Rio de Janeiro

2012

João Pedro Souza de Oliveira

OS PRIMÓRDIOS DA FISSÃO NUCLEAR: Rutherford e o conceito de transmutação

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola Politécnica de Saúde Joaquim Venâncio como requisito parcial para aprovação no curso técnico de nível médio em saúde com habilitação em Vigilância em Saúde.

Orientador (a): Tânia de Oliveira Camel

Rio de Janeiro

2012

João Pedro Souza de Oliveira

OS PRIMÓRDIOS DA FISSÃO NUCLEAR:

Rutherford e o conceito de transmutação

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola Politécnica de Saúde Joaquim Venâncio como requisito parcial para aprovação no curso técnico de nível médio em saúde com habilitação em Vigilância em Saúde.

Aprovado em ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

(Doutora Tânia de Oliveira Camel - Fiocruz)

(Doutor Sergio Ricardo de Oliveira - Fiocruz)

(Doutor Jairo Dias de Freitas - Fiocruz)

*Dedico este trabalho
aos meus pais, Manoel e Adriana;*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha família, em especial, ao meu pai, Manoel, à minha mãe, Adriana e à minha irmã, Priscila, pelo apoio dado e a minha orientadora, Tânia, por todo o aprendizado e oportunidade oferecidos ao longo dessa trajetória. Agradeço, também, aos amigos que conheci na EPSJV que, nos últimos três anos, estiveram ao meu lado em todos os momentos, nos fáceis e nos difíceis, e me deram um apoio sem igual.

A liberação da energia atômica mudou tudo, menos nossa maneira de pensar.
(Albert Einstein)

RESUMO

Apresenta a trajetória percorrida por Ernest Rutherford no campo da radioatividade ressaltando a construção da teoria da transmutação elementar e a execução da transmutação artificial, ou fissão nuclear. Discute a refutação de duas concepções arraigadas no pensamento científico moderno do século XIX, a imutabilidade dos elementos químicos e a indestrutibilidade atômica. Discorre acerca do desenvolvimento da pesquisa de Rutherford evidenciando as suas principais realizações nos centros científicos onde investigou o fenômeno radioativo, que foram as universidades de Cambridge, McGill e Manchester. Relata a primeira passagem de Rutherford por Cambridge enfatizando a descoberta da heterogeneidade das emissões radioativas, que exibem, no mínimo, dois tipos de radiação: alfa e beta. Aborda a formulação dos conceitos de meia-vida, de transmutação elementar e de série de decaimento radioativo realizada em McGill, bem como as implicações dos mesmos. Expõe os trabalhos desenvolvidos em Manchester destacando a investigação da interação entre as partículas alfa e a matéria, que conduziu à dedução do núcleo atômico e à realização da primeira transmutação artificial, que levou à identificação do próton. Completa a trajetória trilhada por Rutherford através da descrição das atividades realizadas em sua última passagem por Cambridge, que constituem os primórdios do novo campo que instituiu: a Física nuclear. Conclui apontando as principais consequências dos dois momentos da pesquisa de Rutherford relativos ao conceito de transmutação, que giram em torno da resolução dos debates sobre as fontes de energia das substâncias radioativas e sobre a idade da Terra, bem como a discussão acerca dos usos da energia nuclear.

Palavras Chave: Transmutação elementar, Transmutação artificial, Rutherford

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ampola de Crookes constituída com um ânodo e um cátodo construída em 1850.	
16	
Figura 2: Imagem formada pela ação dos raios X obtida em 1895	19
Figura 3: Eletrômetro de quadrantes utilizado por Rutherford em seus experimentos	26
Figura 4: Esquemática do experimento realizado em 1898	27
Figura 5: Aparato experimental de mensuração dos valores de meia-vida	33
Figura 6: Curva de recuperação e de decaimento	36
Figura 7: Série de decaimento radioativo do urânio e do tório adaptada	41
Figura 8: Contador Geiger-Muller criado em 1908	45
Figura 9: Aparato experimental projetado por Rutherford e Royds em 1908	46
Figura 10: Representação esquemática do aparato experimental projetado por Geiger e Madsen	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 JUSTIFICATIVA	11
1.2 OBJETIVO	12
1.2.1 Objetivo Geral	12
1.2.2 Objetivos Específicos	12
1.3 METODOLOGIA	12
2 ANTECEDENTES: A CIÊNCIA NO SÉCULO XIX	14
2.1 PANORAMAS SOCIOPOLÍTICO E CIENTÍFICO	14
2.2 NOVAS RADIAÇÕES	16
2.3 ERNEST RUTHERFORD	23
2.4 CAMBRIDGE	25
3 MCGILL	29
3.1 O CONCEITO DE MEIA-VIDA	29
3.2 A CAUSA E A NATUREZA DA RADIOATIVIDADE	34
3.3 DEBATES SOBRE A TRANSMUTAÇÃO	39
4 MANCHESTER	44
4.1 PARTÍCULAS ALFA	44
4.2 O ÁTOMO NUCLEAR	47
4.3 COLISÕES DE PARTÍCULAS ALFA COM ÁTOMOS LEVES	50
4.4 RETORNO À CAMBRIDGE	54
5 CONCLUSÕES	56
6 REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A ciência, ao longo de sua história, experimentou diversos momentos de profundas modificações em seus alicerces. Tais mudanças decorrem ora de novas descobertas, ora de novos modos de interpretação dos fenômenos em investigação e foram as responsáveis por impactar as bases científicas em vigor e por introduzir novos rumos na trajetória do desenvolvimento científico. A transição do século XIX para o século XX constituiu um marco na história da ciência, pois, nesse período, foram realizadas importantes observações que acarretaram uma ampla apreensão dos conhecimentos acerca da estrutura e da natureza da matéria.

Ocorridas no período compreendido entre o final do século XIX e o início do século XX, as descobertas dos novos tipos de radiação possibilitaram a identificação do elétron, dos raios X e do fenômeno da radioatividade. Este último se destaca entre as demais observações, pois seus desdobramentos constituíram objetos de investigação de um número expressivo de cientistas no decorrer do século XX. Tal fato proporcionou parte das descobertas realizadas em diversas áreas do conhecimento e do desenvolvimento tecnológico durante esse período. (SEGRÈ, 1987, p. 5)

O físico neozelandês Ernest Rutherford (1871-1937) e seu colaborador Frederick Soddy (1877-1956) definiram que “a radioatividade é, a um só tempo, um fenômeno atômico acompanhado de uma mudança química, em que são produzidas novas espécies de matéria” (RUTHERFORD; SODDY apud BADASH, 2007, p. 2383). Este fenômeno ocorre natural e artificialmente nos núcleos dos átomos. Cabe ressaltar, ainda, que tal definição para a radioatividade contestou importantes concepções sobre a matéria arraigadas no pensamento científico moderno.

Até o final do século XIX, a comunidade científica concebia os elementos químicos como estáveis e imutáveis e o átomo como indestrutível. Os estudos de Ernest Rutherford contribuíram, demasiadamente, para modificar tais concepções. Atribui-se a ele a comprovação da instabilidade dos elementos radioativos, que resultou na elaboração do conceito de transmutação elementar; a dedução do núcleo atômico, decorrente da investigação acerca da interação entre as partículas alfa e a matéria; e a execução da primeira transmutação artificial, que, além de possibilitar a identificação do próton, concretizou um dos maiores anseios alquímicos: a transmutação dos elementos. (SEGRÈ, 1987, p. 57)

Vindo de uma família humilde do interior da Nova Zelândia, Rutherford percorreu uma trajetória brilhante nos campos do eletromagnetismo e, principalmente, da

radioatividade, o qual foi amplamente desenvolvido com as suas pesquisas. Em 1908, foi laureado com o prêmio Nobel de Química devido as “suas investigações sobre a desintegração dos elementos e a química das substâncias radioativas” (THE NOBEL PRIZE, 2011). Rutherford foi, ainda, o primeiro a romper o núcleo do átomo, isto é, a realizar aquilo que seria a primeira fissão nuclear, contribuindo para a instituição do campo da Física Nuclear. (BRENNAN, 2003, p. 125)

Rutherford desenvolveu sua pesquisa em três laboratórios de referência localizados nas seguintes universidades: Cambridge (Inglaterra), McGill (Canadá) e Manchester (Inglaterra). Em sua primeira passagem por Cambridge, descobriu que as emissões radioativas são complexas, exibindo, no mínimo, dois tipos de radiação – alfa e beta. Em McGill, elaborou a teoria que explica o fenômeno da radioatividade, bem como os conceitos de meia vida e de família radioativa. Já em Manchester, investigou a natureza das partículas alfa e a interação das mesmas com a matéria, deduzindo a existência do núcleo atômico e executando a reação de transmutação artificial. Por fim, em seu retorno à Cambridge, Rutherford desenvolveu os primórdios da nova área da Física introduzida por ele: a Física Nuclear. (BADASH, 2007, p. 2391)

Os resultados da pesquisa de Rutherford em radioatividade suscitaram importantes debates com cientistas já renomados no início do século XX, dentre eles o influente físico William Thomson (1824-1907, Lorde Kelvin) e com o químico criador da classificação periódica, Dmitrii Ivanovich Mendeleiev (1834-1907). Dentre as diversas conquistas obtidas por Rutherford, a teoria da desintegração radioativa foi recebida com um elevado grau de ceticismo por uma parcela expressiva dos químicos e dos físicos. Tal recepção se deve ao fato de a teoria contrariar a ideia da imutabilidade dos elementos e contribuir para o acúmulo de evidências que contradizem a ideia do átomo indestrutível. (BRENNAN, 2003, p.135)

Cumprir notar que são diversas as implicações dos estudos de Rutherford relativos ao conceito de transmutação. A linha de pesquisa voltada para a investigação da desintegração artificial dos elementos, iniciada por Rutherford, foi adotada por um número expressivo de físicos na primeira metade do século XX e culminou, dentre outras conquistas, na descoberta da fissão nuclear. Ao longo da história, a energia proveniente desse processo foi destinada, principalmente, para a construção de armamentos nucleares utilizados durante a Segunda Guerra Mundial e a Guerra Fria e para a geração de eletricidade nas usinas nucleares. (MERÇON; QUADRAT, 2004, p.27)

1.1 JUSTIFICATIVA

A importância da abordagem de um tema relacionado à história da ciência é a necessidade de fundamentação do conhecimento científico a partir da história de sua construção para desconstruir concepções em vigor no senso comum. Nesse sentido, é válido ressaltar as disputas e os questionamentos existentes acerca de um objeto de investigação, o que contribui para o ensino de ciências devido à ênfase dada por tal tipo de abordagem às incertezas e aos métodos presentes na elaboração de conceitos, equações e leis. (LOPES; MARQUES, 2011, p. 143)

No senso comum, por exemplo, a concepção de radioatividade se encontra associada, na maioria das vezes, aos acidentes nucleares e às guerras. Assim, torna-se necessária a realização de um resgate histórico a fim de compreender a importância da radioatividade no desenvolvimento das ciências, como o da Química e o da Física, além da contribuição para a Medicina, Geologia e outras áreas do conhecimento.

Meu interesse pela Química, existente desde o meu primeiro contato com a disciplina, me influenciou a estudar um tema correlato a este campo de investigação. O fenômeno da radioatividade é intrigante devido à peculiaridade das reações nucleares, que envolvem a mudança de um elemento químico em outro. Assumindo um viés histórico na escolha do tema, me interessei pelos trabalhos de Ernest Rutherford, que, em grande parte, giraram em torno da questão da transmutação dos elementos.

Ao trilhar a trajetória percorrida por Rutherford no campo da radioatividade, foram destacados os processos de construção do conceito de transmutação elementar e de realização da transmutação artificial. A maioria dos trabalhos brasileiros sobre a pesquisa de Rutherford se propõe a discorrer a respeito da descoberta do núcleo atômico, alegando ser esta a sua conquista mais frutífera, o que desconsidera o fato de a mesma não ter sido bem vista pela comunidade científica na época em que foi realizada.

A referida abordagem, presente em diversas obras brasileiras, possui um caráter reducionista, pois não contextualiza a formulação da teoria nuclear com o real objetivo de Rutherford, que era o de investigar a interação da radiação com a matéria. Tal visão, muito comum em livros didáticos, se vincula à interpretação positivista da história da ciência, pois reduz o processo de construção do conhecimento científico a meras rotulações, deixando de fazer menção aos possíveis debates, controvérsias e incertezas que podem ter contribuído na constituição de tal conhecimento. (FARIAS, 2003, p. 25)

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho possui a finalidade de analisar a pesquisa de Ernest Rutherford no campo da radioatividade discutindo a construção do conceito de transmutação elementar e a realização da primeira reação de transmutação artificial, bem como as numerosas implicações de tal investigação.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Apresentar o estudo desenvolvido por Rutherford acerca da interação da radiação com a matéria.
- Discutir sobre o conceito de transmutação elementar e o seu impacto na comunidade científica, bem como na sociedade.
- Apresentar o processo de transmutação artificial realizado por Rutherford evidenciando suas principais implicações.
- Apontar o papel dos pressupostos teóricos na construção dos conhecimentos relativos à investigação do fenômeno da radioatividade.

1.3 METODOLOGIA

O presente trabalho se pauta no levantamento bibliográfico de documentos históricos e de textos de cunho biográfico. Entre as fontes consultadas, destacam-se as produções originais do início do século XX. Cumpre notar que foram realizadas as análises dos seguintes artigos de Rutherford: “A Causa e a Natureza da Radioatividade (1902)” e “Colisões de partículas alfa com átomos leves: Efeito anômalo em nitrogênio (1919)”. O primeiro se refere à formulação da teoria da transmutação elementar ou da desintegração radioativa. O segundo faz menção à realização daquilo que seria a primeira transmutação artificial e, contemplando a identificação do próton.

O presente trabalho se encontra estruturado de acordo com os centros científicos em que Rutherford desenvolveu sua pesquisa no campo da radioatividade. De início, além dos antecedentes, foram abordados os trabalhos desenvolvidos em sua primeira passagem pela universidade de Cambridge. Em seguida, foram apresentados e discutidos os principais conceitos que formulou na universidade McGill. Por fim, foram expostas e analisadas as principais conquistas que obteve na universidade de Manchester e em seu retorno à Cambridge.

2 ANTECEDENTES: A CIÊNCIA NO SÉCULO XIX

2.1 PANORAMA SOCIOPOLÍTICO E CIENTÍFICO

Do ponto de vista social e econômico, três países se destacaram no panorama mundial de meados do século XIX: Inglaterra, França e Alemanha. Estas nações reuniram-se no seleto grupo de países que constituíram as grandes potências do período. É válido ressaltar que a Grã-Bretanha sobressaiu-se entre as demais potências, pois se encontrava vivenciando o auge do império da Rainha Vitória, possuindo o domínio do comércio ultramarino e de vastas extensões de terra. (SEGRÉ, 1987, p. 2)

Tais países foram pioneiros no processo de industrialização e constituíram os palcos das principais mobilizações ocorridas nos âmbitos social, econômico e político – Revolução Francesa e Revolução Industrial. Estas revoluções foram responsáveis pela introdução do capitalismo liberal, cuja doutrina é o liberalismo político e a autorregulação do mercado. (HOBSBAWM, 1986, p. 15)

O cenário científico mundial do século XIX se encontrava influenciado pela conjuntura socioeconômica vigente. Os países que compunham as potências econômicas do período coincidiam com os locais onde se concentrava a maior parte dos cientistas e das instituições de pesquisa. Nesse sentido, um número expressivo das descobertas científicas se deu, e ainda ocorre, nos principais centros científicos europeus. No laboratório Cavendish da universidade Cambridge, Inglaterra, por exemplo, foram descobertas as primeiras partículas subatômicas – o elétron, a partícula alfa e o nêutron.

Segundo o historiador Hobsbawm (2002, p. 257), os avanços do conhecimento científico refletiam os progressos da nova sociedade capitalista liberal, a qual se expandia devido à disseminação dos processos de industrialização pelas demais nações. Os cientistas, em meio aos resultados surpreendentes de suas investigações, estavam “preparados para subordinar todas as outras formas de atividade intelectual a elas”, aponta referindo-se a atividades relacionadas à filosofia, às artes, à teologia etc.

Consolidada nos séculos XVIII e XIX, a ciência moderna instituiu-se vinculada à ideia de intervenção na natureza. A busca e a contemplação do conhecimento do real constituíam a finalidade da ciência antiga. A ciência moderna, por sua vez, não abandonou tais objetivos, no entanto se propôs a criar tecnologias, aplicações práticas dos conceitos, métodos e teorias, a fim de obter o domínio e o controle do meio natural. Tais tecnologias foram indispensáveis para a concretização da fase do capitalismo industrial e das demais etapas que a sucederam.

Chauí (2009, p. 222) afirma que “numa sociedade em que o capitalismo está surgindo, [...] a nova ciência será inseparável da técnica”.

O debate sobre o aceite da hipótese atômica prevaleceu durante o século XIX. Ao longo desse período, o ceticismo predominava em meio à comunidade científica, havendo uma quantidade expressiva de químicos e de físicos descrentes na natureza corpuscular da matéria. Mesmo aqueles que reconheciam a utilidade pragmática de uma teoria atômica para a Química, consideravam-na longe da realidade. (SEGRÈ, 1987, p. 6)

Somente após algumas observações experimentais realizadas no final do século XIX, em especial do elétron, dos raios X e da radioatividade, foi possível o estabelecimento de um novo olhar sobre a existência dos átomos e do mundo subatômico, que permanecia, ainda, obscuro. Essas descobertas impulsionaram a criação de novos campos promissores da ciência, que se desenvolveram ao longo do século XX. Alguns dos principais campos científicos instituídos foram: a Física atômica, a Física nuclear, a Radioquímica e a Geocronologia. (SEGRÈ, 1987, p. 6)

Nesse período, a pesquisa química girou em torno da identificação de novos elementos químicos e, conseqüentemente, da criação de um sistema de classificação. É importante notar que, em meados do século XIX, eram conhecidos mais de 60 elementos. Este fato, associado à correção dos pesos atômicos, possibilitou a criação do que veio a ser a primeira classificação periódica por Dmitrii Mendeleiev. Vale ressaltar, ainda, que a posterior descoberta da radioatividade contribuiu para a incorporação de novos elementos no sistema de classificação criado por Mendeleiev. (TENNENBAUM, 2000, p. 35)

É válido lembrar que a concepção de elemento químico, nesse momento, se encontrava associada à ideia de imutabilidade. Ou seja, entendia-se por elemento químico o fim da análise química, isto é, uma substância que não pode ser decomposta em outras mais simples. (OKI, 2002, p. 23)

Mendeleiev apresentou a primeira versão de sua classificação periódica em 1869. Neste sistema, os elementos químicos se encontravam organizados segundo a ordem crescente dos pesos atômicos. O método utilizado por Mendeleiev na construção de seu sistema periódico admitiu lacunas correspondentes aos elementos ainda não identificados, o que possibilitou a previsão de algumas das propriedades dos mesmos. (TENNENBAUM, 2000, p. 35)

Ainda no século XIX, foi criado o método de análise espectral ou espectroscopia. Este método foi desenvolvido por Robert Bunsen (1811-1899) e Gustav Kirchhoff (1824-1887). Eles levaram diversos elementos químicos ao fogo a fim de analisar a radiação emitida pelos

mesmos, concluindo que os espectros de seus átomos consistem em linhas bem definidas, denominadas de linhas espectrais. Como cada elemento apresenta seu próprio conjunto de linhas espectrais, a espectroscopia se tornou um meio eficaz para a identificação de novos elementos. (TENNENBAUM, 2000, p. 44)

Em meados do século XIX, já se conhecia um número expressivo de fenômenos físicos correlatos, principalmente, aos campos da termodinâmica, da eletricidade e do magnetismo. Tais campos haviam passado por um amplo processo de desenvolvimento ao longo desse século. Este fato justifica a crença, partilhada por uma parcela significativa dos físicos, de que as principais problemáticas levantadas pela pesquisa física se encontrariam encerradas, no mínimo, em relação aos seus aspectos básicos. (HOBSBAWM, 2002, p. 199)

O cenário da física sofreu, entretanto, importantes modificações no período de transição para o século XX. Como mencionado anteriormente, determinadas observações experimentais conduziram o pensamento científico a novas concepções sobre a estrutura e a natureza da matéria. Tais modificações se iniciaram com a descoberta dos novos tipos de radiação no final do século XIX. (SEGRÈ, 1987, p. 12)

2.2 NOVAS RADIAÇÕES

Para a construção dos experimentos que possibilitaram a observação das novas radiações, empregou-se, excessivamente, o tubo de descargas elétricas em gases, como, por exemplo, a ampola de Crookes ilustrada na figura 1. Tais tubos constituíram os aparatos experimentais presentes na maioria dos laboratórios de física a partir da segunda metade do século XIX.



Figura 1 – Ampola de Crookes constituída com um ânodo e um cátodo construída em 1850.

Fonte: E-FÍSICA, 2012.

Aplicada nos experimentos de descargas elétricas, a tecnologia de vácuo viabilizou um largo passo dado na investigação acerca da estrutura atômica. Segre (1987, p. 4) afirmou que “todos os progressos feitos nas pesquisas sobre o átomo coincidiram com os progressos feitos na tecnologia de vácuo”.

Ao submeter certo gás a experimentos de descargas elétricas, é possível verificar a formação de luminescência no interior de um aparato experimental que consiste em um tubo de vidro. Michael Faraday (1791-1867) relatou essa observação, constatando, ainda, que a rarefação do gás em exame favorecia a ocorrência dos fenômenos luminosos. (CAMEL, 2008, p. 2)

Entre os novos tipos de radiação observados no final do século XIX, foram identificados, inicialmente, os raios catódicos. Tais raios foram investigados por uma parcela expressiva dos físicos e conduziram à descoberta de outros tipos de radiação, acarretando uma maior apreensão de conhecimentos relativos à estrutura do átomo.

A nova radiação foi identificada, inicialmente, pelo físico alemão Julius Plucker (1801-1868). Através de uma bomba de Geissler¹, Plucker criou um vácuo suficientemente adequado para a execução de seu experimento de descargas elétricas em gases. Após exaurir o ar do interior de um tubo de vidro, foi observada, por Plucker, a formação de uma luminosidade na região oposta ao cátodo. (CAMEL, 2008, p. 2)

O próximo passo dado na investigação dos novos raios consistiu na determinação de suas principais propriedades. Johan Hittorf (1824-1914), aluno de Plucker, concluiu que a radiação desconhecida, que provoca uma luminosidade próxima ao ânodo, descreve uma trajetória retilínea. Por esses raios aparentarem partir do cátodo, Eugen Goldstein (1850-1930) os nomeou de raios catódicos em 1876. (SEGRÈ, 1987, p. 11)

Embora já identificadas algumas das suas principais propriedades, a natureza dos raios catódicos permanecia, ainda, misteriosa. As opiniões acerca de tal temática se encontravam divididas entre os físicos. Parte deles, como Heinrich Hertz (1857-1894) e outros físicos alemães, inclinava-se para a ideia de que os raios catódicos eram de natureza ondulatória. Outra parte, como Willian Crookes (1832-1919) e os demais cientistas ingleses, defendia que a natureza de tais raios era corpuscular. A conclusão de tal debate ficou a cargo do físico Jean Perrin (1870-1942), que, após obter evidências experimentais, concluiu que os raios catódicos eram constituídos por partículas carregadas negativamente. (CAMEL, 2008, p. 3)

¹ Instrumento utilizado para a produção de vácuo através de uma coluna de mercúrio, que é utilizada como pistão. (CAMEL, 2008)

O físico inglês John Joseph Thomson (1856-1940) se debruçou na investigação acerca das partículas constituintes dos raios catódicos. Ele as denominou de corpúsculos, que, posteriormente, foram associados ao termo elétron, e determinou a relação entre carga e massa das mesmas. Em decorrência dos desdobramentos de sua pesquisa, J.J. Thomson foi laureado com o prêmio Nobel de Física de 1906.

Os experimentos realizados por J.J. Thomson indicaram que os raios catódicos apresentavam, sempre, as mesmas constituição e propriedades, independentemente da composição dos materiais que constituíam o cátodo ou o gás colocado no tubo. Por este motivo, J.J. Thomson teve subsídios, oriundos de dados experimentais, para concluir que os elétrons são os constituintes fundamentais da matéria. A partir desta constatação, foi possível o estabelecimento de seu modelo atômico. (CAMEL, 2008, p.7)

O modelo de átomo conjecturado por J.J. Thomson se apoiava na ideia de que os elétrons, corpúsculos de carga negativa, se encontravam incrustados em uma esfera carregada positivamente, que constituía os átomos da matéria. De acordo com Brennan (2003, p.142), “Thomson concebeu o átomo como uma carga positiva distribuída de maneira mais ou menos uniforme com grande número de partículas negativamente carregadas flutuando por todo o seu interior”. A carga elétrica positiva do interior do átomo seria balanceada pela soma das cargas elétricas negativas dos elétrons, garantindo, desta forma, a neutralidade atômica.

Pesquisando a luminescência produzida pelos raios catódicos, o físico alemão Wilhelm Röntgen identificou um novo tipo de radiação. Ao realizar um experimento de descargas elétricas em um tubo de vácuo parcial coberto com uma caixa de papelão preta, Rontgen notou que uma tela de platinocianeto de bário brilhava ao ligar o tubo de vidro. Ciente de que o aparato experimental se encontrava coberto, Rontgen concluiu que o brilho produzido na tela não poderia decorrer da ação dos raios catódicos. Tal observação o levou a considerar a existência de um tipo de radiação desconhecido, que denominou de raios X. (BRENNAN, 2003, p. 129)

A nova radiação apresentava propriedades peculiares e intrigantes. Os raios X atravessavam corpos opacos à luz, excitavam substâncias fosforescentes, impressionavam placas fotográficas e aumentavam a condutividade elétrica do ar. A atenção da comunidade científica se voltou aos novos raios apenas quando Röntgen relatou ter visualizado os ossos de sua mão ao inseri-la entre o tubo de vidro, que se encontrava ligado, e a tela, o que resultou na formação da imagem ilustrada na figura 2. (SEGRÈ, 1987, p. 29)



Figura 2 – Imagem formada pela ação dos raios X obtida em 1895.

Fonte: SEGRÈ, 1987

Embora já pudessem ser previstas até mesmo suas utilidades médicas, os raios X eram, ainda, uma radiação misteriosa, pois pouco se conhecia a respeito de sua natureza. Röntgen questionava-se, segundo Segrè (1987, p. 22), se a radiação que descobrira “não seriam vibrações longitudinais presentes no éter²”. Sabe-se, hoje, que os raios X consistem em ondas eletromagnéticas bastante energéticas que possuem alta frequência e, conseqüentemente, um curto comprimento de onda.

Henri Poincaré levou os resultados do estudo de Röntgen à Academia das Ciências de Paris. Posteriormente, em seu artigo, descreveu algumas das propriedades dos raios X. Estes, segundo Poincaré, provém da luminescência da parte do vidro que fora atingida pelos raios catódicos. Verificou, ainda, que tais raios descrevem uma trajetória retilínea e que não são refletidos, refratados ou desviados ao serem submetidos à ação de um campo magnético. No seu artigo, Poincaré relata:

É, portanto, o vidro que emite os raios Roentgen, que se tornam fluorescentes. Podemos nos perguntar se todos os corpos cuja fluorescência seja suficientemente intensa não emitiriam, além dos raios luminosos, os raios X de Roentgen, qualquer que seja a causa de sua fluorescência. (POINCARÉ apud MARTINS, 1990, p.3).

No final do século XIX, a crescente descoberta dos novos tipos de radiação conduziu à observação de um novo fenômeno. Este, como será visto adiante, implicou em profundas modificações no olhar sobre a natureza e a estrutura da matéria, provocando importantes

² Nessa época, concebia-se o espaço como preenchido por uma substância sutil que serviria à propagação das ondas eletromagnéticas. (CAMEL, 2008)

alterações em alguns dos alicerces das ciências Física e Química. O referido fenômeno se trata da radioatividade.

Interessado pela apresentação de Poincaré sobre os raios X de Röntgen, Henri Becquerel (1852-1908) voltou seu estudo para o entendimento de uma possível relação entre os raios X e as substâncias luminescentes. A crença na existência dessa relação devia-se ao fato de os raios X emergirem da região do tubo de Crookes atingida pelos raios catódicos, isto é, da área que havia se tornado luminescente. (SEGRÈ, 1987, p. 28)

Henri Becquerel fazia parte de uma família de físicos que, durante quatro gerações, investigou os fenômenos da fluorescência³ e da fosforescência⁴. À procura de verificar alguma relação entre os fenômenos que vinha estudando e os raios X, Becquerel realizou testes com diversas substâncias luminescentes. Para sua infelicidade, não identificou raios X sendo emitidos por tais substâncias. Entretanto, ao trabalhar com um sal de urânio, Becquerel observou a impressão da silhueta do sal quando revelou uma chapa fotográfica coberta com papel negro após horas de exposição ao Sol. Deste modo, havia notado uma radiação incomum que atravessa corpos opacos à luz. (SEGRÈ, 1987, p. 29)

Ao tentar repetir a experiência em outra ocasião, Becquerel não pôde realizá-la devido ao mal tempo, que impossibilitava o aparecimento do Sol. Assim, guardou a amostra de sal de urânio sob uma chapa fotográfica no interior de uma gaveta, um ambiente sem luminosidade, a espera de um dia ensolarado. Alguns dias depois, notou que a amostra havia impressionado a chapa intensamente. Em meio aos resultados experimentais obtidos, Becquerel concluiu que a radiação emitida não era proveniente da fosforescência da substância, mas sim, especificamente, do urânio. (MARTINS, 1990, p. 35)

Martins (1990, p. 37), em seu artigo “Como Becquerel não Descobriu a Radioatividade”, afirma que é inconsistente atribuir a identificação do fenômeno radioativo a Becquerel. Dentre outros argumentos, são ressaltados dois principais ao longo do artigo. O primeiro se refere à interpretação de Becquerel sobre a natureza das radiações emitidas pelos compostos de urânio, que as considerou casos de fosforescência invisível. O outro argumento faz menção à conclusão de Becquerel de que, “ao invés de se cogitar a possibilidade de ser um novo fenômeno físico”, o urânio seria o primeiro metal portador de fosforescência invisível.

³ Fenômeno luminescente da emissão de radiação por substâncias fluorescentes que se encontram expostas a uma fonte de radiação. Cessada a exposição à referida fonte, é interrompida a emissão de radiação pela substância fluorescente. (PIERRE, 2012)

⁴ Fenômeno luminescente da emissão de radiação por substâncias fosforescentes que são expostas a uma fonte de radiação. Tais substâncias não cessam sua atividade de emissão de radiação quando retiradas da influência da fonte de radiação, isto é, brilham no escuro. (PIERRE, 2012)

O trabalho da identificação de novos elementos radioativos e, conseqüentemente, da generalização do fenômeno da radioatividade ficou a cargo da polonesa Marie Curie e de seu marido, o francês Pierre Curie. O ingresso dos Curie no campo do estudo dos raios Becquerel se deu com a escolha do tema de doutorado de Marie. Eles utilizaram, excessivamente, o método de piezo-eletricidade⁵, que foi de grande importância para a mensuração da radioatividade. (TENNENBAUM, 2000, p. 58)

Inicialmente, Marie Curie se pôs a verificar outros elementos químicos que emitissem os raios Becquerel e, em seguida, a buscar elementos radioativos inteiramente novos. Marie notou que o tório, elemento químico já conhecido, se mostrou um emissor de radiações iguais às aquelas emitidas pelo urânio. Posteriormente, ao analisar a atividade de minérios radioativos, Marie percebeu que as quantidades de urânio e de tório presentes não correspondiam à atividade total mensurada, concluindo pela existência de elementos químicos desconhecidos. (SEGRÈ, 1987, p. 37)

A fim de identificar os elementos radioativos até então desconhecidos, Marie precisou isolá-los. Para isso, teve que tratar quantidades expressivas de minérios radioativos, como, por exemplo, o mineral pechblenda⁶. Em 1898, descobriu um dos novos elementos, um metal situado adiante do bismuto, cujo nome dado foi Polônio em homenagem a sua terra natal. (SEGRÈ, 1987, p. 37)

Cremos, portanto, que a substância que retiramos da pechblenda contém um metal ainda não identificado, vizinho ao bismuto por suas propriedades analíticas. Se a existência desse novo metal for confirmada, propomos dar-lhe o nome de polônio, nome do país de origem de um de nós. (CURIE, 1898 apud MARTINS, 1990, p.40-41).

Prosseguindo com a análise dos minérios radioativos, os Curie notaram a existência de mais um elemento desconhecido, responsável pelas altas atividades registradas. Perceberam, também, que tal elemento seria 100.000 vezes mais ativo que o urânio. No mesmo ano de 1898, após intensos tratamentos dos minérios em análise, os Curie conseguiram isolar o novo elemento, um metal localizado após o Bário na família dos alcalino-terrosos. Por imaginarem que não haveria um elemento com atividade maior, nomearam-no de Rádio. (MARTINS, 1990, p. 41)

O trabalho empreendido por Marie e Pierre Curie constituiu um largo passo dado na observação, caracterização e generalização do recém-descoberto fenômeno da radioatividade.

⁵ Método desenvolvido por Pierre Curie que se baseia na utilização de um cristal piezo-elétrico. Tal método foi aplicado na mensuração da ionização do ar provocada pelos raios Becquerel. (TENNENBAUM, 2000)

⁶ Princípi minério de urânio constituído de óxido de urânio. (TENNENBAUM, 2000)

No entanto, a natureza de tal fenômeno permanecia, ainda, desconhecida, isto é, pouco se sabia a respeito das substâncias consideradas radioativas. Os Curie acreditavam que a radioatividade seria uma característica dos elementos mais pesados, tratando-se de uma propriedade atômica. Defendiam, também, que a grande quantidade de energia liberada pelas substâncias radioativas seria proveniente de uma fonte externa aos átomos das mesmas. (SEGRÈ, 1987, p. 38)

Pugliese (2009, p. 4) discorre a respeito das controvérsias em torno da natureza do fenômeno radioativo. Ele aponta que as opiniões acerca desse tema se dividiram entre os físicos envolvidos direta ou indiretamente no estudo da radioatividade. De um lado, defendendo uma fonte externa de energia para as substâncias radioativas, se posicionaram os Curie e Lorde Kelvin. De outro, alegando que a origem da energia de tais substâncias situar-se-ia no interior de seus átomos, se encontravam Ernest Rutherford e seus colaboradores.

Lorde Kelvin foi um célebre físico responsável por uma parte expressiva do desenvolvimento dos campos da termodinâmica, do eletromagnetismo e da teoria ondulatória da luz. Em relação as suas realizações práticas, Kelvin se mostrou igualmente brilhante, contribuindo para o desenvolvimento científico e tecnológico demasiadamente. Quanto ao aspecto tecnológico, destacou-se, entre outras realizações, pela pesquisa acerca dos cabos de telégrafo submarino. (BRYSON, 2005, p. 87)

A maioria das observações experimentais realizadas no período da virada para o século XX sofreram a resistência de Lorde Kelvin, que se mostrou arraigado às concepções vigentes sobre a matéria e o seu comportamento. Segundo Brennan (2003, p. 130), Kelvin havia considerado os raios X, inicialmente, como uma “fraude bem elaborada”. Em relação ao rádio, havia adotado uma postura cética, argumentando, de acordo com Pugliese (2009, p. 6), que tal elemento “nunca tinha sido visto em sua forma ontológica original, ou seja, como um metal”. Ao defender a indestrutibilidade e a imutabilidade da matéria, Kelvin se posicionou contra a teoria da transmutação elementar de Ernest Rutherford e Frederick Soddy, a qual explica a natureza do fenômeno radioativo.

Para além de Lorde Kelvin, outros cientistas se mostraram descontentes com os resultados das pesquisas iniciais acerca do fenômeno da radioatividade devido à ausência de critérios nas mesmas. Um deles foi o importante químico Dmitrii Mendeleiev, que construiu seu sistema periódico com base no conceito até então vigente de elemento químico. Tal conceito pautava-se, segundo Oki (2002, p. 23), nas ideias de Lavoisier, que definia como elementares os constituintes que resultavam da análise química última, como se encontra expresso a seguir:

Contentar-me-ei, portanto, em dizer que, se pelo nome de elementos pretendemos designar moléculas simples e indivisíveis que compõem os corpos, é provável que nós não os conheçamos. Se, ao contrário, ligamos o nome de elementos ou de princípios dos corpos à ideia do termo final a que chega a análise, todas as substâncias que ainda não conseguimos decompor, através do uso de qualquer processo, são para nós elementos. (LAVOISIER, 1994, p. 32)

Com a aceitação da teoria da transmutação elementar por uma parcela expressiva da comunidade científica, a ideia da imutabilidade, inerente à concepção vigente de elemento, entrou em descrédito. Consequentemente, os posteriores passos dados na investigação da radioatividade acarretaram uma maior apreensão dos conhecimentos acerca do átomo e na formulação dos conceitos responsáveis por transferir, para a física, a autoridade para definir o elemento químico. Tais conceitos são o de isótopo, que faz referência a átomos de um mesmo elemento com massas atômicas distintas, e o de número atômico, que constitui o critério moderno de identificação dos elementos. (OKI, 2002, p. 25)

No período de transição do século XIX para o século XX, a comunidade científica se encontrava preocupada em explicar o novo fenômeno da radioatividade. Os futuros esforços realizados nesse novo campo conduziram a importantes descobertas, como a do núcleo atômico e a da fissão nuclear. Iniciou-se, então, um período de considerável ampliação dos conhecimentos acerca do mundo subatômico.

2.3 ERNEST RUTHERFORD

Ernest Rutherford nasceu em Spring Grove, zona rural ao sul de Nélsion, Nova Zelândia, em 30 de agosto de 1871. Cresceu em uma família humilde, em que seu pai, James Rutherford, oriundo da Escócia, trabalhava como mecânico e sua mãe, Martha Thompson, vinda da Inglaterra, trabalhava como professora primária. Com seis irmãos e cinco irmãs, Rutherford teve uma criação que, segundo Badash (2007, p. 2382), “marcou os princípios e valores encontrados em sua personalidade: retidão, economia, energia, humildade, entusiasmo, simplicidade e respeito à educação”.

Rutherford frequentou a escola primária na Nova Zelândia e, ainda jovem, teve seu interesse pelas ciências despertado ao ler um livro sobre Física. Tal livro, intitulado “Manual de Física” de Balfour Stewart, contempla experimentos construídos com utensílios simples, que demonstram a aplicação das leis básicas da física. Brennan (2003, p. 127) aponta que “ele [Manual de Física] deve ter contribuído significativamente para seu interesse pela física

experimental”. Cumpra observar que Rutherford foi considerado um dos maiores experimentalistas desde Faraday⁷.

Em razão de seus resultados notáveis obtidos nas escolas em que estudou, Ernest recebeu diversas bolsas ao longo de sua trajetória. Tais bolsas o possibilitaram frequentar os melhores laboratórios da época e, por conseguinte, que realizasse suas conquistas científicas. A primeira bolsa de estudos recebida por Rutherford admitiu seu ingresso na escola secundária de Nelson College. (SEGRÈ, 1987, p. 48)

Em 1889, Rutherford recebeu outra bolsa de estudos que o levou para o Canterbury College, local onde Rutherford realizou sua graduação e seu mestrado. Ao finalizar os três anos de graduação, Rutherford obteve o título de bacharel e mais uma bolsa, que o possibilitou permanecer em Canterbury por mais um ano. Após realizar seu trabalho de pós-graduação, obteve o grau de mestre em física matemática e em ciência física. (BADASH, 2007, p. 2382)

Ainda em Canterbury, Rutherford iniciou uma pesquisa sobre a magnetização do ferro por descargas de alta frequência, o que lhe rendeu o título de bacharel em ciências. Nesse estudo, Rutherford investigou o processo de magnetização através de correntes elétricas que se alternam rapidamente, sendo capaz de construir um detector de sinais sem fios. Tal aparelho se mostrou capaz de receber sinais provocados por ondas de rádio e fora projetado antes de Guglielmo Marconi (1874-1937) realizar seus experimentos acerca da comunicação sem fio. (BADASH, 2007, p. 2383)

Em 1894, Rutherford concorreu a uma bolsa de estudos oferecida pela Exposição de Londres de 1851. Embora tivesse obtido a segunda colocação, foi contemplado com a referida bolsa devido à desistência do primeiro colocado. O local escolhido por Rutherford foi o laboratório Cavendish, localizado na Universidade de Cambridge, Inglaterra, que se encontrava sob a direção de J.J. Thomson. Vale ressaltar, ainda, que Rutherford foi o primeiro aluno estrangeiro a estudar no Cavendish. (SEGRÈ, 1987, p. 49)

Em 1895, recém-chegado em Cambridge, Rutherford apresentou seu detector de sinais, atraindo a atenção de diversos professores do laboratório, inclusive do próprio J.J. Thomson. Em reconhecimento ao seu grande potencial na elaboração de experimentos, Rutherford foi convidado por J.J. Thomson para investigar o efeito provocado pelos raios X ao atravessarem gases. Sempre interessado em novos assuntos e disposto a trabalhar na vanguarda da ciência, Rutherford aceitou a proposta impetuosamente.

⁷ Faraday é considerado o maior experimentalista do século XIX, tendo alimentado a Física teórica durante todo esse período com seus dados experimentais do 1º terço do século. (CAMEL, 2008)

Os experimentos realizados por J.J. Thomson e Rutherford conduziram à conclusão de que os raios X produzem, nos gases atravessados por tal radiação, um elevado número de íons que se recombinam após um lapso de tempo. Segundo Brennan (2003, p. 133), tal trabalho constituiu o primeiro grande passo dado na investigação acerca da estrutura atômica, pois indicou que a matéria é formada por partes carregadas positiva e negativamente. A continuidade desta pesquisa ficou a cargo de J.J. Thomson com seu estudo sobre os elétrons. A partir de tal parceria com J.J. Thomson, Rutherford se inseriu na investigação da radioatividade, sendo este o campo de seus esforços nos 40 anos seguintes. (BADASH, 2007, p. 2383)

Como já mencionado anteriormente, Rutherford é considerado um dos maiores físicos experimentais, sendo comparado a Michael Faraday frequentemente neste aspecto. Brennan (2003, p. 125) discorre a respeito de uma comum distinção estabelecida entre Rutherford e Albert Einstein quanto as suas áreas de investigação. “Enquanto Einstein foi o teórico-modelo, trabalhando sozinho e fiando-se em experimentos mentais, Rutherford foi o maior dos experimentalistas”.

2.4 CAMBRIDGE

Rutherford realizou seu primeiro grande trabalho na área da radioatividade em Cambridge, sendo o responsável por determinar a natureza heterogênea das radiações emitidas pelas substâncias radioativas. No artigo *Uranium Radiation and the Electrical Conduction Produced by It*⁸ de 1898, Rutherford descreve o experimento com o qual verificou se as radiações emitidas pelos compostos de urânio eram homogêneas.

Para a elaboração dos experimentos realizados ao longo de sua pesquisa em radioatividade, Rutherford lançou mão de alguns métodos e aparelhos específicos, como o eletrômetro de quadrantes (figura 3). É importante destacar a importância do eletrômetro para o desenvolvimento do trabalho de Rutherford, que, como será visto adiante, permitiu a compreensão de relações intrínsecas ao fenômeno radioativo. (MARQUES, 2006, p. 45)

O eletrômetro de quadrantes, que se vale do método elétrico, consiste em um instrumento utilizado na mensuração da atividade de amostras radioativas. Contrapondo-se ao método fotográfico, qualitativo e lento, o método elétrico possui um caráter quantitativo e requer um menor tempo de aplicação, se pautando na teoria da ionização, que propõe a

⁸ Radiação do Urânio e a Condução Elétrica Produzida por Ela. (Tradução nossa)

possibilidade de se inferir a intensidade da atividade de amostras radioativas através da corrente elétrica gerada nos gases atravessados pelas radiações que emitem.



Figura 3 – Eletrômetro de quadrantes utilizado por Rutherford em seus experimentos.

Fonte: MARQUES, 2006.

O experimento contemplado no ensaio de 1898 foi projetado com a finalidade de verificar a penetrabilidade das radiações emitida pelos compostos de urânio em materiais. Evidentemente, Rutherford imaginava que tal radiação não seria homogênea, tendo que realizar sucessivos testes a fim de corroborar sua hipótese. Para isso, utilizou uma fonte radioativa no interior de um aparato experimental, ilustrado na figura 4, que continha uma placa metálica conectada a um eletrômetro.

O aparato experimental foi montado com um composto de urânio no centro de uma placa de zinco A com 20 cm de comprimento. Situada a 4 cm da placa A, se encontrava uma placa de zinco B, medindo, também, 20 cm de comprimento. A placa A foi ligada a extremidade de uma bateria, que fornece uma tensão de 50 volts, enquanto a outra extremidade foi ligada a Terra. A placa B foi conectada a um par do eletrômetro e o outro par foi conectado a Terra. (RUTHERFORD, 1898, p. 173)

Ao inserir folhas de alumínio entre a fonte radioativa e a placa metálica, Rutherford observou as alterações provocadas na intensidade das radiações emitidas. Notou que, inicialmente, a intensidade registrada era elevada e, até a terceira folha, decrescia

uniformemente. A partir da colocação de mais folhas, foi observada, entretanto, uma diminuição ínfima na intensidade dos raios, isto é, um efeito desprezível.

A modificação no comportamento da radiação, que, inicialmente, se mostrou facilmente absorvida e, após da colocação da terceira folha metálica, se apresentou menos intensa e mais penetrante, indicou que a hipótese de Rutherford se confirmara. Deste modo, foi possível concluir que as emissões radioativas são complexas, havendo, no mínimo, dois tipos de radiação, que podem ser diferenciados segundo seus poderes de penetração – as radiações alfa e beta. Em seu artigo, Rutherford (1898, p. 175, tradução nossa) relata:

Estas experiências mostram que a radiação de urânio é complexa, e que estão presentes pelo menos dois tipos distintos de radiação– uma que é muito facilmente absorvida, que será denominada, por conveniência, radiação α , e a outra de um caráter mais penetrante, que será denominada radiação β .

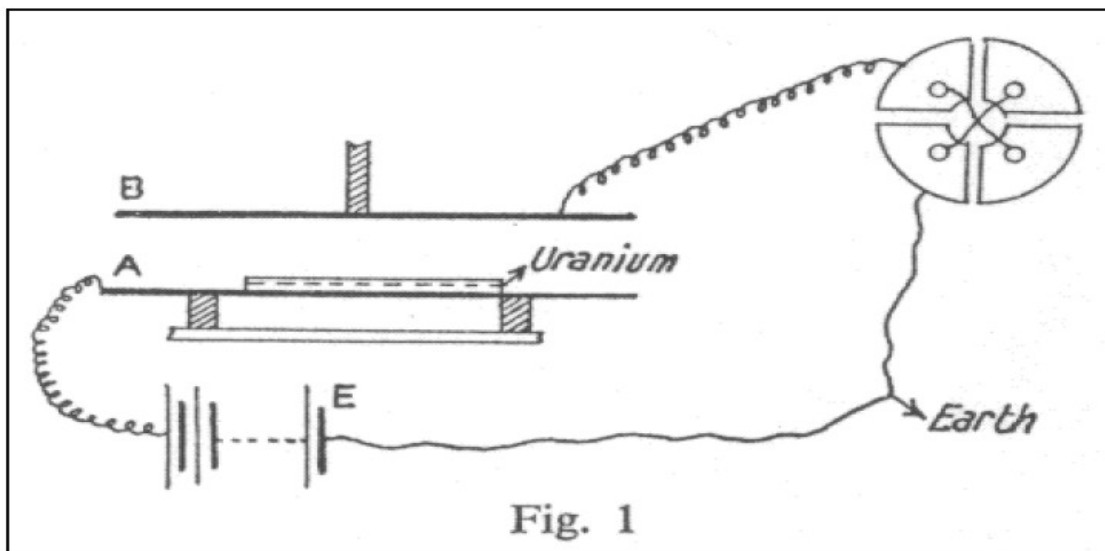


Figura 4 – Esquemática do experimento realizado em 1898.

Fonte: RUTHERFORD, 1898.

Ao longo de sua pesquisa na área da radioatividade, Rutherford priorizou a investigação da natureza e das principais propriedades da radiação alfa, que se mostrou um importante instrumento para o exame da estrutura da matéria. Rutherford observou que tais raios ionizam o ar que atravessam e apresentam carga elétrica positiva, uma vez que desviam na direção da placa carregada negativamente ao serem submetidos à ação de um campo magnético. É importante destacar que sua natureza foi, também, estudada por Rutherford, que a determinou como sendo íons bivalentes de hélio, como será visto posteriormente. (MARQUES, 2006, p. 50)

Becquerel identificou algumas das propriedades da radiação beta. Ele verificou que tal radiação viajava em alta velocidade e que se comportava de maneira similar aos raios catódicos quando submetida à ação de um campo magnético. Deste modo, concluiu que ambas as radiações partilham do mesmo constituinte – os elétrons. (MARQUES, 2006, p. 49)

O físico francês Paul Villard (1860-1934) descobriu um terceiro tipo de radiação que compõe as emissões radioativas. Ao defletir-las em um campo magnético, observou que um feixe de raios não desviava de sua trajetória retilínea. Constatou, também, que estes raios apresentavam um elevado poder de penetração, percorrendo vários metros no ar e apresentando um alcance superior aos obtidos pelos raios alfa e beta. Posteriormente, concluiu que este tipo de radiação se tratava de ondas eletromagnéticas de alta frequência e, por conseguinte, de curto comprimento de onda. Tal radiação foi denominada de raios gama por Rutherford. (SEGRÈ, 1987, p. 51)

Mesmo em meio a uma grande apreensão do conhecimento acerca das radiações emitidas pelas substâncias radioativas, a natureza do fenômeno da radioatividade permanecia, ainda, misteriosa. As emissões radioativas não eram simples e homogêneas como uma parcela expressiva dos físicos admitia, mas sim complexas e compostas por três tipos diferentes de radiação, que exibem distintos poderes de penetração e de ionização. Assim se deu a virada do século, sabendo-se da existência da radioatividade, dos elementos polônio e rádio e das radiações alfa, beta e gama.

3 MCGILL

3.1 O CONCEITO DE MEIA-VIDA

Acredita-se que Rutherford deixou Cambridge em razão do exacerbado esnobismo em relação àqueles que estudaram nas universidades coloniais. Ciente da aposentadoria de Hugh Callendar (1863-1930), Rutherford, então, se candidatou ao cargo de professor de Física da universidade McGill localizada no Canadá. As autoridades de Montreal, à procura de alguém que dirigisse seu bem equipado laboratório, ficaram convencidas com a carta de recomendação redigida por J.J. Thomson e, deste modo, admitiram o ingresso de Rutherford na universidade. (BADASH, 2007, p. 2384)

Ao chegar à McGill em 1898, Rutherford ocupou a cátedra de Física e se deparou com um novo ambiente bastante acolhedor. Segrè (1987, p. 51) define a atitude de Rutherford de mudar-se de Cambridge, centro mundial da Física, para uma universidade colonial como sendo “um salto no escuro”, argumentando, contudo, que Rutherford possuía “um espírito aventureiro”. Cabe destacar, porém, a formidável infraestrutura e os abundantes recursos tecnológicos presentes em McGill, “universidade financiada por um magnata do tabaco” (BADASH, 2007, p. 2384), que possibilitaram a realização dos numerosos experimentos em radioatividade projetados por Rutherford e seus colaboradores.

O trabalho desenvolvido por Rutherford em Cambridge se restringiu ao estudo dos compostos de urânio. Em McGill, no entanto, expandiu sua investigação aos elementos rádio, actínio e tório. Vale lembrar que as primeiras investigações acerca da radioatividade do tório conduziram à conclusão de que as radiações emitidas por esse elemento eram similares àquelas provenientes do urânio. Tais resultados se devem, principalmente, às pesquisas de Marie e Pierre Curie e de Rutherford. (BADASH, 2007, p. 2383)

Em decorrência da recente descoberta de sua radioatividade, por Marie Curie, o elemento tório constituiu o principal objeto de investigação de Rutherford em McGill. Examinando os compostos de tório, Rutherford notou que as irregularidades observadas na mensuração das atividades se deviam a uma substância gasosa radioativa que emanava das amostras em análise. Tal substância foi denominada de “emanação” por Rutherford e se mostrou capaz de produzir uma radioatividade temporária nas superfícies dos sólidos em que se depositava. (SEGRÈ, 1987, p. 52)

Durante a passagem de Rutherford por McGill, muitas substâncias radioativas foram descobertas. Tais substâncias eram derivadas, de certo modo, dos elementos químicos radioativos analisados, como, por exemplo, o tório e o rádio. Devido ao fato de a massa atômica constituir o parâmetro até então vigente de identificação dos elementos, admitia-se

que essas substâncias, em geral, seriam formadas por novas espécies de matéria, isto é, por novos elementos químicos.

Contudo, a pesquisa de Rutherford sobre o processo de transmutação, que será vista mais adiante, foi pioneira em assinalar a ideia da existência dos isótopos, átomos de um mesmo elemento químico com massas atômicas distintas. Tal ideia foi introduzida, porém, por Soddy em 1913 e se restringia aos elementos radioativos, pois as evidências experimentais até então obtidas decorriam da pesquisa acerca do fenômeno da radioatividade. Posteriormente, à luz do trabalho desenvolvido por Francis Aston (1877-1945), o conceito de isótopo se estendeu aos demais elementos não radioativos. (MEDEIROS, 1999, p. 34)

Um aparato experimental projetado por Aston permitiu a identificação, a quantificação e o registro dos isótopos existentes. “Aston pôde, num curto espaço de tempo, determinar as massas de 212 isótopos naturais”. (MEDEIROS, 1999, p. 36) Tal aparato foi denominado de espectrógrafo de massa, pois realiza o registro gráfico, similar ao utilizado na espectroscopia, de feixes de raios cujas massas das partículas constituintes são determinadas a partir dos desvios verificados. Deste modo, concluiu-se que os elementos químicos, em geral, consistem em uma mistura de isótopos em proporções diferentes.

Rutherford publicou os resultados iniciais de seu trabalho com compostos de tório no ensaio “*A Radioactive Substance emitted from Thorium Compounds*”⁹ de setembro de 1900. Nesta publicação, se encontram relatados os resultados acerca dos estudos da radiação proveniente do tório, a descrição de algumas das propriedades da sua emanção e a construção de uma importante relação entre a atividade da amostra radioativa e o tempo. Assim, Rutherford definiu algumas características da emanção do tório relacionadas à sua natureza gasosa:

A emanção passa por um tampão de algodão, sem qualquer perda de seus poderes radioativos. Também é afetada por borbulhamento através de água quente ou fria e de ácido sulfúrico fraco ou forte. A este respeito, age como um gás comum. (RUTHERFORD, 1900, p. 225, Tradução nossa).

Constatou, ainda, mais algumas características da radiação proveniente da emanção do tório, como as seguintes:

A emanção é semelhante ao urânio quanto a sua ação fotográfica e elétrica. Ela pode ionizar o gás em sua vizinhança e pode afetar uma chapa fotográfica no escuro após a exposição de vários dias. [...] mas é a radiação da emanção, não a emanção em si, que produz as ações ionizantes e fotográficas. (RUTHERFORD, 1900, p. 226, Tradução nossa)

⁹ Uma Substância Radioativa emitida pelos Compostos de Tório (Tradução nossa)

Rutherford e seus colaboradores de McGill introduziram o termo *emanação* para se referirem aos gases provenientes dos compostos de tório. Gases similares já tinham sido identificados por outros físicos que investigavam os demais elementos radioativos, como o rádio e o actínio. Marie Curie havia verificado uma constante diminuição do vácuo produzido em um aparato experimental que continha um composto de rádio. Mais tarde, em 1900, Friedrich Dorn (1848-1916) constatou que amostras de rádio emitiam gases radioativos, os quais, em analogia ao trabalho de Rutherford, foram denominados de emanação do rádio. Outros cientistas observaram que tal emissão gasosa se encontrava, também, presente nos compostos de actínio, sendo nomeada de emanação do actínio. (AFONSO, 2009, p. 267)

De início, compreendeu-se que essas emanações seriam formadas pelos elementos correspondentes no estado de vapor. Posteriormente, em 1901, Rutherford e sua assistente Harriet Brooks (1876-1933) realizaram o primeiro experimento com vistas a determinar a massa atômica da emanação do rádio. Embora a estimativa alcançada tenha diferido da cifra correta, tal experimento representou um passo significativo rumo à formulação do conceito de transmutação elementar, pois pressupôs que a emanação do rádio se tratava de uma nova espécie de matéria em relação ao rádio. (AFONSO, 2009, p. 267)

Inicialmente, admitiu-se que as emanações do tório, do rádio e do actínio consistiam em radioelementos distintos entre si, recebendo, respectivamente, os seguintes nomes: torônio, Tn; radônio, Rn; e actinônio, An. Entretanto, com a consolidação do conceito de isótopo, verificou-se que as emanações se tratavam de isótopos de um mesmo elemento. Este foi denominado de radônio (^{222}Rn) devido ao fato de o isótopo de maior valor de meia-vida ser a emanação do rádio. (AFONSO, 2009, p. 267)

Ao investigar o comportamento dos compostos radioativos no decorrer do tempo, Rutherford observou que as atividades registradas decresciam em progressão geométrica. Em intervalos de tempo regulares, verificou que a atividade de certa amostra decaía à metade. A partir de tais conclusões, ele formulou o conceito de meia-vida, que designa o tempo necessário para que uma substância radioativa decaia à metade de sua atividade inicial. (BRENNAN, 2007, p.125)

Percebendo que a atividade dos compostos radioativos é proporcional à quantidade de matéria existente nos mesmos e decresce ao longo tempo, Rutherford construiu uma relação que, posteriormente, deu origem à lei fundamental do decaimento radioativo. Através de tal relação, foi possível determinar os valores de meia-vida de diversos radioelementos, sendo necessário, apenas, o conhecimento prévio acerca da taxa de decaimento radioativo dos mesmos, que depende da constante radioativa característica de cada radioisótopo e do número

de núcleos presentes em uma amostra. Como o conceito de núcleo ainda não existia, Rutherford se valeu de outros dados para determinar a referida taxa, como o número de íons gerados no gás atravessado pelas radiações provenientes da amostra radioativa em exame.

Para determinar os valores de meia vida através da lei do decaimento radioativo, definida por $N = N_0 \times e^{-\lambda t}$, é preciso considerar a fração final de átomos (N) como a metade da quantidade inicial (N_0), isto é, $N = \frac{N_0}{2}$. Posteriormente, deve-se substituir tal valor na

expressão enunciada na referida lei, obtendo-se a seguinte igualdade: $\frac{N_0}{2} = N_0 \times e^{-\lambda t}$. O método de cálculo do valor de meia-vida ($T_{1/2}$) consiste no isolamento de t, resultando na seguinte fórmula: $t = \frac{\ln 2}{\lambda}$, em que λ se refere à constante de decaimento radioativo da amostra considerada. (RUTHERFORD, 1900, p. 227)

O conceito de meia-vida se tornou bastante caro a algumas áreas do conhecimento, como à Química, à Física e à Geologia, devido as suas importantes aplicações práticas. A meia-vida consiste em uma característica particular, pois apresenta valores distintos para cada radioisótopo¹⁰. Em razão de tal fato, constitui, ainda, um método eficaz para a identificação de novos elementos químicos radioativos e para a datação de rochas, fósseis e espécimes que contenham isótopos radioativos cujos valores de meia-vida são conhecidos. (BRENNAN, 2003, p. 136)

Rutherford determinou os valores das taxas de decaimento radioativo dos compostos analisados e, conseqüentemente, suas meias-vidas através de um experimento realizado com o aparato ilustrado na figura 5. Este aparato consiste em uma válvula aberta equipada com uma série de eletrodos conectados a um eletrômetro. No caso da emanação do tório, Rutherford observou que, após cerca de um minuto, a sua atividade diminuiu, aproximadamente, metade de seu valor inicial. (BADASH, 2007, p. 2384) Rutherford descreve seu experimento da seguinte maneira:

A emanação, gradualmente, perde seu poder radioativo. O método seguinte foi adotado para determinar a taxa de decaimento da intensidade da radiação das partículas radioativas emitidas pelo óxido de tório. Uma camada espessa de óxido de tório foi colocada em um recipiente de papel estreito retangular A constituído por duas espessuras de papel almaço. O papel interrompeu a radiação normal quase que inteiramente, mas permitiu a emanação passar. O tório, assim, delimitado, foi colocado dentro de um longo tubo de metal B. Uma extremidade do tubo foi acoplada a um grande recipiente cilíndrico isolado C, o qual tinha pequenos orifícios, no final, para a passagem de ar. Dentro de C foi fixado um elétrodo, D, conectado a um par de quadrantes de um eletrômetro Thomson. O cilindro, C, foi

¹⁰ Conjunto de átomos do mesmo elemento radioativo com número de nêutrons característico. (BADASH, 2007)

ligado a um terminal de uma bateria de 100 volts, o outro terminal foi ligado à Terra. (RUTHERFORD, 1900, p. 223, Tradução nossa).

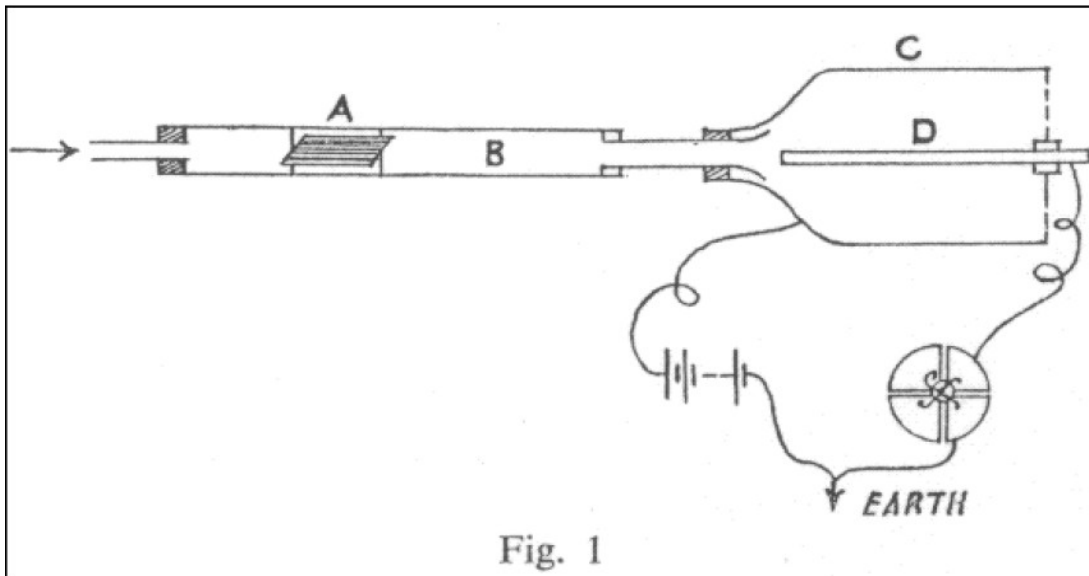


Figura 5 – Aparato experimental de mensuração dos valores de meia-vida.

Fonte: RUTHERFORD, 1900.

Segundo Segrè (1987, p.55), ao desenvolver um trabalho de semelhante importância, sir William Crookes e outros cientista obtiveram resultados significantes na investigação química do fenômeno radioativo. Crookes verificou que a maior parte da radioatividade do urânio se devia a um constituinte ativo, que foi isolado através de processos químicos. O nome dado a esse constituinte foi urânio X, cuja natureza química difere daquela do urânio. Tal procedimento influenciou diretamente a investigação que Rutherford e seu colaborador, Frederick Soddy, realizaram acerca dos compostos de tório em 1902, como será apresentado adiante. (BADASH, 2007, p. 2834)

Sir William Crookes conseguiu separar os componentes radioativos de grande atividade e natureza química distinta do urânio e deu o nome UrX a esta substância. Neste momento, até que mais se saiba sobre sua verdadeira natureza, será conveniente nomear o componente ativo do tório de ThX, similarmemente. (RUTHERFORD; SODDY, 1902, p. 375, Tradução nossa)

A pesquisa em radioatividade, no início do século XIX, se encontrava em plena ascensão devido aos resultados decorrentes da investigação física e química do fenômeno em questão. O conceito de meia vida e o estudo acerca das radiações emitidas pelas substâncias radioativas caracterizavam a investigação física. Por outro lado, a identificação de novos radioelementos e a separação de constituintes ativos marcavam os rumos da investigação química. A série de resultados obtidos no campo da radioatividade culminou na proposição da

teoria da transmutação elementar por Rutherford e Soddy, como será visto adiante. (SEGRÈ, 1987, p. 55)

3.2 A CAUSA E A NATUREZA DA RADIOATIVIDADE

A explicação aceita até os dias atuais para o fenômeno da radioatividade foi fornecida por Ernest Rutherford e seu colaborador, Frederick Soddy. Juntos, no ensaio “*The Cause and Nature of Radioactivity*”¹¹ de 1902, sugeriram que o fenômeno radioativo consiste em um processo de transmutação elementar, denominado, por eles, de desintegração radioativa. Todavia, procuraram ser cautelosos na apresentação da ideia de transmutação, pois ela remetia à alquimia, que já havia sido exonerada da Química, e contrariava o princípio da imutabilidade dos elementos, o qual se encontrava arraigado às concepções científicas hegemônicas da época. (BADASH, 2007, p.2385)

A radioatividade é acompanhada por alterações químicas, em que novos tipos de matéria são continuamente produzidos. Estes produtos de reação são, primeiramente, radioativos, sua atividade diminui regularmente a partir do momento de sua formação. A sua produção contínua mantém a radioatividade da matéria que o produziu em um valor de equilíbrio definido. A conclusão tirada é que essas mudanças químicas possuem um caráter subatômico. (RUTHERFORD; SODDY, 1902, p. 370, Tradução nossa).

O artigo de 1902 contempla o conjunto de resultados obtidos na investigação dos compostos de tório e a construção do conceito de desintegração radioativa ou transmutação elementar. A problemática que conduziu à definição da causa e da natureza da radioatividade consistiu na ocorrência simultânea de dois processos – a produção contínua de “novas espécies de matéria” e o decréscimo da atividade por meio da emissão de energia sob a forma de radiação. Como será visto adiante, tais processos foram associados às taxas de recuperação e de decaimento da atividade dos compostos analisados, as quais atingem um estado de equilíbrio após determinado intervalo de tempo.

Tais ações – (1) a produção de material radioativo, e (2) a dissipação de sua energia disponível pela radiação –, que são expostas por compostos de tório nos efeitos secundários do poder emanante e a radioatividade estimulada, estão na verdade realizando-se em todas as manifestações de radioatividade. A constante radioatividade dos elementos radioativos é o resultado de um balanceamento entre dois processos opostos. (RUTHERFORD; SODDY, 1902, p. 371, Tradução nossa)

Os métodos empregados na mensuração da atividade das substâncias radioativas foram, basicamente, o fotográfico e o elétrico. A partir da análise das vantagens e das desvantagens de cada método, foi possível concluir que o elétrico é o mais preciso e, portanto,

¹¹ A Causa e a Natureza da Radioatividade (tradução nossa)

o mais adequado, uma vez que o fotográfico apresenta um caráter mais qualitativo e exige períodos longos de aplicação.

Com o uso do método elétrico, comprovou-se que as radiações emitidas pelo tório possuem as mesmas propriedades que aquelas provenientes do urânio. É importante ressaltar que Rutherford se vale do método elétrico desde seus primeiros trabalhos no campo da radioatividade realizados em Cambridge e que o eletrômetro de quadrantes constituiu o principal instrumento de mensuração vinculado a esse método, como já mencionado anteriormente.

São utilizados dois métodos para a medição da radioatividade, o elétrico e o fotográfico. O método fotográfico possui um caráter mais qualitativo do que quantitativo; seus efeitos são cumulativos com o tempo, e, como uma regra, as exposições prolongadas são necessárias quando a radioatividade de um agente fraco como o tório está para ser demonstrada. [...] Mas a objeção mais importante para o método fotográfico é que certos tipos de raios provenientes de substâncias radioativas, que ionizam gases fortemente, produzem pouco ou nenhum efeito sobre a película sensível. No caso de urânio, estes raios, fotograficamente inativos, formam a maior parte da radiação total, e muito do trabalho anterior sobre o urânio pelo método fotográfico deve ser interpretado de forma diferente. [...] Por outro lado, é possível comparar as intensidades de radiação pelo método elétrico com maior rapidez e com um erro não superior a 1 ou 2 por cento. Estes métodos baseiam-se na propriedade possuída por todas as radiações do tipo em questão, de tornar um gás capaz de descarregar ambas, positiva e negativa, eletricidades. (RUTHERFORD; SODDY, 1902, p. 3).

Rutherford e Soddy constataram, por métodos experimentais, que a maior parte da radioatividade do tório é devida a outra espécie de matéria. Tal constatação permitiu o desenvolvimento de toda a investigação acerca dos compostos de tório. Baseando-se no trabalho de Crookes com o urânio, separaram, quimicamente, o constituinte ativo do tório. O processo de separação química empregado consistiu na dissolução de nitrato de tório em meio amoniacal, resultando na formação de hidróxido de tório, que precipitou, e de um filtrado, constituído de sais de amônia e de um resíduo altamente radioativo.

A fim de obter tal resíduo radioativo a partir do filtrado, foram utilizados determinados procedimentos, como evaporação e ignição, que isolaram o constituinte ativo do tório. Este foi denominado de tório X em analogia ao urânio X, nome dado por Crookes ao constituinte ativo do urânio. O tório X, obtido sempre em pequenas quantidades, exibia uma radioatividade consideravelmente elevada, sendo mais intensa do que a possuída pelo mesmo peso de tório, e apresentava propriedades químicas definidas, constituindo um composto não tórico.

Após realizarem a separação química entre o tório e o tório X, Rutherford e Soddy estudaram a influência do tempo na atividade de ambos os elementos. Vale ressaltar que até então já tinha sido apontada uma ideia incipiente de modificação química elementar no

fenômeno radioativo, uma vez que, nos compostos de tório, se encontravam presentes quantidades significativas de outro tipo de matéria, o tório X.

Após certo intervalo de tempo, as atividades do tório e do tório X, já separados, exibiram um comportamento intrigante. Inicialmente, o tório X apresentava uma atividade elevada enquanto que o tório, livre de seu constituinte ativo, se mostrava com uma atividade bastante reduzida. Passadas algumas semanas, Rutherford e Soddy observaram que o tório X havia perdido a sua atividade quase que completamente ao passo que o tório havia recuperado, praticamente, toda sua atividade, como ilustrado no gráfico da figura 6.

As preparações empregadas em nossos experimentos anteriores foram adiadas durante as férias de Natal. Ao examiná-las cerca de três semanas mais tarde, verificou-se que o hidróxido de tório, que originalmente possuía apenas cerca de 36 por cento da sua atividade normal, tinha quase recuperado completamente o valor usual. Os resíduos ativos, por outro lado, preparados por ambos os métodos, tinham quase perdido completamente a sua atividade original (RUTHERFORD; SODDY, 1902, p. 375)

Deste modo, tornou-se possível o estabelecimento de uma importante relação entre o comportamento das atividades do tório e do tório X, que será crucial para a compreensão do fenômeno radioativo. Esta relação se fundamenta nos dados experimentais relativos à mensuração das atividades de ambos os compostos durante certo intervalo de tempo. Tais dados originaram as informações que compuseram os índices de recuperação e de decréscimo das atividades do tório e do tório X respectivamente, os quais são complementares e atingem um valor constante, mantendo sempre o mesmo valor para a radioatividade do tório. Rutherford e Soddy (1902, p. 479, Tradução nossa) definem tais taxas da seguinte maneira:

Uma longa série de observações foi imediatamente iniciada com o objetivo de determinar:

1. O índice de recuperação da atividade de tório restituído menos ativo pela remoção do ThX;
2. O índice de decréscimo da atividade do ThX separado.

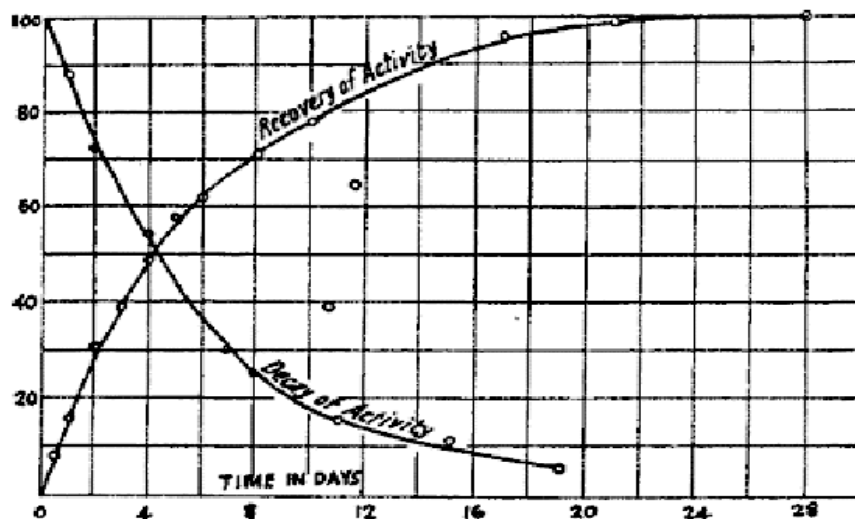


Figura 6 – Curva de recuperação e de decaimento.

Fonte: RUTHERFORD; SODDY, 1902.

O gráfico da figura 6 relaciona a atividade da fonte analisada em termos percentuais, eixo das ordenadas, com o tempo em dias, eixo das abscissas. As duas curvas exponenciais obtidas, uma referente à recuperação e a outra referente ao decaimento, se encontram representadas sobre esse gráfico. Constatou-se que, após um intervalo de tempo de quatro dias, o tório havia recuperado metade de sua atividade ao passo que o tório X teve sua atividade decaída à metade.

Com a finalidade de explicar, adequadamente, as curvas referentes aos índices de recuperação e de decrescimento, conjecturou-se algumas interpretações, que foram corroboradas em meio aos resultados experimentais obtidos. A curva de recuperação se deve, segundo Rutherford e Soddy, à produção contínua de material ativo, isto é, de tório X. A curva de decrescimento, por sua vez, decorre do decaimento da atividade do tório X em progressão geométrica.

No sentido de verificar como os dois processos [decaimento e recuperação das atividades] estavam conectados. Os resultados conduziram ao aspecto que pode finalmente ser declarado. A radioatividade do tório a qualquer momento é resultante de dois processos opostos:

1. A produção de novo material radioativo a um índice constante pelo composto de tório;
2. O decrescimento do poder irradiador do material ativo com o tempo. (RUTHERFORD; SODDY, 1902, p. 478, Tradução nossa)

A fim de confirmar a hipótese de que a radioatividade consiste em um processo de transformação química subatômica, Rutherford e Soddy verificaram a natureza química do tório X e a influência das condições físicas e químicas no comportamento das atividades dos referidos compostos. Constatando que a obtenção do filtrado ativo só ocorre através da precipitação em amônia, foi possível confirmar que o tório X consiste em um tipo distinto de matéria não tórica. Após a observação de que os índices de decaimento e de recuperação não são afetados por quaisquer condições físicas, como temperatura e pressão, ou combinações químicas, concluíram que a radioatividade se trata de uma propriedade subatômica.

Rutherford e Soddy buscaram, ainda, evidências experimentais relativas à produção contínua de material ativo, fator responsável pela complementaridade dos índices de recuperação e de decaimento e pela constância do valor da radioatividade do tório. Os resultados obtidos conduziram à conclusão de que o tório, após certo intervalo, havia recuperado parte de sua atividade perdida devido à retirada do tório X. Observaram, também,

o surgimento de novas quantidades de tório X, no composto de tório em exame, proporcionais à atividade recuperada. Tal fato indicou a ocorrência da produção contínua de material ativo, sendo constatado que, após cerca de um mês, o tório X atingia níveis máximos de atividade nos compostos de tório.

Diante disso, define-se a causa e a natureza do fenômeno radioativo através do conceito de transmutação elementar, que se encontra vinculado à ideia de transformação química subatômica. A produção contínua de material ativo, então, se deve à desintegração ou transmutação espontânea dos átomos de tório em átomos de tório X. Deste modo, corroborou-se a hipótese de que a radioatividade do tório consiste em um equilíbrio entre dois processos opostos, o decaimento do material ativo formado e a recuperação da atividade do tório por meio da produção contínua de tório X, seu constituinte ativo. Rutherford e Soddy (1902, p. 496. Tradução nossa) expressaram os resultados experimentais obtidos e suas considerações teóricas da seguinte maneira:

Já que, portanto, a radioatividade é ao mesmo tempo um fenômeno atômico e acompanhado por transformações químicas a partir das quais novos tipos de matéria são produzidos, essas transformações devem estar ocorrendo dentro do átomo, e os elementos radioativos devem estar sofrendo transformação espontânea. Os resultados até então obtidos, que indicavam que a velocidade da reação não é afetada pelas condições, esclarecem que as mudanças em questão são diferentes em caráter de quaisquer outras que têm sido lidadas pela Química. É aparente que nós estamos lidando com fenômenos fora da esfera de forças atômicas conhecidas. A radioatividade pode, assim, ser considerada como uma manifestação de uma transformação química subatômica.

Tal conclusão se estende aos demais elementos radioativos, isto é, Rutherford e Soddy generalizaram os resultados obtidos em sua investigação. Para isso, fizeram referência aos trabalhos realizados por outros cientistas no campo da radioatividade. Deste modo, foi observado um comportamento similar ao do tório nos principais elementos radioativos estudados: urânio, rádio e actínio.

Todos os pesquisadores mais proeminentes nesse assunto concordam em considerar a radioatividade um fenômeno atômico. Sr. E Sra. Curie, os pioneiros na química do tema, têm recentemente apresentado suas visões. Eles afirmam que essa ideia fundamenta todo seu trabalho desde o princípio e, a partir dele, criaram seus métodos de pesquisa. Sr. Becquerel, o descobridor original da propriedade no urânio, em seu anúncio sobre a recuperação da atividade do mesmo elemento após o constituinte ativo ter sido removido por tratamento químico, aponta a importância do fato de que o urânio está emitindo raios catódicos. (RUTHERFORD; SODDY, 1902, p. 496. Tradução nossa)

Os índices de decaimento e de recuperação da atividade dos compostos examinados, como já dito anteriormente, atingem um valor de equilíbrio. A radioatividade, então, é condicionada pela complementaridade entre a taxa de recuperação do elemento pai e a taxa de

decaimento do elemento filho. A recuperação da atividade decorre da produção contínua de constituinte ativo em compostos radioativos através da transmutação elementar. Rutherford, então, assume a tarefa de ordenar os radioelementos conhecidos em séries de decaimento, também conhecidas como famílias radioativas, como ilustrado na figura 7. (BADASH, 2007, p. 2385).

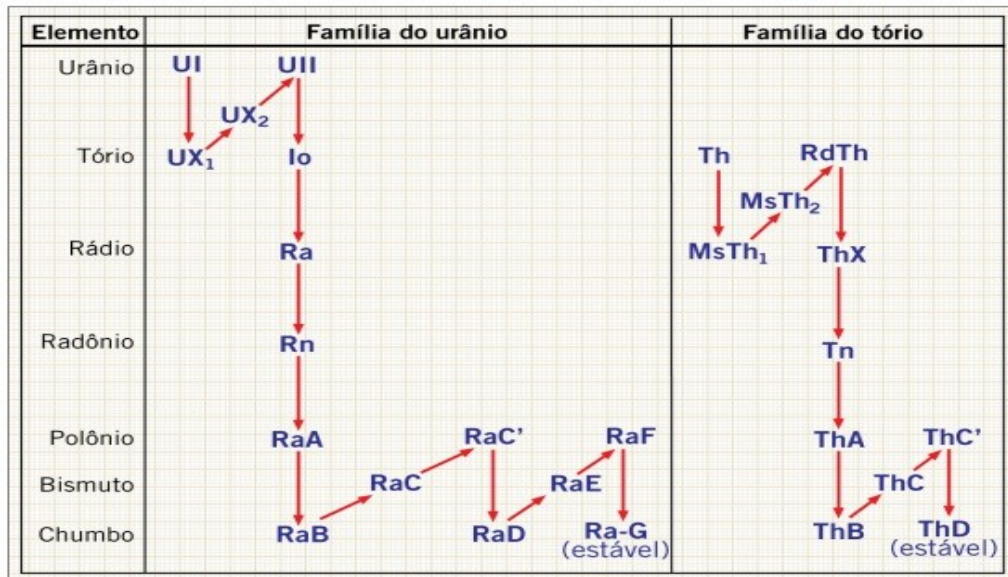


Figura 7- Série de decaimento radioativo do urânio e do tório adaptada.

Fonte: TAVARES, 2011

A partir de uma análise minuciosa da atividade dos compostos de tório e de seus produtos radioativos, Rutherford e Soddy consolidaram a radioatividade como um campo científico promissor. Mesmo confrontando concepções arraigadas no pensamento científico do século XIX, impactaram, profundamente, o desenvolvimento científico de todo o século XX. O ensaio de 1902 contempla, plenamente, a teoria da transmutação elementar, a qual teve como base não só as observações experimentais realizadas em McGill, mas também os trabalhos concomitantes de outros físicos, como o dos Curie, de Becquerel e de Crookes.

3.2 DEBATES SOBRE A TRANSMUTAÇÃO

A fim de compreender a resistência sofrida pela teoria da transmutação elementar, é importante expor, aqui, o olhar da ciência moderna em relação à alquimia. A prática alquímica esteve em vigor no período de 300 a 1400 d.C. A alquimia consiste em um campo de investigação da matéria e de suas transformações que se fundamenta, majoritariamente, em

ideias de cunho místico. Os alquimistas acumularam conhecimentos acerca das técnicas de metalurgia, que os possibilitaram examinar minérios e obter novas substâncias, e almejavam obter a pedra filosofal e o elixir da longa vida, pois o objetivo de seus esforços era, sobretudo, realizar a transmutação de metais comuns em ouro. (VANIN, 1994, p.21)

Até meados do século XVI, a alquimia ainda era praticada de forma abrangente através da iatroquímica, precursora da química médica, ou seja, os estudiosos da natureza, em geral, permaneciam ligados às concepções místicas. Entretanto, com a instituição do pensamento científico moderno a partir de meados do século XVII, a Química, assim como outras áreas do conhecimento, se constituiu como uma ciência propriamente dita. O trabalho de Lavoisier e a formulação das demais leis ponderais e volumétricas marcou a passagem da química para um campo científico, ocasionando o seu afastamento das concepções alquímicas permanentemente. (VANIN, 1994, p. 24).

O conceito de elemento químico é um dos principais pilares da Química. Esse conceito sofreu profundas modificações desde sua criação pelos filósofos gregos pré-socráticos até sua concepção moderna, que entrou em vigor a partir de meados do século XVII. Toda matéria seria constituída por elementos químicos, que não poderiam ser decompostos em substâncias mais simples. Nesse sentido, o pensamento químico moderno preconizava que os elementos fossem estáveis e imutáveis e os átomos, por conseguinte, indestrutíveis. (OKI, 2002, p.21).

Portanto, ao considerar a radioatividade um processo de transmutação, Rutherford e Soddy impactaram duas concepções intrínsecas ao pensamento científico moderno. Tais concepções eram a indestrutibilidade dos átomos e a imutabilidade dos elementos químicos. Assim, é justificada a cautela de Rutherford ao conceber o conceito de transmutação elementar como uma explicação para o fenômeno radioativo. (SEGRÈ, 1987, p. 57)

Entre os cientistas que se posicionaram contrariamente à teoria da transmutação, destacam-se Mendeleiev e Lord Kelvin. Posteriormente, em 1913, os elementos não seriam mais determinados pelo fim da análise química, mas sim por meio da quantidade de cargas positivas presentes no núcleo de seus átomos, isto é, através do seu número atômico. Deste modo, é retirada da Química a tarefa de definir e identificar os elementos químicos, se tornando esta uma tarefa da Física. Mendeleiev, então, ofereceu resistência às conclusões de Rutherford e Soddy em razão do risco ao qual seu sistema periódico passou a estar submetido, uma vez que se baseava na concepção, agora, refutada de elemento.

A teoria da transmutação elementar, como já dito anteriormente, desestabilizou bases até então sólidas do pensamento científico moderno. A teoria foi, também, essencial na resolução de uma controvérsia que permeava a humanidade há pelo menos três séculos, o

debate sobre a idade da Terra. Neste debate, ciência e religião assumiram posições antagônicas. Cientistas de diferentes áreas ofereceram respostas divergentes ao questionamento acerca da antiguidade da Terra. A condução ao encerramento de tal debate se iniciou com a realização do primeiro procedimento de datação radiométrica por Rutherford no início do século XX. (ARAÚJO, 2011, p. 35)

Desde meados do século XIX, a comunidade científica debatia a questão da idade da Terra. O debate envolveu um grande número de cientistas, polarizando geólogos e biólogos, de um lado, e físicos, de outro. As primeiras tentativas de determinação da idade do planeta foram de cunho religioso. Cada religião atribuía uma idade distinta à Terra. Uma das tentativas pioneiras mais conhecidas foi realizada pelo arcebispo James Ussher, que, em 1650, concluiu que a Terra havia sido criada no dia 23 de outubro de 4004 a. C. após realizar um estudo minucioso da bíblia. (BRYSON, 2005, p. 85)

As especulações científicas sobre a idade da Terra logo estabeleceram um embate entre cientistas e teólogos. Contudo, as principais controvérsias a respeito do referido tema ocorreram entre os próprios cientistas. Os geólogos foram os pioneiros, entre os cientistas, a indagarem sobre o quão antigo seria o nosso planeta. Eles tentaram determinar a duração das eras geológicas¹², se valendo de alguns parâmetros peculiares. Um desses parâmetros foi o princípio da sucessão fóssil¹³. Baseado nesse princípio, Charles Darwin mensurou a idade da Terra de maneira que validasse sua teoria da seleção natural, que explicava a evolução das espécies. A idade que havia determinado seria da ordem de centenas de milhões de anos, causando grande impacto, pois contrariou os conhecimentos vigentes sobre a idade do planeta. (BRYSON, 2005, p. 86)

William Thomson, Lord Kelvin, em contrapartida a Charles Darwin, notou que as leis da termodinâmica estavam sendo violadas nas tentativas de datar a Terra. Thomson pressupunha que a energia do planeta advinha da energia térmica de seu núcleo. Nesse sentido, presumiu que a Terra perdia calor para o espaço continuamente. Tal fato deveria possibilitar, então, a determinação da taxa de dissipação de calor e, por conseguinte, a mensuração da idade do planeta. Os cálculos de Kelvin constataram que a idade da Terra estaria entre 20 milhões e 40 milhões de anos. Outros físicos se valeram de métodos alternativos para datar o planeta, obtendo resultados próximos aos de Kelvin. Deste modo, o

¹² Eras geológicas: Pré-cambriano, Paleozoico, Mesozoico e Cenozoico. (BRYSON, 2005)

¹³ O princípio da sucessão fóssil permite a determinação da idade relativa das camadas ou estratos sedimentares, que vão se depositando ao longo do tempo, em que as camadas mais antigas situam-se na base. A idade seria determinada pelo conteúdo fóssil existente na camada em análise. Disso decorre que rochas que contêm os mesmos fósseis possuiriam a mesma idade, mesmo que se localizem em regiões geográficas diferentes. (ARAÚJO, 2011)

debate sobre a idade da Terra se intensificou, polarizando físicos, biólogos e geólogos. (ARAÚJO, 2011, p. 35)

O embate foi encaminhado a sua conclusão a partir dos resultados obtidos na pesquisa em radioatividade no início do século XX. Rutherford verificou que a meia-vida das substâncias radioativas poderia funcionar como uma espécie de relógio natural, pois consiste em um índice constante de decaimento não alterado por quaisquer condições físicas e químicas. A meia-vida, então, possibilita a determinação das idades de rochas, fósseis e espécimes. Estes, mesmo em meio a súbitas condições de armazenamento durante longos períodos, podem ter seu tempo de existência estimado a partir da meia-vida dos radioisótopos que os formam.

Com base na teoria da transmutação elementar e no conceito de meia-vida, Rutherford sugeriu, de maneira ainda incipiente, o método da datação radiométrica ao comparar as quantidades de hélio e de urânio presentes em uma amostra de pechblenda. Tal amostra foi datada em 700 milhões de anos. Por meio de tal realização, Rutherford abriu o caminho para a datação da idade do planeta, a qual indicou que a Terra seria bastante antiga, isto é, que sua idade seria da ordem de bilhões de anos. (BRENNAN, 2003, p. 125)

Posteriormente, com base nos conhecimentos acerca do processo de transmutação e dos conceitos de meia-vida e de família radioativa, Rutherford e seus colaboradores definiram mais adequadamente o método de datação. O procedimento de datação definido consistiu no mesmo processo de comparação, diferindo, apenas, quanto à utilização do hélio como parâmetro, pois foi constatado que sua presença era devida à da emissão alfa. (ARAÚJO, 2011, p. 36)

A fim de mensurar a idade de uma amostra formada por compostos radioativos, é necessária a comparação entre as quantidades de dois radioisótopos de uma mesma série de decaimento. Tal comparação possibilita a verificação de quanto do radioisótopo pai já decaiu e, conseqüentemente, de sua quantidade inicial. Conhecendo o valor de meia-vida de tal isótopo radioativo, é possível determinar o tempo de existência da amostra considerada. (ARAÚJO, 2011, p. 35)

Atribui-se a Rutherford a resolução do debate sobre a idade da Terra devido ao fato de ter constatado que a idade defendida por parte dos físicos, principalmente por Kelvin, desconsiderava as substâncias radioativas como fontes significantes de energia. Tal parcela dos físicos recorria à verificação do calor dissipado pela Terra a fim de determinar o tempo de existência do planeta. No entanto, por não terem ciência da existência dos elementos

radioativos ou por ignorá-los como fontes de calor, os seus cálculos forneciam estimativas díspares da realidade. Segundo Bryson (2005, p. 88):

Não devemos acusá-lo [Lord Kelvin] de teimosia. Simplesmente nada na física conseguia explicar como um corpo do tamanho do Sol podia arder de maneira contínua por mais de algumas dezenas de milhões de anos sem esgotar o combustível. A conclusão lógica: o Sol e seus planetas eram relativamente, mas inevitavelmente, jovens.

Diversos métodos de datação foram criados e aprimorados com o desenvolvimento do campo da geocronologia, instituído a partir da pesquisa de Rutherford no campo da radioatividade. Entre os principais métodos utilizados, destacam-se a datação por ^{14}C e a datação Pb-Pb¹⁴. O primeiro é muito utilizado na determinação da idade de diversos espécimes e artefatos, tendo em vista que as substâncias orgânicas são, fundamentalmente, compostas por carbono. O segundo foi utilizado por Claire Patterson (1922-1995) na determinação mais recente da idade do planeta, cujo valor obtido indica a cifra de 4,5 bilhões de anos. (ARAÚJO, 2011, p. 37)

¹⁴ Método de datação utilizado por Claire Patterson para determinar a idade da Terra através da datação de alguns meteoritos. (ARAÚJO, 2011)

4 MANCHESTER

4.1 PARTÍCULAS ALFA

Em 1907, Rutherford se mudou para a Universidade de Manchester, Inglaterra. Os últimos anos de Rutherford em McGill foram marcados por uma série de palestras, premiações e a produção do livro “*Radio-activity*”, publicado em 1904. Não se sabe ao certo o motivo da saída de Rutherford, especula-se, apenas, que desejava retornar para a Inglaterra, o centro científico mundial. Segundo Badash (2007, p. 2386), “se o Cavendish, sob Thomson, era o primeiro laboratório de física da Inglaterra, Manchester, sob Rutherford, era, certamente, o segundo”.

Em 1908, Rutherford foi laureado com o prêmio Nobel de Química de 1908. Evidentemente, o trabalho que desenvolvera em Montreal acerca da transmutação dos elementos constituiu o motivo de tal premiação. É válido ressaltar que a fama cada vez mais crescente de Rutherford atraiu, para Manchester, um número expressivo de cientistas que contribuiu, em muito, para a ampliação dos campos científicos da Física e da Química. Dentre os diversos auxiliares de Rutherford nessa universidade, destacam-se: Hans Geiger (1882-1945), Henry Moseley (1887-1915), Ernest Marsden (1889-1970), James Chadwick (1891-1974), Niels Bohr (1885-1962), Thomas Royds (1884-1955) entre outros. (BRENNAN, 2003, p. 139)

Os trabalhos iniciais desenvolvidos em Manchester se pautaram no estudo dos compostos de rádio. A emanção do rádio foi amplamente utilizada nos experimentos que envolveram as partículas alfa, as favoritas de Rutherford, que já haviam despertado sua atenção desde quando se encontrava em McGill. As características de tais partículas eram peculiares, uma vez que possuem dimensões atômicas, se mostrando um rico viés de investigação. Rutherford as considerava, inclusive, a chave para a compreensão da natureza da matéria, o clássico objetivo dos físicos. (BADASH, 2007, p. 2387)

Anteriormente, no período em que se encontrava estabelecido em McGill, Rutherford e seus colaboradores já haviam realizado importantes constatações acerca das propriedades das partículas alfa. Os principais resultados obtidos indicaram a positividade de sua carga elétrica, bem como sua ocorrência em diversos compostos radioativos conservando sempre a mesma relação entre carga e massa. No entanto, ainda desconhecia-se a identidade da emissão alfa, isto é, sua constituição. Assim, a natureza de tais partículas se tornou uma questão de expressivo destaque na pesquisa em radioatividade, pois, entre outros motivos, vinculava-se à problemática acerca da origem do hélio nos processos radioativos, como será visto adiante.

Diversas hipóteses acerca da proveniência do elemento hélio presente nos procedimentos radioativos foram conjecturadas. Dentre as numerosas especulações geradas, Lopes e Marques (2011, p. 142) destacaram três principais: “1) A partícula alfa poderia ser um átomo de hélio? 2) O hélio era um produto final do rádio? e 3) O hélio surgia em alguma fase das emissões?”. Mesmo tendo defendido outra hipótese, que será apresentada a seguir, Rutherford já considerou a possibilidade de o aparecimento do hélio derivar de um processo de transmutação, isto é, de o hélio constituir um produto de decaimento radioativo.

Ao se questionar sobre a identidade da partícula alfa, Rutherford inclinava-se para a ideia de que se tratava de hélio duplamente ionizado. Em 1908, investigou e desenvolveu métodos eficazes a fim de comprovar sua hipótese. Inicialmente, Rutherford e Geiger realizaram a contagem de partículas alfa emitidas por um grama de rádio em um segundo. Tal procedimento só foi possível devido ao fato de as partículas alfa serem perceptíveis em uma tela luminescente de sulfeto de zinco. Geiger, posteriormente, projetou um aparelho elétrico de contagem de partículas com base no experimento que havia construído junto a Rutherford, o contador Geiger-Müller¹⁵ (figura 8). (BADASH, 2007, p.2387)



Figura 8 – Contador Geiger-Muller criado em 1908.

Fonte: MAST, 2012

Por meio do método de contagem de cintilações, Rutherford e Geiger estimaram a carga *e* do elétron, empreendendo a tentativa mais precisa de mensuração de tal carga anterior

¹⁵ Aparelho eletrônico que indica níveis de radiação através da percepção e contagem de partículas. (BADASH, 2007)

ao experimento da gota de óleo¹⁶. Determinaram, ainda, a carga total de um composto de rádio e dividiram-na pelo número de partículas alfa contadas, obtendo, deste modo, o valor da carga por partícula. Tal valor concidia com, aproximadamente, o dobro de e , o que reforçava a hipótese de Rutherford. (BADASH, 2007, p. 2387)

A comprovação da natureza da partícula alfa ficou a cargo de Rutherford e do espectroscopista Thomas Royds. No experimento projetado por ambos, ilustrado na figura 9, foram utilizados dois tubos de vidro criados por Otto Blumbach. Um dos tubos, suficientemente fino para que fosse transparente às partículas alfa, foi preenchido com emanção de rádio e colocado no interior do outro tubo, mais grosso, que não possibilitava a evasão de tais partículas. (BADASH, 2007, p. 2387)

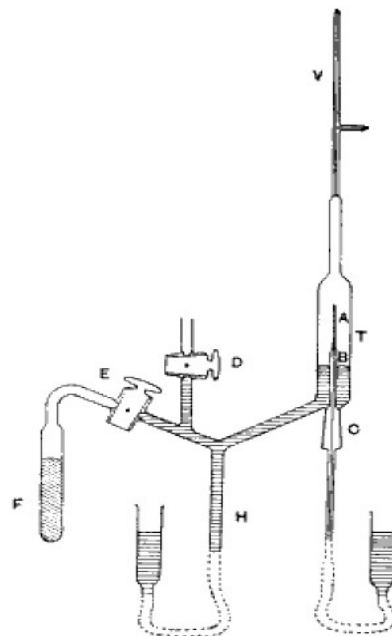


Figura 9 – Aparato experimental projetado por Rutherford e Royds em 1908.

Fonte: RUTHERFORD; ROYDS, 1909.

Lopes e Marques (2011, p. 144) descrevem o experimento planejado por Rutherford e Royds da seguinte maneira:

O tubo de vidro A e B eram envolvidos por um tubo de vidro T, de 7,5 cm de comprimento e 1,5 cm de diâmetro, ligado a outro tubo de vidro C. Um pequeno tubo de vácuo V foi também acoplado na parte superior do tubo T. O interior do tubo T foi evacuado por meio de uma válvula D, e a exaustão completa foi feita com o auxílio de um tubo de carvão esfriado com ar líquido. Foi utilizada uma coluna de mercúrio H ligada em um reservatório, o mercúrio foi impelido no tubo T até atingir o fundo do tubo A.

¹⁶ Experimento realizado por Robert Andrews Millikan (1868-1953) em 1909 para determinar a carga do elétron. (BADASH, 2007)

A coleta das partículas alfa provenientes de uma fonte radioativa constituiu o objetivo de tal experimento, pois viabilizaria a avaliação espectroscópica das mesmas. Assim, Rutherford e Royds planejaram o aparato experimental referido de modo a possibilitar o isolamento de tais partículas. Estas, inicialmente, se difundiram do tubo A para o tubo B, passando, progressivamente, para o mercúrio circundante. Do mercúrio, evadiram-se para o tubo T, que era satisfatoriamente espesso para impedir sua difusão para o ar. Após isolarem-nas no espaço entre tubos, Royds foi capaz de constatar que o espectro das partículas alfa era idêntico ao dos átomos de hélio, o que corroborou a hipótese de Rutherford. (LOPES; MARQUES, 2011, p. 146)

4.2 O ÁTOMO NUCLEAR

O próximo passo dado por Rutherford em sua pesquisa foi a compreensão acerca da interação entre as partículas alfa e a matéria, que culminou em importantes modificações nas concepções a respeito da estrutura atômica. Assim, Rutherford iniciou um novo programa de pesquisa, conhecido por espalhamento de partículas alfa, que consistiu no bombardeamento de diversos materiais com projéteis alfa oriundos de fontes radioativas diversas. Tal procedimento foi realizado corriqueiramente no laboratório dirigido por Rutherford através do aparato experimental que, segundo Brennan (2003, p. 143), constituiu o primeiro acelerador de partículas.

Desde sua passagem por Montreal, Rutherford atentava para a relação estabelecida entre as partículas alfa e os diversos materiais. Tal interesse teve início com uma observação experimental peculiar. Rutherford verificou que, no vácuo, um feixe de radiação alfa se propagava linearmente sem sofrer desvios. No ar, entretanto, observou que o feixe viajava difusamente. Deste modo, concluiu que tais constatações indicavam uma influência provocada pelas partículas do ar no trajeto desenvolvido pelos feixes de partículas alfa. (LOPES; MARQUES, 2011, p. 149)

Posteriormente, em 1909, Rutherford dedicou-se ao programa de pesquisa do espalhamento de partículas alfa que havia iniciado. Contou com a colaboração de Hans Geiger e do jovem físico, à procura de um tema para sua tese, Ernest Marsden. Projetado o aparato experimental, ilustrado na figura 10, Rutherford solicitou que ambos registrassem os ângulos de deflexão das partículas alfa após atravessarem uma folha de ouro delgada. (VIEIRA, 2011, p. 4)

Geiger e Mardsen, de início, observaram pequenos ângulos de deflexão das partículas, como se esperava. Rutherford, na qualidade de planejador do experimento, realizava sugestões com certa frequência. Uma de suas sugestões requeria que Geiger e Mardsen atentassem para a verificação de ângulos maiores, que fossem, preferencialmente, iguais ou superiores a 90°. Mesmo sem compreender o motivo tal sugestão inicialmente, buscaram realizar o que lhes fora solicitado por Rutherford. Surpreendentemente, observaram que algumas partículas ricocheteavam para trás. “[...] É como se o sujeito disparasse o projétil de 40 centímetros num pedaço de papel de seda e ele voltasse e o atingisse.” (RUTHERFORD apud BRENNAN, 2003, p. 144)

Após analisar os resultados obtidos por Geiger e Mardsen em 1909, Rutherford logo concluiu que os dados experimentais não condiziam com o modelo do pudim de passas. A finíssima espessura da folha de ouro utilizada não deveria possibilitar a ocorrência dos expressivos desvios registrados caso a estrutura atômica proposta por J.J. Thomson fosse adequada. Rutherford, então, centrou sua pesquisa na elaboração de uma explicação para os grandes ângulos verificados no experimento de espalhamento realizado repetidas vezes por Geiger e Mardsen.

Em consonância com os dados empíricos coletados, Rutherford, em 1911, forneceu uma explicação para os ângulos de deflexão das partículas alfa no ensaio intitulado “*The Scattering of Alpha and Beta Particles by Matter and the Structure of the Atom*”¹⁷. Neste artigo, a ocorrência dos grandes desvios é atribuída à passagem das partículas alfa pelas proximidades das regiões centrais dos átomos. Tais regiões, segundo Rutherford, concentrariam, praticamente, toda a massa do átomo, ocupariam um ínfimo volume e, ao serem atingidas pelas partículas alfa, provocariam o retroespalhamento. (BADASH, 2007, p. 2388)

Considerando a evidência como um todo, parece mais simples supor que o átomo contém uma carga central distribuída através de um volume muito pequeno, e que os grandes ângulos de desvios são devido à carga central como um todo, e não a seus constituintes [...]. Evidência neste aspecto poderia ser obtida examinando se a mesma carga central é necessária para explicar uma única grande deflexão de partículas alfa [...] (RUTHERFORD apud LOPES; MARQUES, 2011, p. 153)

Evidentemente, Rutherford havia conjecturado uma estrutura atômica diferente daquela idealizada por Thomson. Embora alguns de seus aspectos não estivessem bem definidos, a teoria nuclear de Rutherford, publicada com maior detalhamento em 1914, correspondeu aos resultados experimentais de Geiger e Mardsen. Segundo Badash (2007, p.

¹⁷ O Espalhamento de Partículas Alfa e Beta pela Matéria e a Estrutura do Átomo. (Tradução nossa)

2388), para que a partícula alfa sofresse um desvio superior a 90° , Rutherford havia considerado que:

[...] as forças de repulsão elétrica (ou atração, pois, para a matemática, não faz diferença) teriam de se concentrar em uma região de 10^{-13} centímetros, quando se sabia que o átomo media 10^{-8} centímetros. Isso significava que o átomo consistia em um amplo espaço vazio, com um núcleo carregado muito pequeno e muito denso no centro e cargas opostas colocadas, de alguma forma, no espaço vazio circundante.

Embora seja considerado, nos dias atuais, um marco na história da ciência, o modelo atômico de Rutherford não foi bem recebido pela comunidade científica no período em que foi criado. Este fato se deve ao silêncio de Rutherford quanto ao arranjo dos elétrons no interior do átomo, sendo ineficaz, portanto, na resolução de questões do âmbito da Química, como as ligações entre átomos e classificação periódica. Segundo Helge Kragh (1999, p.53), “para ser convincente, uma teoria atômica deveria incluir os elétrons, pois eles eram os responsáveis pela maior parte dos fenômenos que poderiam ser testados experimentalmente”.

O modelo atômico nuclear recebeu maior atenção da comunidade científica apenas a partir dos trabalhos dos colaboradores de Rutherford. Henry Moseley e Niels Bohr, em especial, verificaram as implicações do átomo nuclear. Moseley foi o responsável pela elaboração do conceito de número atômico, o qual constitui o parâmetro vigente de identificação dos elementos químicos. Bohr, por sua vez, quantizou o modelo de Rutherford, bem como constatou que as reações químicas ocorrem no âmbito da eletrosfera e o fenômeno radioativo, no âmbito do núcleo atômico. (BADASH, 2007, p. 2388)

4.3 COLISÕES DE PARTÍCULAS ALFA COM ÁTOMOS LEVES

Ainda em Manchester, Rutherford se dedicou a um novo programa de pesquisa que havia criado, difundido como colisões de partículas com átomos leves, o qual teve como principal produto uma série de quatro artigos publicados. Com o mundo vivendo a Primeira Guerra Mundial (1914-1918), parte expressiva dos alunos e dos colaboradores de Rutherford haviam se alistado no recrutamento militar. Mesmo o próprio Rutherford foi solicitado para participar em projetos de pesquisa com fins bélicos, como a pesquisa acerca da detecção sonora submarina. (BADASH, 2007, p. 2389)

Os experimentos contemplados no referido programa de pesquisa consistiram no bombardeamento de gases de elementos químicos leves com partículas alfa oriundas de fontes radioativas diversas. Alguns elementos, em seus estados gasosos, foram utilizados na série de

experimentos realizados por Rutherford, como o hidrogênio, o oxigênio e o nitrogênio. Ao bombardear o gás hidrogênio com projéteis alfa, Rutherford verificou o surgimento de cintilações de longo alcance e de demasiada brilho em uma tela de sulfeto de zinco. À partícula que provocou tal cintilação, deu-se a designação de “átomos velozes H”.

As resoluções das questões relativas à natureza de tais cintilações e das partículas que as geraram, bem como às suas origens nos processos radioativos, estão contempladas no ensaio *Collisions of alpha Particles with Light Atoms. IV. An Anomalous Effect in Nitrogen*¹⁸. Em tal artigo, publicado em 1919, Rutherford descreveu os experimentos que projetou com a finalidade de investigar o objeto de pesquisa sobre o qual se debruçou: as cintilações de longo alcance.

De início, Rutherford aponta as primeiras características das cintilações, em questão, verificadas. Além de apresentarem um alcance superior ao das partículas alfa, portam uma carga elétrica positiva. Rutherford constatou, ainda, que tais cintilações se assemelham, em brilho e em alcance, às provocadas pelos “átomos velozes H”. Portanto, segundo Rutherford, se tratam das mesmas cintilações observadas no experimento realizado com o gás hidrogênio.

Ainda em um momento inicial do ensaio de 1919, Rutherford anuncia a problemática acerca da origem das cintilações de longo alcance. O primeiro passo dado visou determinar se as partículas de “átomos H” são emitidas diretamente pela fonte radioativa ou se resultam da passagem das partículas alfa pelos gases utilizados nos experimentos. Para alcançar as resoluções de tal questão e das demais, que serão apresentadas adiante, Rutherford construiu um aparato experimental a partir de uma fonte radioativa, de gases de diversas espécies químicas e de uma tela de sulfeto de zinco. Rutherford (1919, p. 581) descreve o aparato que projetou da seguinte maneira:

O aparato empregado para estudar essas cintilações “naturais” é o mesmo descrito no artigo I. A intensa fonte de rádio C foi colocada dentro de uma caixa de metal de aproximadamente 3 cm. Uma abertura no fundo da caixa foi coberta por uma lâmina de prata de poder de blindagem equivalente a 6 cm de ar. A placa de sulfeto de zinco foi colocada do lado de fora, aproximadamente 1mm distante da lâmina de prata, para admitir a introdução de chapas absorventes entre eles. Todo o aparato foi colocado num poderoso campo magnético para desviar os raios beta.

Os dados experimentais obtidos foram utilizados para a construção de gráficos que relacionam a variação do número de cintilações com a absorção em centímetros de coluna de ar. É importante notar que, ao longo de seu artigo, Rutherford, com considerável frequência, faz menção a uma grandeza denominada poder de blindagem para comparar a absorção de diversos materiais. A fim de verificar a principal fonte das cintilações de longo alcance,

¹⁸ Colisões de Partículas alfa com átomos leves. IV. Efeito Anômalo no Nitrogênio. (tradução nossa)

Rutherford realizou o referido experimento em diversos gases, que foram, então, atravessados por partículas alfa.

Os gráficos relativos aos materiais que não originaram os “átomos velozes H” partilharam de um comportamento similar, o qual indicou que, quanto maior a absorção, menor é o número de cintilações verificadas. Ao inserir tanto dióxido de carbono quanto oxigênio no aparato experimental projetado, verificou-se que os gráficos obtidos apresentavam o comportamento descrito, em que o número de cintilações sofreu as reduções esperadas para o poder de blindagem das colunas gasosas das espécies consideradas.

Ao admitir ar atmosférico para o interior do aparato, um efeito anômalo foi observado. Ao invés de diminuir proporcionalmente ao comprimento da coluna de ar inserida, o número de cintilações sofreu um aumento expressivo. Rutherford, então, concluiu que as cintilações são provocadas por “átomos velozes H” decorrentes da passagem de partículas alfa por uma coluna de ar e não da fonte radioativa utilizada.

Um efeito surpreendente foi percebido, no entanto, quando ar seco foi introduzido. Ao invés de diminuir, o número de cintilações foi aumentado, e, para uma absorção correspondente a aproximadamente 19 cm de ar, o número foi cerca de duas vezes maior do que aquele observado quando o ar tinha sido esgotado. Ficou claro com este experimento que as partículas-alfa, em sua passagem através do ar, provocaram cintilações de longo-alcance que pareceram a olho nu ser equivalentes em brilho em comparação com as cintilações H. (RUTHERFORD, 1919, p. 581)

Parte da questão acerca da natureza das cintilações de longo alcance foi resolvida. Verificou-se que tais cintilações se devem à passagem de partículas alfa pelo ar. No entanto, Rutherford julgou ser necessário, ainda, determinar de qual dos componentes do ar atmosférico derivam as partículas de “átomos velozes H” que geram as cintilações de longo alcance.

Dentre os diversos constituintes do ar, Rutherford considerou as seguintes substâncias como possíveis fontes de “átomos velozes H”: gás carbônico, gás oxigênio, vapor d’água, material particulado, gás nitrogênio e os demais gases presentes no ar. De início, Rutherford excluiu as possibilidades do dióxido de carbono e do oxigênio devido à avaliação experimental já realizada com os mesmos, que foi mencionada anteriormente. Logo em seguida, averiguou a possibilidade do vapor d’água através da observação do comportamento do número de cintilações com a introdução de ar seco no aparato. Descartou, assim, tal possibilidade devido ao fato de a variação verificada coincidir com aquela provocada pelo ar que não sofreu o processo de secagem.

As possibilidades restantes, do material particulado, do gás nitrogênio e dos demais gases presentes no ar atmosférico, foram avaliadas. Após introduzir ar atmosférico filtrado,

livre de material particulado, no aparato experimental, Rutherford constatou que a variação provocada no número de cintilações não diferia daquela ocasionada pelo ar não filtrado. Deste modo, concluiu que as cintilações de longo alcance se devem, essencialmente, ao nitrogênio presente no ar, excluindo a possibilidade dos demais gases atmosféricos devido à comparação com os resultados obtidos com o nitrogênio.

O gás nitrogênio introduzido no aparato experimental foi obtido, segundo Rutherford (1919, p. 582), “[...] pelo método notório de adicionar cloreto de amônio ao nitrito de sódio e armazená-los sobre a água”. O nitrogênio resultante da aplicação de tal procedimento químico¹⁹ foi atravessado por projéteis alfa, o que acarretou um número de cintilações de longo alcance superior ao verificado com o ar atmosférico. A fim de definir precisamente que os “átomos velozes H” se originam da colisão entre as partículas alfa e os átomos de nitrogênio, Rutherford (1919, p. 582) considerou que:

Em primeiro lugar, foi descoberto que o número de cintilações variava com a pressão do ar da maneira esperada caso elas fossem resultado da colisão de partículas-alfa ao longo da coluna de gás. Além do mais, quando uma chapa absorvente de ouro ou alumínio era posicionada próxima à fonte, o alcance das cintilações foi verificado como reduzido à quantidade esperada caso o alcance do átomo expelido fosse proporcional ao alcance de partículas-alfa em colisão. Tais resultados provam que as cintilações originam-se a partir do volume do gás e não são provocadas pela presença de qualquer efeito superficial na fonte radioativa.

Ao considerar que os núcleos de átomos de nitrogênio são desintegrados na colisão com as partículas alfa, Rutherford não apenas realiza, mas também concretiza a transmutação artificial. Os “átomos velozes H”, de acordo com Rutherford (1919), constituem partes integrantes dos núcleos dos átomos de nitrogênio. Ao discutir os resultados relatados em seu artigo, Rutherford (1919, p. 584) enuncia que:

Diante dos resultados obtidos até então, é difícil evitar a conclusão de que os átomos de longo-alcance resultantes da colisão de partículas-alfa com nitrogênio não são átomos de nitrogênio, mas, provavelmente, são átomos de hidrogênio, ou átomos de massa igual a 2. Caso esta hipótese seja verdadeira, devemos concluir que o átomo de nitrogênio é desintegrado quando submetido a forças intensas desenvolvidas em colisões próximas com uma partícula-alfa veloz (ou de reação imediata), e que o átomo de hidrogênio liberado forma a parte constituinte dos núcleos de nitrogênio.

O processo de transmutação artificial consistiu na desintegração de núcleos de nitrogênio em núcleos de um isótopo de oxigênio de acordo com a seguinte reação nuclear: ${}_{7}\text{N}^{14} + {}_{2}\text{He}^{4} \rightarrow {}_{8}\text{O}^{17} + {}_{1}\text{H}^{1}$. Os “átomos velozes H” são núcleos de hidrogênio, que, em 1920, foram denominados de prótons pelo próprio Rutherford. Tais partículas, que provocaram as cintilações de longo alcance, foram de grande relevância para a pesquisa de Rutherford, pois,

¹⁹ $\text{NH}_4\text{Cl (aq)} + \text{NaNO}_2 \text{ (aq)} \rightarrow \text{N}_2 \text{ (g)} + \text{NaCl (aq)} + 2 \text{H}_2\text{O}_{(l)}$

além de evidenciarem a ocorrência da desintegração do nitrogênio, compõem o núcleo dos átomos em geral, constituindo um rico viés de investigação. (BRENNAN, 2003, p. 144)

Portanto, os experimentos contemplados no ensaio de 1919 conduziram a conclusões de grande impacto no cenário científico da primeira metade do século XX. Rutherford realizou o primeiro procedimento nuclear artificial, que influenciou uma parcela expressiva dos cientistas, o que conduziu à investigação e ao domínio da fissão nuclear, realizada em 1938 por Otto Hahn (1879-1968) e Fritz Strassmann (1902-1980), que se basearam no trabalho²⁰ de Lise Meitner (1878-1968).

4.4 RETORNO À CAMBRIDGE

Em 1919, J.J. Thomson deixou a direção do laboratório Cavendish para ocupar o cargo de reitor do Trinity College de Cambridge. Rutherford, como esperado, sucedeu Thomson na direção do Cavendish, onde deu continuidade a linha de pesquisa que iniciou nos seus últimos anos em Manchester – os estudos acerca do processo de desintegração artificial. É importante notar que as contribuições dadas por Rutherford, a partir desse período, não foram tão notórias quanto às anteriores. (BADASH, 2007, p. 2389)

Em sua segunda passagem por Cambridge, Rutherford recebeu diversas láureas, títulos e honrarias por numerosas sociedades científicas e universidades. Ainda, recebeu um título de nobreza, tornando-se Barão Rutherford de Nelson, e ocupou a presidência da Royal Society²¹. Além disso, acumulou cargos governamentais voltados para o desenvolvimento científico-tecnológico britânico. (BRENNAN, 2003, p. 146)

Embora ocupado com palestras, reuniões e viagens, Rutherford procurava, sempre que possível, fazer rondas pelo laboratório para estar a par dos projetos desenvolvidos por seus estudantes. Em sua linha costumeira de pesquisa, investigou a desintegração de outros elementos químicos por meio do bombardeio com partículas alfa. Buscou, ainda, maneiras de se provocar a desintegração artificial de elementos pesados com outras partículas, como com o elétron, devido ao fato de as partículas alfa serem ricocheteadas pela ação da intensa carga positiva dos núcleos dos mesmos. (BADASH, 2007, p. 2390)

²⁰ Projeto sugerido por Meitner desenvolvido por Hahn e Strassmann. Meitner se mantinha informada pela correspondência que mantinha com Hahn, realizando sugestões continuamente. Uma de suas sugestões foi definitiva para a identificação do fenômeno que nomeou de fissão nuclear. (TENNENBAUM, 2000)

²¹ “A Royal Society é uma Irmandade de cientistas mais eminentes do mundo e é a mais antiga academia científica que continua existindo” (THE ROYAL SOCIETY, 2012)

No início da década de 1920, Rutherford, em uma de suas palestras proferidas, apresentou algumas hipóteses que vieram a ser corroboradas pelos pesquisadores do Cavendish. Entre as hipóteses levantadas, Rutherford sugeriu a existência de partículas de carga elétrica neutra nos núcleos dos átomos, que foram denominadas, por ele, de nêutrons.

James Chadwick, importante colaborador de Rutherford desde Manchester, projetou numerosos experimentos na tentativa de identificar a partícula neutra sugerida por Rutherford. Apenas em 1932, após ter ciência do trabalho empreendido por Irène Joliot-Curie (1897-1956) e por seu marido, Frédéric Joliot (1900-1958), Chadwick provou a existência do nêutron através de um experimento de bombardeamento com partículas alfa. Cumpre notar que o casal havia interpretado, erroneamente, o que veio a ser o nêutron como sendo raios gama altamente penetrantes.

Por não apresentarem carga elétrica, os nêutrons foram considerados a solução para a problemática da desintegração dos elementos pesados. Como já dito anteriormente, as partículas alfa são fortemente repelidas quando utilizadas para bombardear núcleos pesados. Os nêutrons, por sua vez, não interagiriam com o campo produzido por tais núcleos, sendo capazes de penetrá-los e desestabilizá-los a ponto de provocar sua desintegração. À desintegração provocada pelos nêutrons, deu-se a designação de fissão nuclear, que constitui um processo radioativo peculiar em razão da energia que fornece. (BRYSON, 2005, p. 153)

Em 1937, Rutherford faleceu em razão do estrangulamento de uma hérnia desconhecida. A notícia de seu falecimento abalou a todos no laboratório Cavendish, uma vez que ainda se encontrava bem disposto. É importante ressaltar que Rutherford, mais que qualquer outro, formou concepções acerca da natureza da matéria que vigoram até os dias atuais. (BRENNAN, 2003, p. 146)

5 CONCLUSÃO

Na primeira metade do século XX, os campos da Física e da Química assistiram a consolidação de um novo ramo científico relativo a ambos: a radioatividade. A maioria dos historiadores da ciência eleva Henri Becquerel, Marie e Pierre Curie e Rutherford à posição de principais contribuidores na investigação do fenômeno radioativo. Coube a Becquerel o relato da observação do referido fenômeno e, aos Curie e a Rutherford, competiu a compreensão da radioatividade no que tange aos elementos radioativos e às radiações emitidas pelos mesmos. (SANTOS, 2011, p. 1)

No decorrer da pesquisa de Rutherford, o conceito de transmutação se refletiu na construção da teoria da transmutação elementar e na execução da transmutação artificial. As principais implicações de tais realizações relacionam-se à modificação dos conceitos de elemento químico e de átomo e às resoluções da controvérsia em torno das fontes de energia das substâncias radioativas e do debate acerca da idade da Terra.

Constatada a ocorrência do processo de transmutação elementar e a existência dos isótopos, a análise química última não constituiu mais o critério de demarcação de um elemento químico. Um novo conceito de elemento, então, emerge e é definido a partir da análise espectral e, portanto, a partir de um método físico. Nesse sentido, os elementos químicos desvincularam-se, então, da ideia de imutabilidade. Por sua vez, a primeira experiência real de cisão do núcleo atômico, realizada em 1919, forneceu a confirmação de que o átomo não era indestrutível, além de ter conduzido à identificação do próton.

As propriedades radioativas dos radioisótopos permanecem inalteradas em meio às modificações das condições físicas ou das combinações químicas consideradas. Tal fato conduziu à conclusão de que a fonte de energia das substâncias radioativas provém de processos ocorridos no interior do átomo e, mais especificamente, no núcleo atômico. A partir da implementação do método da datação radiométrica, que consiste na comparação entre as quantidades de isótopos de uma mesma série de decaimento, tornou-se possível a determinação da idade da Terra, o que encerrou o debate acerca de tal temática.

Cabe lembrar o papel fundamental desempenhado pelos colaboradores e estudantes de Rutherford na pesquisa em radioatividade, bem como em campos correlatos. É possível citar alguns, como Niels Bohr, que quantizou o modelo atômico de Rutherford; Henry Moseley, responsável por elaborar o conceito de número atômico; James Chadwick, incumbido de descobrir a partícula neutra que Rutherford havia previsto existir; e Hans Geiger, que, ao

aperfeiçoar o aparelho de contagem de partículas desenvolvido com Rutherford, criou o contador Geiger-Müller.

A dedução da existência do núcleo atômico, em 1911, marcou o início da era nuclear. No entanto, as primeiras investigações em Física Nuclear propriamente dita se deram apenas nos últimos anos de Rutherford na universidade de Manchester. Em tal período, foi realizado o primeiro procedimento nuclear artificial, que, além de esclarecer parte da constituição do núcleo atômico, abriu caminho para a execução dos demais processos artificiais, incluindo a fissão nuclear, realizada em 1938. (BRENNAN, 2003, p. 144)

Rutherford não viveu o suficiente para assistir o desenvolvimento da Física Nuclear que havia criado. Os futuros conhecimentos adquiridos nesse campo de investigação, como a fissão nuclear, foram direcionados para a geração de energia elétrica, bem como para o desenvolvimento de tecnologias e armamentos bélicos. Estes se encontravam inseridos nos programas nucleares dos países envolvidos na Segunda Guerra Mundial e na Guerra Fria, estendendo-se, posteriormente, para uma parcela significativa das demais nações. (MERÇON; QUADRAT, 2004, p. 27)

A Segunda Guerra Mundial ocorreu entre 1939 e 1945 e os países participantes se reuniram em dois grupos: Aliados (Estados Unidos, França, Inglaterra e URSS) e Eixo (Alemanha, Itália e Japão). A enorme quantidade de energia liberada no processo da fissão nuclear constituiu uma preocupação para diversos cientistas envolvidos na Segunda Guerra devido ao receio de que a Alemanha nazista pudesse fabricar armamento nuclear. Este receio instigou os Estados Unidos a iniciar o projeto Manhattan em 1941, o qual resultou na produção da primeira bomba atômica. Tal projeto recebeu um expressivo investimento e reuniu numerosos cientistas de diversas nacionalidades.

A ordem mundial bipolar, instituída no pós-Segunda Guerra, é caracterizada pela divisão das nações em dois grupos: capitalistas (liderados pelos EUA) e socialistas (liderados pela URSS). A disputa por influência levou os EUA e a URSS às corridas espacial e armamentista. Em meio ao desenvolvimento nuclear dos EUA, levado às últimas consequências com o lançamento das bombas atômicas sobre o Japão, a URSS passou a investir fortemente em armamento nuclear, construindo sua própria bomba atômica.

Na História, verifica-se, ainda, outro aspecto marcante da utilização das tecnologias provenientes do campo Física Nuclear: a geração de energia elétrica a partir da fissão nuclear. As usinas nucleares são consequência do uso de reatores, construídos, inicialmente, com fins militares, na produção de eletricidade. Tais usinas apresentam vantagens em certos aspectos, como na extensão da área de instalação e na emissão de poluentes, quando comparadas às

hidrelétricas e às termoeletricas, mas requerem um alto custo de implantação e manutenção, além de apresentarem riscos de acidentes com os reatores e provocarem a poluição térmica de corpos hídricos. (MERÇON; QUADRAT, 2004, p. 28)

A primeira usina nuclear foi instalada na URSS em 1954, se mostrando, inicialmente, um investimento promissor em razão de seu elevado rendimento. Entretanto, a confiabilidade na segurança dos reatores das usinas foi abalada com a ocorrência do principal acidente radioativo – o acidente em Chernobyl, Ucrânia, em 1986 – embora já houvesse ocorrido alguns desastres. Outros fatores, como o despejo inadequado de lixo atômico, levaram ativistas a organizarem movimentos em contestação ao uso de tecnologias nucleares tanto para fins bélicos como para geração de energia. (MERÇON; QUADRAT, 2004, p. 28)

A produção e a utilização do armamento nuclear serviram como demonstrações de poder e instrumentos de barganha política. A possibilidade do uso da exorbitante quantidade de energia fornecida pelas reações nucleares para fins bélicos e de geração de eletricidade foi descartada por Rutherford. Este, porém, se mostrou equivocado e a energia nuclear, logo que obtida, foi destinada à fabricação das bombas atômicas, que, entre outras catástrofes, provocaram a destruição em massa de duas cidades japonesas, Hiroshima e Nagasaki, assinalando, de forma lamentável, o término da Segunda Guerra Mundial. (CAMARGO, 2007, p. 58)

Para além da construção de armamentos nucleares, os conhecimentos oriundos da investigação do fenômeno radioativo originaram outras tecnologias de consideráveis relevâncias para a sociedade. Os traçadores radioativos constituem uma importante aplicação dos radioisótopos na área da medicina nuclear. Tais substâncias são detectadas por aparelhos sensíveis às radiações que emitem, gerando mapas formados pelos trajetos que descrevem em um organismo. A irradiação de alimentos provoca a eliminação de agentes patológicos e dos demais micro-organismos, constituindo uma tecnologia de grande aplicabilidade na indústria alimentícia. (CARDOSO et al., 2012)

Vale destacar que tais tecnologias derivam de alguns dos conceitos resultantes do estudo de Rutherford e de seus colaboradores em radioatividade, como o de meia-vida e o de transmutação. Por exemplo, os radioisótopos utilizados como traçadores radioativos devem apresentar um curtíssimo tempo de meia-vida. No caso da irradiação de alimentos, é importante o conhecimento acerca do tipo de decaimento dos compostos radioativos utilizados, isto é, se consistem em emissores alfa, beta ou gama.

Dado isso, as pesquisas científicas relativas às problemáticas nucleares, bem como às temáticas que as antecederam, evidenciaram o vínculo entre o desenvolvimento científico e as

questões de ordens socioeconômicas e políticas, isto é, a responsabilidade social da ciência. Muito embora prevaleça o argumento de que não cabe ao cientista prever as consequências sociais de suas investigações, deve-se atentar para o fato de que seus estudos satisfazem e geram necessidades sociais. As supostas neutralidade científica e indiferença quanto aos valores postos na sociedade constituem o caráter muitas vezes cego e permissivo da ciência, responsável por promover determinados valores sociais e políticos em geral destrutivos. (MARCUSE, 2009, p. 162)

Portanto, em função das consequências sociais da investigação científica, torna-se elementar a ocorrência da divulgação científica. Embora não se encontre isento das implicações sociais de sua pesquisa, o cientista é apenas um dos responsáveis. A sociedade como um todo e, mais especificamente, os agentes do poder público, bem como os donos dos meios de produção, devem se manter a par do que ocorre nos mundos científico e acadêmico, uma vez que participam dos processos decisórios de uma maneira geral. No entanto, é importante notar que, no sistema econômico hegemônico, as decisões tomadas, incluindo as que se dão no campo científico, nem sempre visam atender o interesse do coletivo, mas sim de frações restritas da sociedade que constituem os setores da elite capitalista.

Cabe destacar, ainda, o papel da experimentação na investigação científica em geral e, mais especificamente, na pesquisa acerca do fenômeno radioativo. Os experimentos são planejados com o objetivo de testar hipóteses diversas para a resolução de problemáticas distintas. Rutherford projetou, em consonância com os seus pressupostos teóricos, numerosos aparatos experimentais ao longo de sua carreira, tendo por finalidade não a realização das descobertas que obteve como se costuma difundir, mas sim, muitas vezes, a justificativa das noções e teorias que havia pré-concebido.

Cumprido observar que a contribuição de Rutherford na pesquisa em radioatividade se estendeu a muito além da concepção do átomo nuclear. Seu papel na história de tal fenômeno se encontra associado à compreensão do mesmo propriamente dito, pois seus trabalhos de maiores expressão e impacto explicam até os dias atuais a radioatividade nos seus variados aspectos. Tais trabalhos se encontram ligados direta ou indiretamente ao conceito de transmutação e consolidaram a maior parcela das subáreas que hoje se encontram compreendidas no estudo da radioatividade, como radiações e partículas, cinética radioativa e reações de transmutação.

6 REFERÊNCIAS

AFONSO, J. C. Radônio. **Química Nova Escola**, Rio de Janeiro, v. 32, n. 4, p. 267-268, Nov. 2009. Disponível em: < http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc32_4/09-EQ10909.pdf>. Acesso em: 09 set. 2012.

ARAÚJO, D. F. **Química e a Idade da Terra**. 2011. 60f. Monografia (graduação em química). 2011. Instituto de Química da Universidade de Brasília, Brasília, 2011. Disponível em: < <http://bdm.bce.unb.br/handle/10483/3081>>. Acesso em: 02 mai. 2012.

BADASH, L. Rutherford. In: **Dicionário de Biografias Científicas**. Rio de Janeiro: Contraponto, v. 3, 2007, p. 2382-2393.

BRENNAN, R. **Gigantes da Física**: uma história da física moderna através de oito biografias. Tradução Maria Luíza X. de A. ed. rev. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2003. 287p

BRYSON, B. **Breve história de quase tudo**. Tradução Ivo Korytowski. 12. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 2005.

CAMEL, T. O. **De Thomson a Rutherford, investigando a estrutura da matéria**. Rio de Janeiro: 2008.

CAMARGO, G. **O fogo dos deuses**: uma história da energia nuclear: Pandora 600a.C.-1970. 2. ed. Rio de Janeiro: Contraponto, 2007.

CARDOSO, E. M.; ALVES, I. P.; BRAZ, C.; PESTANA, S. **Aplicações da Energia Nuclear**. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas.asp>>. Acesso em: 27 nov. 2012

CHAUÍ, M. **Convite à Filosofia**. São Paulo: Editora Ática, 2009.

E-FÍSICA (ensino de física online). Disponível em: <<http://efisica.if.usp.br/apoio/equipamentos.php>>. Acesso em: 23 set. 2012.

FARIAS, R. F. **Para gostar de ler a história da química**. 1. ed. Campinas, São Paulo: Editora Átomo, 2003. 98p.

HOBBSAWM, E. **A Era das Revoluções**: 1789-1848. Tradução António Cartaxo. 2. ed. Lisboa: Editorial Presença, 1986.

_____. **A era do capital**: 1848-1875. 9. ed. São Paulo: Paz e Terra, 2002.

KRAGH, H. **Quantum Generations**: A History of Physics in the Twentieth Century. New Jersey: Princeton University Press, 1999.

LAVOISIER, A. L. Tratado Elementar da Química. Tradução Micheline Nussenzveig e Maria Ignez Duque-estrada. **Revista Ciência Hoje**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 105, p. 30-37, mai. 1994.

LOPES, C. V. M.; MARQUES, D. M. Modelos Atômicos de J.J. Thomson e Ernest Rutherford. In: BELTRAN, M. H. R.; SAITO, F.; TRINDADE, S. P (Org.). **História da Ciência: tópicos atuais 2**. São Paulo: Ed. Livraria da Física/CAPES, 2011, p. 32-51.

MARCUSE, H. **A responsabilidade social da ciência**. Tradução Marília Mello Pisani. *Scientiae Studia*, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 159-164, mar. 2009.

MARQUES, D. M. **As Investigações de Ernest Rutherford sobre a Estrutura da Matéria**: contribuições para o ensino de química. 2006. 182f. Dissertação (Mestrado em Educação para a Ciência) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru, 2006.

MARTINS, R. A. Como Becquerel não descobriu a radioatividade. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, n. 7, p. 27-45, jun. 1990.

MAST (museu de astronomia e ciências afins). Disponível em: <http://www.mast.br/multimedia_instrumentos/cintilometro_historico.html>. Acesso em: 12 out. 2012.

MEDEIROS, A. Aston e a descoberta dos isótopos. **Química Nova na Escola**, Rio de Janeiro, n.10, p.32-36, nov. 1999. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc10/historia.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2012.

MERÇON, F; QUADRAT. S. V. A. A radioatividade e a História do Tempo Presente, **Química Nova na Escola**, Rio de Janeiro, n.19, p.27-30, mai. 2004. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc19/a08.pdf>>. Acesso em: 05 mai. 2012.

OKI, M. C. M. O Conceito de Elemento: da Antiguidade à Modernidade. **Química Nova na Escola**, Rio de Janeiro, n.16, p.21-25, nov. 2002. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc16/v16_A06.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2012

PIERRE, T. D. S. Reações Fotoquímicas. Disponível em: <http://web.ccead.puc-rio.br/condigital/mvsl/Sala%20de%20Leitura/conteudos/SL_reacoes_fotoquimicas.pdf>. Acesso em: 28 out. 2012.

PUGLIESE, Gabriel. Entre o divisível e o indivisível: o radium metálico e a composição da matéria. In: **Reunião de Antropologia do Mercosul**, 2009, Buenos Aires. CD - ponencias - RAM, 2009.

RUTHERFORD, E. Uranium radiation and the electrical conduction produced by it. **Philosophical Magazine**, v. 47, n. 5, p. 109-163, 1899. Disponível em: <<http://www.chemteam.info/Chem-History/Rutherford-Alpha&Beta.html>>. Acessado em: 16 jan. 2012.

_____. A Radioactive Substance emitted from Thorium Compounds. **Philosophical Magazine**, v. 49, n. 5, p. 1-14, 1900. Disponível em: <<http://www.chemteam.info/Chem-History/Rutherford-half-life.html>>. Acesso em: 28 mar. 2012.

_____. The Nature of the α Particle from Radioactive Substances. **Philosophical Magazine**, n. 17, p. 281-286, 1909. Disponível em: <<http://web.lemoyne.edu/~giunta/royds.html>>. Acesso em: 27 jan. 2012.

_____. The Scattering of alpha and beta Particles by Matter and Structure of the Atom. **Philosophical Magazine**, n. 6, p. 669-688, 1911. Disponível em: <<http://www.chemteam.info/Chem-History/Rutherford-1911/Rutherford-1911.html>>. Acessado em: 08 fev. 2012.

_____. Collisions of alpha Particles with Light Atoms: An Anomalous Effect in Nitrogen. **Philosophical Magazine**, v. 6, n. 37, p. 581-587, 1919. Disponível em: <<http://web.lemoyne.edu/~giunta/rutherford.html>>. Acessado em: 16 jan. 2012.

RUTHERFORD, E.; SODDY, F. The Cause and Nature of Radioactivity, Part I. **Philosophical Magazine**, n. 4, p. 370-396, 1902. Disponível em: <<http://web.lemoyne.edu/~giunta/ruthsod.html>>. Acessado em: 11 fev. 2012.

SANTOS, C. A. **Do Espalhamento de Partículas Alfa à Energia Nuclear: Caminhos Percorridos por Rutherford**. Disponível em: <<http://www.foco.fae.ufmg.br/pdfs/1708.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2011.

SEGRÉ, E. **Dos raios X aos quarks: Físicos Modernos e suas descobertas**. Brasília: Editora da UnB, 1987.

TAVARES, O. P. **Ernest Rutherford e o Átomo Nuclear**. Rio de Janeiro: CBPF, 2011. Disponível em: <http://cbpfindex.cbpf.br/publication_pdfs/cs00211.2011_01_10_13_57_15.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2012.

TENNENBAUM, J. **Energia Nuclear: Uma tecnologia feminina**. 1. ed. Movimento da Sociedade Ibero-americana, 2000. p.357

THE NOBEL PRIZE. **The Nobel Prize in Chemistry 1908**. Disponível em: <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1908/>. Acesso em: 29 Nov. 2011.

THE ROYAL SOCIETY. Disponível em: <<http://royalsociety.org/>>. Acesso em: 25 Nov. 2012.

VANIN, J.A. **Alquimistas e Químicos: o passado, o presente e o futuro**. São Paulo: Editora Moderna, 1994.

VIEIRA, C. L. **O CENTRO DE TODAS AS COISAS: um século da descoberta do núcleo atômico**. Rio de Janeiro: CBPF, 2011.